



Facultad de Ingeniería
Escuela de Construcción Civil

Evaluación de la migración de cloruro en el hormigón pigmentado.

Por

Diego Andrés Marchant Herrera

Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al Título de
Ingeniero Constructor

Prof. Guía: Gina Vindigni Pacheco

DICIEMBRE, 2019

Dedicatoria

Las promesas se cumplen, por eso hoy te digo cumplí, abuelo...

*“Cada persona es un mundo diferente,
por qué cada uno ve la vida con distintos ojos,
en tu mundo prevalecía el esfuerzo y el cariño,
dos características que me enseñaste a llevar en mí.
Dentro de tu mundo existió un sueño desinteresado,
el cual hoy en día con la mirada al cielo te digo,
tu sueño se cumplió.*

*Me entregaste muchos valores, enseñanzas,
Con orgullo digo que estos me acompañaran toda la vida
y lo más importante que me enseñaste fue
Como ver la vida con tus ojos.
Te dedico este logro con mucho amor tu nieto.”*

Agradecimientos

Primero que todo comenzar con mi familia, Roxana Herrera, Eliseo Marchant y Paula Ríos, Muchas gracias por su formación, cariño y apoyo incondicional, este logro es tanto mío como de ustedes, gracias por enseñarme a no rendirme, a ver lo bueno dentro de las malas etapas, muchas gracias por sus palabras, sus abrazos, sus miradas y demostraciones de cariño, cada uno de ustedes es un apoyo, un pilar, una parte muy importante dentro de mi vida, gracias por cada llamado de atención, por cada palabra de ánimo y confiar en mí, me siento orgulloso de ser su hijo y hermano, muchas gracias familia.

Paulina Herrera, me has acompañado durante toda esta larga etapa, eres la persona que saca lo mejor de mí, me ayudas con tu amor e inteligencia, eres una gran persona en la cual encontré un apoyo incondicional en el día a día, gracias por soportar cada mal momento, gracias por cada consejo, sonrisa, carcajada, cariño y gracias por sobre todo, por ser una excelente compañera de vida, te amo.

Agradecer a mis abuelos, Mercedes Riquelme por su cariño incondicional, su sonrisa y preocupación, muchas gracias por ser tan positiva en cada momento que lo necesite, es un pilar muy importante en mi vida. Don Carlos Herrera por su incitación hacia las matemáticas y la ingeniería, tu esfuerzo y perseverancia a lo largo de tu vida, fueron un ejemplo para mí y hoy cumplo mi promesa de ser un profesional, te agradezco toda la orientación y cariño. Un abrazo al cielo querido abuelo.

Ricardo Donoso, Matías Bello, Daniel Jara, Diego Salinas, Iván Vera, Eduardo Vera, Jonathan Calderón, Paulina Marín, Catalina Gálea, muchas gracias a cada uno de ustedes por enseñarme lo que es la amistad durante todos estos largos años, gracias por esas palabras de aliento, consejo, ayuda y apoyo, gracias por su compañía, confianza y lealtad, son parte de mi historia y espero que aún quede mucha historia por delante, muchas gracias amigos.

Nicolás Martineau, Cristófer Flores, Daniel Hormazabal, cada uno de ustedes estuvo a lo largo del proceso acompañándome, aprendimos juntos, crecimos juntos dentro de la carrera, cada uno me enseñó y ayudó en sus especialidades, por el compañerismo, amistad, las risas y las largas noches de estudio en conjunto, les agradezco cada momento, por esto y muchas cosas más, muchas gracias amigos.

Don Víctor Escudero, muchas gracias por su paciencia, ayuda incondicional durante el proceso de mi tesis, agradezco su consideración y buena disposición siempre con una sonrisa listo para ayudarme en lo necesario, gracias por orientarme en momentos de incertidumbre, más que un profesional de laboratorio, es un amigo, muchas gracias por todo.

A mi Profesora guía, Gina Vindigni Pacheco, muchas gracias por aceptar el desafío de apoyarme durante este largo camino, gracias por sus enseñanzas y consejos. Agradezco la responsabilidad que tuvo conmigo, le agradezco su profesionalismo desde el inicio hasta el final de mi carrera, ya que cada palabra ayudó en la creación de esta tesis.

Profesores de la Universidad de Valparaíso, les expreso mi alegría y gratitud por la formación académica entregada, por forjar mis capacidades y aptitudes. Gracias por todas las herramientas y palabras entregadas.

Gracias a Emperatriz Villanueva y Fabiola Guzmán, por entregarnos su cariño y alegría cada mañana, por sus buenos deseos y apoyo durante todo estos años.

Índice

Dedicatoria	2
Agradecimientos	3
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	7
LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE FIGURAS	10
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
Antecedentes generales.	14
1.1 Introducción	14
1.2 Planteamiento del Problema.....	15
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo General:	18
1.3.2 Objetivos Específicos:	18
1.4 Hipótesis.....	19
1.5 Alcances	20
Marco teórico.....	21
2.1 Hormigón	21
2.1.1 Hormigón coloreado	21
2.2 Pigmentos:.....	21
2.2.1 Pigmento colorante	21
2.2.2 Pigmentos naturales	21
2.2.3 Pigmentos sintéticos	21
2.2.4 Características físicas de los pigmentos colorantes	22
2.2.5 Pigmentos colorantes empleados actualmente.....	22
2.2.6 Composición química	22
2.2.7 Dosis de pigmento	23
2.3 Medición de color	24
2.3.1 Modelos colorimétricos	24
2.3.2 Modelo CIELAB	24
2.3.3 Coordenadas cromáticas	25
2.4 Hormigones para zonas costeras	25
2.4.1 Resistencia de hormigones marítimos	25
2.5 Ataque por cloruros.....	26
2.5.1 Corrosión por cloruros	27

2.5.2 Mecanismos de transporte de ión Cloruro	28
2.5.3 Difusión del ión cloruro en hormigones	28
2.5.4 Acción de los cloruros	29
2.5.5 La corrosión del acero en el hormigón	30
2.5.6 Factores que inciden en la tasa de penetración de cloruros en el hormigón	30
2.6 Solicitación ambiental marina.....	31
2.7 Factores incidentes en el hormigón pigmentado	34
2.7.1 Resistencia a compresión.....	34
2.7.2 Succión capilar	34
2.7.3 Permeabilidad	35
2.7.4 Resistividad eléctrica	35
2.7.5 Capacidad de retención de cloruro	36
2.7.6 Grado de saturación	37
2.8 Acción agresiva del agua de mar.....	39
Metodología de la investigación	40
3.1 Diseño Experimental	40
3.2 Materiales y métodos	41
3.2.1 Cemento.....	41
3.2.2 Agua.....	42
3.2.3 Pigmentos	42
Desarrollo experimental.....	49
4.1 Generalidades.....	49
4.2 Granulometría de los áridos	49
4.2.1 Áridos	49
4.2.2 Tamizado y determinación de la granulometría	49
4.2.3 Densidades y absorción	52
4.2.4 Dosificación.....	53
4.3 Fabricación de la mezcla	54
4.4 Fabricación de probetas.....	55
4.5 Procedimiento aplicado en cada ensayo:.....	56
4.5.1 Ensayo de Permeabilidad de ion cloruro: ASTM C1202.....	56
4.5.2 Ensayo de Nitrato de plata ASTM C1202/05	56
4.5.3 Ensayo de permeabilidad al aire: Método Figg modificado	57
4.5.4 Ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión según NCh 2262	58

4.5.5 Ensayo de decoloración (espectrofotómetro)	58
4.5.6 Ensayo de Flexo- Tracción (NCh 1038).....	59
4.6 Cantidad de probetas por ensayo.....	60
Presentación y análisis de datos:.....	61
5.1 Generalidades.....	61
5.2 Decoloración superficial	61
5.2.1 Medición de coloración	61
5.2.2 Análisis de la experiencia.....	64
5.3 Medición de migración de cloruros:.....	65
5.3.1 Análisis de la experiencia	68
5.4 Medición de flexo-tracción:	69
5.4.1 Análisis de la experiencia	72
5.5 Medición permeabilidad al agua:	73
5.5.1 Análisis de la experiencia	76
5.6 Medición nitrato de plata:	77
5.6.1 Análisis de la experiencia	80
5.7 Medición permeabilidad al aire:.....	81
5.7.1 Análisis de la experiencia	84
Conclusiones	85
Propuesta a futuras investigaciones.....	86
Bibliografía	87

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

- (cm) = Centímetro
- (m) = Metro
- (mm) = Milímetro
- (kg) = Kilogramo
- (gr) = Gramo
- NCh = Norma Chilena
- Of = Oficial
- (min) = Minuto
- (seg) = Segundo
- % = Por ciento
- $C_{x,t}$ = Concentración de cloruros a una profundidad x , con un tiempo t
- C_s = Concentración superficial de cloruro
- RCPT = Rapid Chloride permeability test
- (V) = Voltaje
- (A) = Amperaje
- EN = Norma Española
- (Kg/m³) = Densidad
- CIE = Comisión internacional de la iluminación
- (C) = Coulomb
- (MPa) = Mega pascales
- (N) = Newton
- (Kt) = Coeficiente de permeabilidad
- ASTM = American Society for Testing and Materials

LISTA DE TABLAS

2. *ANTECEDENTES GENERALES*

Tabla 2. 1 Nomenclatura química de los pigmentos utilizados22

Tabla 2. 2 Componentes de los pigmentos utilizados23

3. *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN*

Tabla 3. 1 Información de cemento utilizado.....41

Tabla 3. 2 Propiedad de los pigmentos.42

4. *DESARROLLO EXPERIMENTAL*

Tabla 4. 1 Granulometría arena.....50

Tabla 4. 2 Granulometría gravilla51

Tablas 4. 3 Densidades y absorción52

Tabla 4. 4 Densidad aparente suelta.....52

Tabla 4. 5 Densidad aparente compactada.....53

Tabla 4. 6 Dosificación hormigón patrón.....54

Tabla 4. 7 Dosificación para cada porcentaje54

Tabla 4. 8 Clasificación Poroscope plus.....58

Tabla 4. 9 Probetas para ensayos60

5. *ANÁLISIS DE RESULTADOS*

Tabla 5. 1 Coloración inicial CIELAB.....61

Tabla 5. 2 Coloración en el tiempo variable L.....62

Tabla 5. 3 Coloración en el tiempo variable a.....63

Tabla 5. 4 Coloración en el tiempo variable b63

Tabla 5. 5 Clasificación migración de Cloruro65

Tabla 5.6 Ensayo de migración de cloruro en pigmento amarillo65

Tabla 5.7 Ensayo de migración de cloruro en pigmento rojo66

Tabla 5.8 Ensayo de migración de cloruro en hormigón patrón	66
Tabla 5.9 Ensayo Flexo tracción hormigón patrón	69
Tabla 5.10 Ensayo Flexo tracción hormigón con pigmento rojo	69
Tabla 5.11 Ensayo Flexo tracción hormigón con pigmento amarillo	70
Tabla 5.12 Registro penetración agua en probetas con pigmento amarillo	73
Tabla 5.13 Registro penetración agua en probetas con pigmento rojo	74
Tabla 5.14 Registro penetración agua en probetas patrón	74
Tabla 5.15 Registro AgCl en probetas con pigmento amarillo	77
Tabla 5.16 Registro AgCl en probetas con pigmento rojo.....	78
Tabla 5.17 Registro AgCl en probetas patrón	78
Tabla 5.18 Clasificación permeabilidad al aire	81
Tabla 5.19 Registro permeabilidad al aire en probetas con pigmento amarillo.....	81
Tabla 5.20 Registro permeabilidad al aire en probetas con pigmento rojo.....	82
Tabla 5.21 Registro permeabilidad al aire en probetas patrón.....	82

LISTA DE FIGURAS

2.-Marco teórico

Figura 2. 1 Daño químico en hormigón.	27
---	----

3.-Metodología de la investigación

Figura 3. 1 Moldes prismáticos.....	43
Figura 3. 2 Fuente de poder	44
Figura 3.3 Polvo nitrato de plata.....	44
Figura 3.4 Poroscopio pluss	45
Figura 3.5 Equipo penetración de agua.....	46
Figura 3.6 Espectrofotómetro.....	47
Figura 3.7 Prensa de ensayo.....	48

4.-Desarrollo experimental

Figura 4. 1 Curva granulométrica arena.....	50
Figura 4. 2 Curva granulométrica gravilla	51

5.- Resultados y análisis

Figura 5.2 Coloración en el tiempo variable L	62
Figura 5.3 Coloración en el tiempo variable a.....	63
Figura 5.4 Coloración en el tiempo variable b.....	63
Figura 5.5 Espectrofotómetro.....	64
Figura 5.6 Grafica migración de cloruro.....	67
Figura 5.7 Toma de cargas eléctricas.....	67
Figura 5.8 Grafica Flexo tracción.	70
Figura 5.9 Ensayo flexo tracción con probeta color amarilla 5 %	71
Figura 5.10 Ensayo flexo tracción con probeta roja 5 %	71
Figura 5.11 Grafica Permeabilidad al agua.....	75

Figura 5.12 Ensayo permeabilidad al agua	75
Figura 5.13 probeta sometida a rotura por hendimiento.	76
Figura 5.14 Grafica Penetración de AgCl.	79
Figura 5.15 Ensayo Penetración de AgCl.	79
Figura 5.16 Grafica permeabilidad al aire	83
Figura 5.17 Ensayo permeabilidad al aire.....	83

RESUMEN

En los muelles de las zonas costeras se utiliza hormigón convencional previamente estudiado mediante la norma ASTM C1202, pero no se ha estudiado cómo se comporta un hormigón con agregado de pigmento inorgánico en el mismo contexto.

Respecto las propiedades mecánicas estas se han estudiado en muestras de hormigón con pigmento demostrando un resultado aceptable dentro de los parámetros. En este ensayo utilizare pigmento inorgánico constituido de óxido de hierro el cual tiene un estudio de propiedad mecánica a la compresión estudiada, la cual se realizó en la tesis “Influencia de la adición de pigmentos colorantes en la durabilidad del hormigón” la cual realizada por Jeanette M. Núñez Allendes de la Universidad de Valparaíso. Por lo cual es necesario el estudio de ensayos a la flexo-tracción en dicho hormigón con agregado de pigmento para verificar sus propiedades mecánicas.

S plantea verificar como la migración de cloruro afecta a las propiedades del hormigón pigmentado, dado que en las diversas construcciones se ha evaluado al hormigón tradicional mediante inspecciones visuales asociados a los ensayos de campo y de laboratorio. Para el estudio colorimétrico se utilizara la pulverización de nitrato de plata (AgNO_3), dado que el análisis de carbonatación arrojará resultados de baja fiabilidad por su poca precisión.

Esta investigación presenta estudios sobre el uso del método colorimétrico para evaluar la profundidad de penetración de cloruros en el hormigón, también se tomarán en cuenta para el análisis los ensayos de permeabilidad, tanto de ion-cloruro como de permeabilidad de aire y se presentarán estudios de resistividad eléctrica. También se realizará un ensayo de desgaste en el pigmento para verificar que nos encontremos frente un material utilizable en la construcción.

Se verificaran los datos obtenidos de estos ensayos con los datos obtenidos de un hormigón tradicional sin la adición de pigmento para realizar una comparación de sus propiedades.

Para lograr una buena mezcla del hormigón nos basaremos en la Nch 170-2016 la cual recomienda los requisitos generales para el hormigón convencional. Respecto la granulometría que se utilizará, esta debe cumplir con la norma chilena Nch163-2013.

Se desea aportar información completa del comportamiento sobre el hormigón con pigmento inorgánico frente a la migración del ión de cloruro y entregar una alternativa constructiva en los muelles de las zonas costeras.

ABSTRACT

On the docks of the coastal areas, the Conventional concrete previously studied by ASTM C1202, but it has not been studied how a concrete with inorganic pigment aggregate behaves in the same context.

Regarding the mechanical properties these have been studied in concrete samples with pigment demonstrating an acceptable result within the parameters. In this test I will use inorganic pigment constituted of iron oxide which has a study of mechanical property to the compression studied, which was carried out in the thesis "Influence of the addition of coloring pigments on the durability of concrete" which was carried out by Jeanette M. Núñez Allendes of the University of Valparaíso. Therefore, it is necessary to study flexo-tensile tests on said concrete with pigment aggregate to verify its mechanical properties.

It is proposed to verify how chloride migration affects the properties of pigmented concrete, given that in various constructions traditional concrete has been evaluated by visual inspections associated with field and laboratory tests. For the colorimetric study, the silver nitrate spray (AgNO_3) will be used, since the carbonation analysis yields low reliability results due to its low accuracy.

This research presents studies on the use of the colorimetric method to evaluate the depth of penetration of chlorides in concrete, the permeability tests, both ion-chloride and air permeability will also be taken into account for the analysis and studies of electrical resistivity A wear test will also be carried out on the pigment to verify that we are facing a material that can be used in construction.

The data obtained from these tests will be verified with the data obtained from a traditional concrete without the addition of pigment to make a comparison of its properties.

To achieve a good mix of concrete we will rely on Nch 170-2016 which recommends the general requirements for conventional concrete. Regarding the granulometry to be used, it must comply with Chilean standard Nch163-2013.

It is desired to provide complete information on the behavior of concrete with inorganic pigment against the migration of chloride ion and provide a constructive alternative at the docks of coastal areas.

Antecedentes generales

1.1 Introducción

El hormigón coloreado es un material de construcción que no difiere fundamentalmente del proceso empleado para producir hormigones convencionales, la importancia se centra en que ofrecen patrones de belleza diferente y ahorro en los tiempos de construcción para obtener una superficie terminada.

La técnica de colorear hormigones se desarrolló después de la Segunda Guerra Mundial. Inicialmente, se aplicó en prefabricados y hacia los años 80, comenzó a usarse directamente en obra. Las ventajas del uso del hormigón coloreado son innumerables. Dentro de las más importantes destaca la durabilidad de los colores, ya que los pigmentos son químicamente estables y no cambian significativamente su tono bajo exposiciones ambientales normales.

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

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

1.2 Planteamiento del Problema

El hormigón es un producto resultante de la mezcla aglomerante, arena, grava, áridos y agua. Es un buen aislante acústico y resistente al fuego. Este es un material plástico que se puede moldear de diversas formas, también permite la fácil combinación con otros materiales para proporcionar una superficie terminada [1]. Entonces se puede decir que es un material compuesto por una mezcla homogénea, y en ciertos casos se le agregan aditivos químicos o adiciones de minerales.

Un hormigón durable conservará su forma, calidad y funcionalidad originales al estar expuesto a su ambiente [4].

El hormigón posee características que lo hacen el material más usado en la industria de la construcción, dada su versatilidad, y resistencia [5].

Dado que el hormigón pigmentado está cumpliendo un rol fundamental en la industria de la construcción en especial para el área de la arquitectura, se desea aportar con una investigación relacionada con esta área, el uso del hormigón pigmentado conlleva varios beneficios que son considerados al momento de su elección, como por ejemplo la resistencia del color en el tiempo.

Actualmente el hormigón se utiliza solo de color gris en los muelles de las zonas costeras debido a que no se ha determinado como se manifiestan las propiedades al agregar un pigmento ante la migración de cloruro, es por ello que en este informe se determinara cómo se comporta el hormigón con pigmento respecto a la migración de cloruro, entre otras propiedades físicas realizando una comparación con el hormigón tradicional.

La utilización de los colores en el mobiliario urbano, en los pavimentos y en los elementos estructurales se consigue un entorno más agradable y humano, de acuerdo con las exigencias estéticas de la sociedad [7].

Existe evidencia de obras de hormigón con pigmento que han mantenido sus colores durante años, aunque también se registran experiencias en las que la exposición a determinados ambientes no ha sido óptima [8], por otro lado no existe decoloración ni alteración del tono de la fachada [9].

En casos excepcionales los hormigones coloreados pueden producir manchas por escurrimiento, oxidación y eflorescencia. [10]. Existen trabajos en los cuales se ha utilizado hormigones con cemento blanco y estudiado algunas aplicaciones en hormigones coloreados [11; 12].

Según estudios, realizados en el extranjero, a hormigones con pigmentos se ha comprobado que dichos pigmentos no influyen negativamente en las propiedades del hormigón, en ningún caso provoca disminución en el asentamiento de cono, por ello no disminuye la resistencia mecánica [13]. Por otra parte, estudios realizados en Chile revelan que la adición del pigmento a hormigones provoca una disminución menor de la resistencia mecánica.

Es por ello que la necesidad surge de proponer hormigones coloreados en las costas chilenas y verificar que dicho agregado no afecte a su calidad.

Históricamente se han obtenido pigmentos de diversas fuentes naturales, ya sean vegetales, animales o minerales, hasta la llegada de la revolución industrial, y la obtención de materiales colorantes sintéticos [14].

Los pigmentos y colorantes, se definen como aquellos materiales de origen orgánico o inorgánico, que poseen la propiedad de absorber y esparcir de forma selectiva la luz incidente, produciendo la reflexión de los colores complementarios. [15].

Son materiales híbridos compuestos por un colorante organico catiónico y un sustrato inorgánico actúan en calidad de adsorbato y anfitrión, respectivamente [16]. Los pigmentos usados para agregar en el hormigón deben ser insolubles, tanto en el agua como en los agregados, ser inertes químicamente con respecto al cemento, a los agregados y a los aditivos [18].

Actualmente uno de los usos particulares del hormigón con pigmento es en el uso de estructuras de edificios o fachadas coloreadas, el color obtenido dependerá de los porcentajes a utilizar en la mezcla y de la calidad de los mismos.

La diferencia a pintar simplemente el hormigón es que la pintura convencional dura mucho menos que un hormigón pigmentado, por lo cual comienza el deterioro como máximo en 5 años, mientras que el hormigón pigmentado puede durar hasta 20 años sin decolorarse.

La pintura debido a la humedad dura poco tiempo y se debe volver a pintar, lo que acarrea tener gastos en pintura y mano de obra, por ello una solución óptima es el hormigón con pigmento de color, ya que el precio es un poco más elevado pero perdura por mucho más tiempo lo que permite un ahorro a largo plazo.

La revisión de los diversos estudios realizados a lo largo de la literatura nos muestra un aparente consenso respecto de las medidas usadas en pigmentos normales, aunque no es concluyente en cifras exactas, también nos muestra un comportamiento diferido tanto en el extranjero como en Chile, debido a que el hormigón tiene diferentes características.

En las investigaciones recientes se ha analizado el hormigón convencional en los muelles de las zonas costeras sin agregado de pigmento, y por otro lado también se ha estudiado el hormigón con la adición del pigmento en lugares lejanos a la costa, es por ello que se desea aportar con una investigación que detalle si la adición de pigmento al hormigón es factible dentro del hormigón utilizado en los muelles de las zonas costeras, ver cómo se comporta la mezcla frente a la migración de ión-cloruro entre otros factores.

El hormigón pigmentado requiere poca mantención ya que solo se debe lavar el recubrimiento y estéticamente tiene un valor agregado.

Las ventajas del uso del hormigón con pigmento son innumerables. Dentro de las más importantes destaca la permanencia de los colores en el tiempo, ya que los pigmentos son químicamente estables y no cambian significativamente su tono bajo exposiciones ambientales normales, según estudios internacionales.

La evidencia de la permanencia del color en el tiempo en los hormigones pigmentados es aproximadamente de 20 años. La gran cantidad de aplicaciones junto con la versatilidad de las formas y texturas aplicables a la superficie de hormigón coloreado, hace de este producto una gran opción comercial.

Respecto del ataque de cloruro al hormigón puede provenir de tres procesos diferentes los cuales son difusión, presión hidráulica y absorción por capilaridad, esta última se puede dar por el uso de sales de deshielo, exposición a ambientes marinos, presencia de cloruros en sustancias químicas que puedan atacar al hormigón, entre otros [20, 21, 22].

Si una solución que contiene iones se pone en contacto con una superficie de hormigón seca, se producirá la penetración de los iones al ser absorbidos, debido a una succión capilar. Si bien este mecanismo es muy común, los iones solo penetrarán superficialmente en el hormigón, y no afectará de forma directa en el proceso de corrosión. Sin embargo, este

mecanismo genera una disminución en la distancia que tienen que recorrer los iones por difusión para alcanzar la armadura [6].

El deterioro más común en una estructura de hormigón armado no es debido a un ataque químico al hormigón mismo, sino al otro componente que lo conforma, el acero de la armadura. Esta armadura está protegida por el hormigón que la rodea, que le proporciona la alcalinidad necesaria para evitar la corrosión. Sin embargo, en determinadas condiciones, tales como el ambiente marino o la acción de sales de deshielo, los cloruros pueden penetrar en el hormigón hasta la armadura. Con la presencia del oxígeno, además de la suficiente cantidad de iones cloruros disueltos en el agua de los poros del hormigón, se puede instigar la corrosión de la armadura, incluso en condiciones de alcalinidad alta.

La movilidad de los iones cloruro dentro del hormigón está relacionada con su permeabilidad, por ello algunos factores importantes a tener en cuenta son: la relación agua/cemento, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado [23, 24, 25]. La presencia de adicciones (puzolánicas y siderúrgicas) modifican la porosidad y reducen la permeabilidad, mejorando igualmente la resistencia a la penetración de los cloruros en el hormigón [26].

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

Surge así la necesidad de implementar nuevas tecnologías para un ambiente marino, aportando con hormigones coloreados en los muelles de las zonas costeras verificando su respectiva calidad.

En los muelles de las zonas costeras se utiliza hormigón convencional previamente estudiado mediante la norma ASTM C1202, pero no se ha estudiado cómo se comporta un hormigón con agregado de pigmento inorgánico en el mismo contexto.

Respecto las propiedades mecánicas estas se han estudiado en muestras de hormigón con pigmento demostrando un resultado aceptable dentro de los parámetros. En este ensayo se utilizará pigmento inorgánico constituido de óxido de hierro el cual tiene un estudio de propiedad mecánica a la compresión estudiada, la cual se realizó en la tesis "Influencia de la adición de pigmentos colorantes en la durabilidad del hormigón" la cual realizada por Jeanette M. Núñez Allendes de la Universidad de Valparaíso. Por lo cual es necesario el estudio de ensayos a la flexo-tracción en dicho hormigón con agregado de pigmento para verificar sus propiedades mecánicas.

Se desea aportar información completa del comportamiento sobre el hormigón con pigmento inorgánico frente a la migración del ión de cloruro y entregar una alternativa constructiva en los muelles de las zonas costeras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con pigmento frente a la migración del ión de cloruro.

1.3.2 Objetivos Específicos:

Evaluar el cambio de color en el tiempo ante la migración de cloruro en las dosis utilizadas.

Determinar la resistencia eléctrica del hormigón con pigmento ante la migración de cloruro.

Evaluar la dosis adecuada de pigmento para su mejor rendimiento en cada una de las propiedades estudiadas.

1.4 Hipótesis

“La incorporación de pigmento inorgánico en el hormigón, es una alternativa aceptable dentro de las repercusiones de la migración de ión-cloruro, manteniendo las condiciones físico-mecánicas”.

1.5 Alcances

Los materiales para desarrollar el hormigón con pigmento serán adquiridos en la región de Valparaíso, Chile, con excepción del pigmento el cual se utilizará de la firma Bayer Chile, que son producidos en la planta de Brasil pero importados por la empresa Iberica Industrial.

La elaboración del hormigón estará regida por la NCh 170 y se utilizará cemento portland puzolánico de grado corriente nacional.

Se utilizarán cantidades del 2%, 3%, 4 % y 5% de pigmento por kilo de mezcla, dosis limites recomendadas por Castro (2005), Leveque y Oyarzun (1994).

El estudio considera la utilización de pigmentos de óxido de hierro de color rojo y amarillo.

No se consideran los ensayos de resistencia a la compresión, grado de saturación y ensayos sobre la acción agresiva dentro de investigación.

Marco teórico

2.1 Hormigón

El hormigón es un producto resultante de la mezcla aglomerante, arena, grava, áridos y agua, eventualmente se le pueden agregar aditivos químicos y adiciones que le otorguen características especiales [8]. Entonces se puede decir que es un material compuesto por una mezcla homogénea y los aditivos pueden ser de origen químico o mineral.

2.1.1 Hormigón coloreado

El color de los morteros y hormigones dependen de los áridos y del cemento que los componen. Sin embargo si es que se desea optar por una tonalidad diferente a la habitual (gris) se le agregan pigmentos.

El hormigón coloreado es una mezcla que se le ha agregado un agente colorante, para su fabricación no se requieren herramientas o habilidades especiales, solo son necesarias buenas técnicas de elaboración y puesta en obra, actualmente se utiliza en variados proyectos de edificación.

2.2 Pigmentos:

2.2.1 Pigmento colorante

Los pigmentos colorantes son polvos compuestos por partículas finas, generalmente constituidos por óxidos metálicos. Su granulometría suele estar comprendida entre el 0,01 y 10 μm . La forma y tamaño de su partícula le confieren unas propiedades ópticas tales que la luz que reflejan es muy intensa. Por supuesto si cambiamos el iluminante, es decir la longitud de onda de la luz, las propiedades ópticas se modificarán. Por tanto las sustancias que añadimos a un producto cementoso confiriéndole a este color, son necesariamente pigmentos [17]

2.2.2 Pigmentos naturales

Los pigmentos naturales también llamados orgánicos, son productos de cantera o mina. Se tratan para eliminar parte de las impurezas y se muelen finamente, o simplemente se muelen sin tratamiento previo. Son conocidos como óxidos naturales, tierras colorantes o simplemente ocre. En su composición química posee enlaces carbono.

2.2.3 Pigmentos sintéticos

Los pigmentos sintéticos también llamados inorgánicos, son aquellos que se obtienen después de determinadas reacciones químicas partiendo de una materia prima inicial. Otorgan ventaja de alta pureza, ausencia de sales solubles, elevado brillo y alto poder de coloración debido a su pequeño tamaño de partículas. Además ofrece una mayor gama de coloraciones.

2.2.4 Características físicas de los pigmentos colorantes

La forma y tamaño de las partículas del pigmento colorante tiene una importante incidencia en el matiz del color y la uniformidad que puede presentar en el elemento. Las partículas de los pigmentos son diez veces más finas que las del cemento. Los óxidos Minerales naturales o sintéticos se muelen con la siguiente finura:

Óxido mineral: 100% molido bajo tamiz 0.080 mm

Óxido sintético: 100% molido bajo tamiz 0.045 mm Antecedentes tomados a partir de fotos microscópicas revelan que las partículas de los pigmentos de óxido de hierro amarillo tienen forma de aguja, y las partículas de óxido de hierro negro y rojo, así como las del dióxido de titanio, óxido de cromo y aluminato de cobalto tienen una forma cúbica a esférica.

2.2.5 Pigmentos colorantes empleados actualmente

Si bien, en algunas ocasiones se utilizan los pigmentos orgánicos, estos no son estables, ya sea por su mayor reactividad, por el reducido tamaño de su partícula, y la poca tolerancia a la humedad o temperaturas bajas a las cuales se expone en la intemperie, que es el principal lugar donde se aplica color a los morteros y hormigones. Serán por tanto los pigmentos inorgánicos los pigmentos más utilizados hoy en día, ya que estos mantienen la estabilidad en los morteros y hormigones, además no tienen influencia nociva en la mezcla [90].

2.2.6 Composición química

Los pigmentos más importantes según el color aportado son los obtenidos de los óxidos de hierro recogidos en la tabla 2.1, cuyas composiciones y estructuras corresponden a los minerales: Hematita, Magnetita y Goetita [19].

En la composición química de los pigmentos intervienen componentes similares a los presentes en la composición del cemento, como en el caso particular de los pigmentos de óxido de hierro, presentes en 4% en los componentes del cemento. Esto indica que la composición química de los pigmentos no debería afectar en las propiedades del hormigón.[3].

Tabla 2.1 propiedades pigmentos

Color	Formula	Denominación química	Nombre común
Rojo	Fe ₂ O ₃	Óxido Férrico	Óxido de Hierro Rojo
Amarillo	Fe(OH) ₂	Hidróxido Ferroso	Óxido de Hierro Amarillo

Fuente: Iberica Industrial, 2019.

2.2.7 Dosis de pigmento

El pigmento se agrega en un porcentaje del peso seco del cemento. Mientras mayor es la cantidad que se agrega a la mezcla, mayor es la intensidad del color. En todos los casos va a existir un punto de saturación, dentro de un rango de 5 a 8 % en base al peso seco del cemento. Se recomienda una dosificación entre un 2 y 5 % [2].

Según Leveque y Oyarzún (1994) la dosis de pigmento óptima varía de 1 a 3% del peso del cemento y no mayor a 5%, en tanto al superar este porcentaje se pueden ver afectada la resistencia mecánica al producir mayor requerimiento de agua. Cuando se prepara una mezcla con cantidades crecientes de pigmentas, la intensidad del color aumenta inicialmente de forma lineal hasta llegar a un punto denominado saturación, a partir del cual el aumento de tonalidad por unidad de colorante adicionado es prácticamente nulo. Al emplear cantidades de pigmentos superiores al punto de saturación no se obtiene intensificación cromática.

Tabla 2.2- Propiedades base de pigmentos constituidos de oxido de hierro.

Oxido componente	Abreviatura	%	Media (%)
Oxido de calcio	CaO	59 - 67	64
Sílice	SiO ₂	17 - 25	21
Oxido de aluminio	Al ₂ O ₃	5-9	6,5
Oxido férrico	Fe ₂ O ₃	1 - 5	2,5
Oxido de magnesio	MgO	1 - 4	2,5
Oxido ácido sulfúrico	SO ₃	1 - 3	2,1
Perdidas por calcinación		0,6 a 2	1,3
Residuo insoluble		0,008 a 0,02	0,01

Fuente: Iberica Industrial, 2019.

2.3 Medición de color

La percepción de los colores es una impresión sensorial, como resultado de la luz reflejada en un determinado objeto, su medida solo enumera sus propiedades físicas. La base de la métrica de los colores se basa en los resultados empíricos obtenidos a través del estudio de la visión de los mismos sobre un gran número de objetos.

Cuando se habla de medida de colores, se entiende por la determinación de la curva espectral de reflexión, sobre todo en razón de que existe una relación simple entre reflexión y concentración de pigmentos.

El espectro de luz cubre longitudes de ondas muy amplias, de las que el ojo detecta una pequeña zona localizada entre 380 nm y 780 nm, denominada zona visible del espectro. En función de la longitud de onda, se estimula de forma diferente la retina y establece el espectro del color.

Cada color puede estar suficientemente descrito por tres colores o nociones, son a menudo descritos por su tono, croma y luminosidad. El tono mide la composición cromática de la luz reflejada por el objeto que llega al observador, determinando la calidad del estilo luminoso que es juzgado como rojo, verde o azul. La croma es un atributo de la calidad del color, hace mención a la profundidad, viveza, pureza y saturación de color. Determina el grado de separación entre el color puro definido por el tono y el color gris o cromático. La luminosidad cuantifica la cantidad de estímulo luminoso que recibe el observador, determinando el grado de luminosidad, brillo, o la oscuridad de un color. Se mide a través de una escala que va desde el negro puro o cero hasta el blanco puro llamado cien.

Debido al carácter subjetivo de la sensación cromática, la descripción objetiva de un color resulta compleja, puesto que representa un atributo psicofísico de los objetos. Estos absorben toda o parte de la luz, reflejando el resto. Las sensaciones observadas entre cada individuo suelen ser distintas entre sí, como consecuencia de la diferencia de percepción visual existente entre ellos. Por esta razón es conveniente trabajar a través de composiciones espectrales desarrolladas en función de los atributos de color.

2.3.1 Modelos colorimétricos

Para mejorar la representación del color de los objetos, la comisión internacional de la iluminación (CIE) desarrollo en 1976 modelos de color. Estos representan de manera gráfica el color, teniendo como base que es posible la reproducción de cualquier color que distinga el ojo a través de la mezcla de tres colores fundamentales como el rojo, verde y azul.

Entre estos modelos colorimétricos los más conocidos se encuentran los modelos CIELAB y el modelo CIELCH. Siendo el primero el empleado en la gran mayoría de las normativas de análisis de color.

2.3.2 Modelo CIELAB

CIE $L^*a^*b^*$ es el modelo de color más completo, se utiliza habitualmente para describir todos los colores que puede ver el ojo humano. De hecho, la CIE, especifico dos espacios de color, un espacio es para colores emitidos y otro espacio para los colores colocados en una superficie, este último se conoce como espacio de color CIELAB. (Valero, 2012)

Los asteriscos (*) que siguen a cada letra forman parte del nombre, ya que representan los tres parámetros del modelo (L^*,a^*,b^*).

2.3.3 Coordenadas cromáticas

Las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* , son representadas por un diagrama cromático, en el que el eje $-a^*$, $+a^*$, representan las variaciones de color desde el verde al rojo, mientras que el eje $-b^*$, $+b^*$, representa la variación de azul al amarillo, por otro lado, L^* corresponde a la luminosidad.

El centro del diagrama es cromático y según nos desplazamos hacia la periferia del diagrama la saturación del color es mayor. Al utilizar las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* se puede comparar el color de los objetos y cuantificar sus diferencias, lo que es difícil establecer con el ojo humano, sobre todo cuando se trata de tonos muy similares. En la escala L^* , a^* , b^* la diferencia de color se establece en función del modelo CIELAB.

2.4 Hormigones para zonas costeras

La necesidad de introducir prácticas constructivas que aseguren la obtención de estructuras de hormigón armado que tengan un buen comportamiento en ambientes adversos es y ha sido una de las mayores problemáticas en el mundo de la construcción. Hacia el año 1756, cuando John Smeaton construyó el faro de Eddystone Rock, en Inglaterra, fue la primera vez que se desarrolló un tipo especial de cemento para un ambiente marino adverso [32]. Cuando la estructura se tuvo que demoler debido a la severa erosión de la roca bajo el faro, la estructura aún mantenía su integridad estructural. Esta experiencia sirvió como base para que investigadores e instituciones alrededor del mundo comenzaran a desarrollar soluciones para mejorar la calidad de los cementos utilizados en obras marítimas.

2.4.1 Resistencia de hormigones marítimos

Los hormigones sometidos a ambientes marinos deben soportar los procesos de deterioro como ataques químicos, reacción álcali-áridos, a ciclos de hielo y deshielo, a erosión por mareas, etc. Frente a estos ataques es que la integridad de la matriz cementicia del hormigón se ve comprometida y se va destruyendo a medida que pasa el tiempo. Sin embargo, está ampliamente demostrado que la desintegración del hormigón en sí no es la principal causa de la pérdida de resistencia en una construcción de hormigón armado, sino que es la corrosión electroquímica del acero de su armadura [33]. Cuando el acero se ve afectado por la corrosión, el elemento estructural pierde la capacidad de soportar cargas de flexo tracción, generándose fallas frágiles para las cargas normales de uso. Una estructura de hormigón armado que pierde su armadura, pierde su funcionalidad estructural, y no es apta para soportar las condiciones de uso para las que fue diseñada. El año 2001, solo en los Estados Unidos, el costo de reparación de puentes debido a la corrosión de sus armaduras fue estimado en unos US\$ 8.3 billones [34], lo que ejemplifica la gran problemática generada por este proceso. La principal causa de corrosión de la armadura en los hormigones marítimos es la penetración del ión cloruro, presente en el agua de mar, hasta el nivel de la armadura.

2.5 Ataque por cloruros

El ataque por cloruros al hormigón puede provenir de dos fuentes principales, en la primera los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la mezcla del hormigón (p.e., áridos contaminados, agua de mar o contaminada, cemento y/o aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda los cloruros ingresan desde el exterior. Esta última se puede dar por el uso de sales de deshielo, exposición a ambientes marinos, presencia de cloruros en sustancias químicas que puedan atacar al hormigón, entre otros.

La penetración del ion cloruro (Cl^-) desde el exterior produce un perfil en el hormigón, caracterizado por altos contenidos de cloruros cerca a la superficie externa y una disminución de su contenido hacia el interior. Este perfil puede aproximarse por la segunda ley de Fick [12].

Donde, $C_{x,t}$ corresponde a la concentración de cloruros a una profundidad x con un tiempo t ; C_s la concentración de cloruros en la superficie en kg/m^3 ; la función de error; D_a el coeficiente de difusión aparente en $\text{cm}^2/\text{año}$ y t el tiempo de exposición. En recientes investigaciones, se presenta un método para medir el coeficiente de difusividad de cloruros partiendo de una aplicación analítica de la segunda ley de Fick en un sistema de coordenadas cilíndrico, afirma el autor que este método disminuye el tiempo de ensayo ya que es posible obtener resultados satisfactorios en tan solo un mes.

Los iones cloruros una vez penetran el hormigón se distribuyen como cloruros enlazados y cloruros libres. Los primeros corresponden a aquellos que se enlazan químicamente al reaccionar con el aluminato tricálcico (C3A) presente en la pasta para así formar cloro aluminatos cálcicos, compuesto conocido como “Sal de Friedel”, que a diferencia de la etringita, no resulta ser expansiva. En este sentido es recomendable la utilización de cementos con alto contenido de C3A para hormigones expuestos a cloruros. Por el contrario, los cloruros libres se difunden hasta alcanzar el acero de refuerzo, donde se acumulan hasta lograr una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de destruir la capa pasiva del acero e iniciar el proceso corrosivo. Cabe anotar que entre los factores que más influyen el contenido crítico de cloruros están la calidad de la interface hormigón/acero y el potencial electroquímico del acero de refuerzo, el cual está relacionado con la cantidad de oxígeno que puede alcanzar la superficie del acero. Díaz-Benito et al, presentan la técnica de microscopía de fuerza atómica (AFM) como una excelente alternativa para observar el comportamiento del acero frente a la corrosión; los investigadores realizan el estudio en medios que simulan los contenidos de los poros del hormigón y mediante el análisis de las imágenes y la evolución de la rugosidad de la superficie del acero con el tiempo de exposición confirman la tendencia del acero a pasivarse en sus inicios y posteriormente la destrucción de la capa pasiva debido al ataque por cloruros.

La movilidad de los iones cloruro dentro del hormigón está relacionada con su permeabilidad, por ello algunos factores importantes a tener en cuenta son: la relación agua/cemento, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado.

Tabla 2.1- Daño químico en hormigón.

Fuente: <https://www.cotecno.cl>, 2019.

2.5.1 Corrosión por cloruros

Los cloruros inducen una destrucción local de la capa pasiva del acero, ocasionando un ataque localizado que se transforma frecuentemente en picaduras. Además, los iones cloruro actúan como catalizador dentro de la picadura y aceleran la corrosión del hierro en la picadura anódicamente activa.

Iniciada la corrosión por picadura, el pH se reduce dentro de la picadura y se produce una corrosión activa por picadura localmente en la zona de Fe^{2+}/Fe^{3+} . La corrosión del acero, depende de la disponibilidad de oxígeno en la estructura de hormigón. Por ejemplo, en un hormigón sumergido, hay poca disponibilidad de oxígeno y por lo tanto el potencial del acero cae a la zona de alta resistencia a la corrosión por cloruros.

2.5.2 Mecanismos de transporte de ión Cloruro

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

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

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

Otra forma en que exista transporte de iones al interior del concreto es el mecanismo de absorción. Esto se produce cuando una estructura está sometida a ciclos de humedad y secado debido a las condiciones ambientales. Si una solución que contiene iones se pone en contacto con una superficie de hormigón seca, se producirá la penetración de los iones al ser absorbidos, debido a una succión capilar. Si bien este mecanismo es muy común, los iones solo penetrarán superficialmente en el hormigón, y no afectará de forma directa en el proceso de corrosión. Sin embargo, este mecanismo genera una disminución en la distancia que tienen que recorrer los iones por difusión para alcanzar la armadura [35].

2.5.3 Difusión del ión cloruro en hormigones

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

Ecuación 1: Ley de Fick caso unidimensional

Donde J es el flujo de los iones de cloruro, D_{eff} es el coeficiente de difusión efectivo, c es la concentración de ión cloruro y x es la variable de posición del frente de avance.

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

Cada sustancia posee un coeficiente de difusión, por lo que la interacción del coeficiente de la solución y del hormigón determina un coeficiente de difusión efectivo. Esta ecuación es válida para condiciones estacionarias, es decir, cuando no hay cambios en la concentración de ión cloruro en el tiempo. Sin embargo, esto puede utilizarse para obtener la ecuación para condiciones no estacionarias, que se expresa como la Segunda Ley de Fick:

Ecuación 2: Ley de Fick para flujo bidimensional no estacionario

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

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

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

2.5.4 Acción de los cloruros

Los cloruros pueden provocar roturas localizadas en puntos debilitados de la capa protectora del acero-hormigón. Un punto débil se puede generar debido a una caída local del pH, una fisura del hormigón, un defecto de la superficie del acero o un hueco de aire por mala compactación. El ión Cl^- ingresa en la capa de óxido, a través de los poros o defectos con mayor facilidad que otros iones, o puede dispersar en forma coloidal la película de óxido e incrementar su permeabilidad. De este modo, se forman pequeños ánodos de metal activo rodeados por grandes áreas catódicas de metal pasivo.

La creación de ánodos locales en los puntos débiles origina diferencias de potencial que atraen cloruros. Al eliminar oxígeno en el comienzo de la picadura, la superficie de acero situada bajo los productos sólidos de la corrosión se acidifica. La formación de complejos de cloro, podría consumir los iones de hierro libres presentes en la solución, rompiendo el equilibrio de la capa pasiva del acero y provocando así la disolución del óxido de hierro.

Los iones cloruros asimismo aumenta la solubilidad de la capa pasiva, acelerando así la disolución. La presencia de oxígeno en el hormigón aumenta el efecto catalítico de los cloruros, debido a la descomposición de los complejos de cloro, al difundirse la picadura de corrosión pobre en oxígeno, al hormigón rico en oxígeno. El resultado es una acidificación mayor y una liberación de iones de cloruro. Ambos efectos aceleran la corrosión. Con un valor bajo de pH, la disolución ácida del acero puede ser mucho más rápida que la corrosión electroquímica.

Los iones hidróxilo actúan en contra de este proceso reparando la capa dañada, pero la rotura de la capa es irreversible cuando los iones de cloruro son superiores a los iones de hidróxilo, y entonces se produce la corrosión por picadura.

2.5.5 La corrosión del acero en el hormigón

Las estructuras de hormigón armado pueden sufrir un deterioro a través de la corrosión de sus armaduras. Los productos de corrosión que se generan, van ocupando los espacios vacíos de la estructura de poros del hormigón. Una vez que los poros del hormigón adyacente a la armadura se van expandiendo, van originando presiones sobre el hormigón, causando generalmente, fisuración longitudinal del recubrimiento. Las fisuras paralelas a las armaduras, crean una vía más rápida para los agentes agresivos, acelerando así el proceso de deterioro. El hormigón ejerce una doble acción protectora sobre la armadura. Por un lado el recubrimiento es una barrera física que aísla el acero del exterior. Por otro lado, la pasivación del acero en condiciones uniformes de servicio, a partir de una elevada alcalinidad (PH 12-13) de la fase acuosa define una barrera química que causa la formación de una capa microscópica y transparente de óxidos que mantiene inalterado el acero, por tiempo indefinido. En los pilares y las columnas situadas en el agua de mar, la zona totalmente sumergida la armadura se puede corroer sin ninguna señal externa de daño en el recubrimiento. En esta zona sumergida, el ión cloruro penetra en el hormigón por difusión. Mientras que la zona situada a lo alto de la columna permanece parcialmente seca. Justo por encima de la zona de las mareas, hay una acumulación de iones de cloro, procedente de la evaporación del agua de mar. La experiencia muestra un daño por corrosión severa y temprana en esta zona.

2.5.6 Factores que inciden en la tasa de penetración de cloruros en el hormigón

La tasa de penetración de cloruros dentro del hormigón depende de su estructura de poros, que se ve afectada por los materiales usados en la elaboración de la pasta, las prácticas constructivas, la edad de la muestra, relación agua cemento, etc.

De acuerdo a estudios, los hormigones fabricados con cementos adicionados con escoria o ceniza, poseen una permeabilidad mucho menor que aquellos en que se usa cemento portland puro[36]. En general, se tiene una muy fuerte relación entre resistividad eléctrica y la permeabilidad a cloruros del hormigón.

Por otro lado, la relación agua/cemento utilizada en la elaboración de la pasta de hormigón es uno de los factores determinantes de su comportamiento ante ambientes expuestos a cloruros. Mientras menor sea la cantidad de agua utilizada, menor será la permeabilidad a cloruros. Es más, para una menor relación agua/cemento, aumenta la efectividad de las adiciones como cenizas o escoria en el proceso de otorgarle mayor resistencia a la penetración de cloruros al hormigón. Esto se debe a que la estructura de poros del hormigón se hace más fina y discontinua.

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

Otro factor que afecta el comportamiento de un hormigón es la temperatura de curado. Para edades tempranas, un espécimen curado a altas temperaturas poseerá una mayor resistencia a la penetración de cloruros que un espécimen similar pero el curado a temperatura ambiente. Sin embargo, a edades tardías, en que el proceso de hidratación se ha desarrollado de manera más completa, un hormigón curado a temperatura ambiente poseerá un menor coeficiente de difusión que otro curado a alta temperatura [37,38] Esto se debe a que el curado a alta temperatura produce una mayor cantidad de microfisuras en la matriz del concreto, por lo que aumenta su permeabilidad.

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

2.6 Solicitud ambiental marina

La vida útil de una estructura respecto a la degradación de los materiales puede ser estimada mediante la aplicación del modelo propuesto por Tuutti [39]. La vida útil estipulada durante el proyecto de la estructura es el período en el cual deben cumplirse los requerimientos de servicio con un nivel superior al mínimo aceptable respecto a seguridad, confort y estética. Para ello deben considerarse las condiciones de exposición a las que la estructura va a estar sometida. En el caso de ambiente marino, en Argentina se estipulan límites restrictivos para el hormigón de recubrimiento de estructuras de hormigón armado y/o pretensado.

Este criterio contempla una vida útil estipulada de 50 años, siempre que se controle la fisuración, se respeten los recubrimientos mínimos y se coloque, compacte y cure al hormigón adecuadamente. Los valores para hormigón pretensado y hormigón armado con curado normal son los mismos introducidos en la guía ACI 201 en 1977 [40] y actualmente considerados por el código ACI 318 [41]. Este enfoque resulta ampliamente aceptable, pero tiene ciertas limitaciones respecto a la exactitud del período de vida proyectado [43], debido a que con la clasificación general de ambientes y parámetros prescriptivos no es posible considerar a todas las variables intervinientes. Algunas de estas variables, entre las referidas al período requerido para la despasivación de las armaduras, se describen en capítulos posteriores. Los parámetros son definidos cualitativamente, y para el cálculo de la vida útil es necesaria su cuantificación [42].

El deterioro de una estructura de hormigón armado debido a la corrosión de armaduras se manifiesta por diversos mecanismos de trascendencia creciente [39, 43]. Inicialmente las armaduras se encuentran pasivas dentro del hormigón, hasta que el proceso de corrosión se inicia con la despasivación de las mismas, perdiéndose la protección química frente a la corrosión. Existen dos factores singulares de la corrosión de las armaduras en el hormigón.

El primero es la formación de depósitos en la interface acero/hormigón debido a la precipitación de los mismos por el elevado pH. El segundo aspecto es que el óxido no es denso, adquiriendo un gran volumen.

Comenzado el deterioro a una velocidad apreciable, un volumen suficiente de productos de corrosión conduce a la fisuración del hormigón de recubrimiento, perdiéndose la protección física frente al exterior. Si la fisuración avanza sin control, comienza el desprendimiento del recubrimiento y las armaduras se ven más expuestas al medio.

Finalmente, ya sea por la pérdida de adherencia entre acero y hormigón o por la pérdida de sección de las armaduras, se produce el colapso de la estructura. Como referencia, generalmente se concibe como límite mínimo aceptable del nivel de comportamiento (condición mínima para mantener la estructura en servicio), a aquel que produce una fisuración generalizada [44, 45].

Se establecen entonces dos períodos de desarrollo del proceso comprendidos dentro de la vida útil [39], uno de iniciación y otro de propagación. El período de iniciación es el tiempo de incubación de las condiciones necesarias para el comienzo de la degradación. El período de propagación es el tiempo transcurrido entre el inicio del proceso y el momento en el cual el grado de deterioro de la estructura es tal que no cumple con las condiciones de servicio mínimas requeridas. En general, se concibe como período de iniciación a aquel que se requiere para la despasivación de las armaduras, mientras que los mecanismos de fisuración y desprendimiento del recubrimiento se conciben dentro del período de propagación [39, 46,43].

Los factores que influyen en la duración del período de iniciación pueden ser internos o externos. Los factores internos se relacionan principalmente con las características del hormigón de recubrimiento. Entre ellos, los de mayor importancia son los que determinan la resistencia del material al transporte de materia por su estructura: porosidad de la matriz cementícea [47,48] (determinada por la relación a/c y el grado de hidratación), contenido y tipo de cemento [47,49], calidad de la interface matriz agregado [50], y porosidad de los agregados [51]. Los factores externos están determinados por la agresividad del medio [52, 53, 54, 55,56], caracterizada por temperatura media y humedad relativa, condición de los vientos y precipitaciones, distancia y altura respecto al nivel del mar (en el caso de ambiente marino). También, debe considerarse que si existen películas protectoras o revestimientos sobre la estructura de hormigón armado, el grado de exposición disminuye al no haber un contacto directo con el medio [57].

El ambiente con cloruro es considerado como severo desde el punto de vista de la resistencia del hormigón armado, debido a la interacción de las sales presentes en agua y atmósfera circundantes con el hormigón y con las armaduras. El grado de exposición al medio con cloruro puede ser variado, y es posible hacer una clasificación de acuerdo al tipo de medio.

En un análisis más extenso, las condiciones climáticas pueden ser estudiadas en distintos niveles de profundidad, definiéndose condiciones macroclimáticas, mesoclimáticas y microclimáticas. Las condiciones macroclimáticas son características del territorio en el que se implanta la estructura, incluye a la humedad relativa, la temperatura, las precipitaciones y a los vientos.

Las mesoclimáticas son propias de la estructura: altura respecto al nivel del mar, distancia a la costa. Finalmente, las microclimáticas se definen específicamente para las superficies de cada elemento estructural, quedando establecidas de acuerdo a la frontalidad de vientos, radiación solar, la orientación de la superficie, su verticalidad y planicidad [58, 59,60]. Las condiciones microclimáticas afectan distintamente la resistencia de cada elemento en particular de una estructura [57].

En ambiente marino, el ingreso de cloruro produce eventualmente la despasivación localizada de las armaduras de acero (picado). Esto sucede cuando se alcanza una concentración umbral de este anión en la solución de poro en contacto con la película pasiva. Si los materiales constituyentes del hormigón no tienen un contenido de cloruro suficiente para alcanzar este límite, el picado se iniciará recién cuando el cloruro que ingresa desde el medio externo llegue a las armaduras en cantidad suficiente.

Por otra parte la velocidad a la que se deposita el cloruro depende de diversos factores ambientales. La velocidad de depósito de cloruro, en relación a la ubicación del mar, depende de la velocidad de fricción del viento, distancia y elevación respecto a la línea de costa. La velocidad del viento resulta uno de los principales factores a tener en cuenta respecto a la agresividad del clima marino [61].

La corrosión de armaduras debido al cloruro se presenta como de gran riesgo antes de que se desarrolle en forma generalizada, sin que se haya alcanzado el desarrollo de fisuras por corrosión. En procesos de picado el volumen de productos de corrosión no es grande, y la fisuración del recubrimiento no se da en un período inmediato, sino que se requiere un contenido aún mayor de cloruro. De esta forma, la afectación local avanzada puede disminuir sensiblemente la sección resistente de las armaduras sin síntomas externos. Esto resulta especialmente peligroso en el caso del hormigón pretensado [62,63].

Con las armaduras inicialmente pasivas y dadas las condiciones climáticas y ambientales de exposición, el tiempo requerido para alcanzar el contenido límite de cloruro en la proximidad de las armaduras (período de iniciación) depende en gran medida de la resistencia al ingreso de cloruro del hormigón de recubrimiento. Lo habitual es definir a esta resistencia de acuerdo al denominado coeficiente de difusión aparente de cloruro [47], que establece la mayor o menor velocidad con la que ingresan los iones.

Pocas veces el análisis implica el emplazamiento y los aspectos geométricos de la estructura [58, 59], siendo que éstos determinan la afectación de la estructura y de cada elemento estructural en particular de acuerdo a su entorno.

2.7 Factores incidentes en el hormigón pigmentado

2.7.1 Resistencia a compresión

La razón a/c es la propiedad más importante del hormigón. Su relación con la resistencia a compresión ha sido ampliamente probada y explicada. Esta relación directa es la más desarrollada en el campo de la tecnología del hormigón. De allí es que surge una base firme para la utilización de la resistencia a compresión como parámetro de evaluación para prácticamente cualquier propiedad del hormigón, incluyendo a la resistencia a la penetración de cloruro. De este modo, se ha determinado una relación simple entre la resistencia a compresión a la edad de 28 días y la difusividad del hormigón [64]. La difusividad en el hormigón saturado decrece consistentemente con el aumento de la resistencia a compresión. Es esperable que esta relación cambie cuantitativa-mente en tanto se modifique el contenido de aire incorporado. También surgirán diferencias a partir del tipo de cemento utilizado, y prácticas de aceleración de la ganancia de resistencia (tratamiento de curado, aditivos).

La practicidad, el costo y la universalidad del ensayo de resistencia a compresión son factores determinantes para su uso como parámetro de control. Esto permite que sea muy fácil de implementar e interpretar.

Cabe destacar, no se considera el ensayo de resistencia a la compresión dentro de la investigación, debido a que este estudio se encuentra ampliamente demostrado sus buenos resultados en el hormigón con el agregado de pigmento en las dosis planteadas.

2.7.2 Succión capilar

La absorción de agua por capilaridad constituye uno de los mecanismos de transporte a través del cual puede producirse el ingreso de los iones cloruro en estructuras ubicadas en ambiente marino. Dicho mecanismo prevalece en el hormigón no saturado, mientras que el ingreso en hormigón saturado es definido solamente por la difusión de cloruro (siempre que no exista un gradiente eléctrico relevante). Algunos estudios relacionan la succión capilar y la difusión de cloruro en hormigón saturado, obteniéndose buenas correlaciones [65,66]. Sin embargo, estas relaciones dependen de la metodología adoptada para su evaluación. Se ha observado que la evaluación del movimiento de agua por capilaridad es muy sensible a las variaciones en las condiciones de ensayo y en las proporciones de constituyentes del hormigón estudiado [75].

Un dato a destacar es que los hormigones de estos estudios fueron elaborados sin incorporación de aditivos químicos. La correspondencia entre relación a/mc y velocidad de succión capilar será seguramente distinta en hormigones elaborados con aditivos reductores de agua de mezclado, que permiten menor contenido de agua para un mismo nivel de trabajabilidad. En ese caso, se estima que la velocidad de succión capilar podría disminuir para una misma relación a/c .

Si bien el efecto de la absorción sobre el ingreso de cloruro resulta significativo, en una estructura expuesta en ambiente marino será de principal interés la frecuencia de ciclos de mojado y secado. Esto resulta una diferenciación importante respecto a las condiciones microclimáticas a las que cada superficie de la estructura está expuesta.

2.7.3 Permeabilidad

En el caso de estructuras sujetas a una diferencia de presiones hidrostáticas, la permeabilidad es el parámetro que mejor representa el ingreso de sustancias agresivas desde el medio externo, como el caso del transporte de cloruro disuelto en el agua de mar. Se ha observado una mayor resistencia a la penetración de cloruro en el caso de hormigones de baja permeabilidad [67], como consecuencia de la baja conectividad de la estructura de poro.

En Argentina se emplea el ensayo de penetración de agua a presión [68] como índice de evaluación de la calidad del hormigón respecto a su permeabilidad, estando además especificado en el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201-2005 para aquellas estructuras que requieren una adecuada impermeabilidad y cuya función es la contención o retención de agua.

2.7.4 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica del hormigón de una estructura se relaciona con la estructura del hormigón de recubrimiento lo cual va de la mano con la corrosión de las armaduras, tanto en lo correspondiente al período de iniciación como al de propagación. El período de iniciación para la corrosión por cloruro está directamente relacionado con la resistividad del hormigón [69]. En el período de propagación, cuando el acero se encuentra despasivado, las zonas del recubrimiento con menor resistividad eléctrica resultan ser las zonas susceptibles de corroerse con mayor velocidad. Además, la resistividad del recubrimiento también adquiere importancia al momento de implementar un sistema electroquímico de protección de las armaduras, o de reparar una estructura afectada por corrosión.

La resistividad del hormigón se encuentra en un rango amplio, de entre 10 y 10.000 $k\Omega \cdot cm$ [70]. Esta condición permite clasificarlo como un semiconductor. La corriente eléctrica a través del hormigón es conducida por los iones disueltos en el líquido de poro [71], pudiéndose considerar a los agregados como eléctricamente inertes.

La inclusión de adiciones minerales activas, así como el grado de hidratación, que afectan a la microestructura de la matriz cementicia y la composición química del líquido de poro, influyen en la resistividad del hormigón [72]. La actividad hidráulica de las adiciones aumenta la resistencia al paso de corriente al disminuir el volumen de la fase conductiva [73]. Al utilizar adiciones minerales activas, la variación de la resistividad en el tiempo es más prolongada respecto al hormigón sin adiciones debido a la formación de compuestos tardíos de hidratación y la fijación paulatina de hidróxidos presentes en la solución.

La escoria granulada de alto horno se muestra como la adición que produce el mayor aumento de la resistividad [73,74].

2.7.5 Capacidad de retención de cloruro

La matriz cementícea posee la capacidad de inmovilizar cierta proporción del cloruro que ingresa. Esto es importante ya que es el cloruro libre el que resulta perjudicial respecto a la resistencia de las armaduras de acero dispuestas en el interior del hormigón. La capacidad de inmovilización o retención de cloruro presenta una dependencia no lineal de la concentración total, influenciada principalmente por el grado de hidratación del cemento [76] y formación tardía de productos de hidratación [77]. Así, resulta de suma importancia la edad de la muestra al momento de analizar sus características de fijación y adsorción.

Los efectos de la retención de cloruro conducen a que el balance de masa de la segunda Ley de Fick no se cumpla estrictamente. En una sección transversal, una fracción del total de cloruro ingresante quedará inmovilizada en la matriz y el resto permanecerá libre para continuar difundiendo. Por ello, sin hacer una distinción entre el cloruro libre y el fijo, la aplicación experimental de la Ecuación resulta en un coeficiente de tipo aparente (y habitualmente es reemplazado por D_{ap}) [78,79]. En este caso, el coeficiente de difusión efectivo es el resultante de la primera ley de Fick (D_s).

La relación entre cloruro fijo y libre no es permanente, ya que además de depender del contenido de cloruro fijado, también influyen el pH del medio [80] (más exactamente la cantidad de iones hidróxido libres [81]), la temperatura, la humedad relativa y la presencia de otros aniones.

Otro aspecto de relevancia es que gran parte del cloruro adsorbido y/o fijado es liberado debido a la carbonatación del hormigón [39,82]. El cloruro es desplazado de las fases alúmino ferrito (AFm) y devuelto a solución al formarse carboaluminatos.

Los modelos de ingreso de cloruro son significativamente dependientes de la relación de fijación/adsorción asumida entre cloruro libre en la solución de poro del hormigón y el cloruro retenido en los productos de hidratación [83].

En efecto, la retención de cloruro en el hormigón reduce la cantidad de cloruro libre, y su influencia sobre el inicio de la corrosión es doble [58]: 1) la velocidad del transporte iónico en el hormigón se reduce; y 2) la cantidad de cloruro libre que se acumula en la superficie del acero de refuerzo y propicia el picado es menor.

El cloruro puede ser fijado químicamente o ser adsorbido en la superficie de los productos de hidratación del cemento.

El cloruro se fija químicamente en los productos de hidratación mediante uniones químicas de mayor energía y con diferentes rangos de saturación a los de adsorción. Se debe tener en cuenta que la fijación de cloruro mediante reacciones químicas es irreversible, al contrario de la adsorción superficial.

La fijación química de cloruro está determinada principalmente por el contenido de fase alúmino ferrito (AFm) [84,85,77], mientras que la adsorción de cloruro se produce primordialmente sobre el CSH [76,77]. El contenido de AFm tiene una pequeña influencia en la inmovilización del cloruro incorporado una vez alcanzado un grado de hidratación equivalente a 48 horas de curado húmedo [86], exceptuando a los hidratos aportados tardíamente por adiciones minerales como la escoria de alto horno. Estas adiciones incrementan la capacidad de fijación de cloruro a medida que se produce la reacción puzolánica. Por lo tanto, cuando el cloruro está presente durante la hidratación del cemento, es incorporado en los hidratos.

En el fenómeno de adsorción, los elementos adsorbidos se denominan adsorbatos, y el elemento en cuya superficie se desarrolla el fenómeno se denomina sustrato. Los adsorbatos pueden formar uniones químicas o físicas con las moléculas de la superficie del sustrato. Las uniones de adsorción química no son fuertes, pero sí algo mayores que las de adsorción física. La distinción precisa entre las dos formas de adsorción no está establecida terminantemente, en general son distinguidas por la entalpía. Si la entalpía de adsorción es similar a la energía de condensación (aproximadamente 5 kcal/mol), entonces la adsorción es atribuida a fenómenos físicos [87]. El fenómeno de adsorción es previo a toda reacción química entre compuestos. Entonces, para que se produzca la fijación química de cloruro, es necesaria una adsorción previa de ellos en la superficie de los aluminatos y ferro aluminatos, aunque luego esta configuración se modifique y el cloruro sea incorporado en los productos de hidratación. El cloruro adsorbido sobre los silicatos no reacciona con estos sustratos.

2.7.6 Grado de saturación

Un aspecto en cuanto a la penetración de cloruro en exposición atmosférica es que debe tenerse en cuenta que en el hormigón parcialmente saturado sólo la fracción del volumen de poros ocupada por solución es el medio a través del cual los iones ingresan, y este contenido de solución de poro es afectado por las condiciones climáticas. Esto implica que no toda la fase de capilares participa en el proceso de ingreso de cloruro, y el contenido de líquido de poro resulta de mayor relevancia que la porosidad total.

En principio, en el hormigón saturado, la difusividad es independiente del tamaño medio de poros, y sí depende del volumen total de poros conectados del hormigón.

En realidad esto no es exacto, ya que la tortuosidad de los poros de gel hace que el transporte de cloruro por esta fase sea ínfimo. Sin embargo, esta dependencia surge con mayor relevancia en el hormigón parcialmente saturado, ya que la condensación intersticial con una humedad relativa creciente comenzará en los poros más finos y continuará en los poros de mayor tamaño.

Se define entonces una continuidad de solución de poros en función de la distribución de tamaño de poros para cada valor de humedad relativa, y por lo tanto, el volumen de la fase a través de la cual se manifiesta el proceso difusivo. La humedad relativa (HR) tiene una gran influencia en el contenido de solución de poro en el. No existen efectos de convección en la solución de poro cuando existe un estado de equilibrio del contenido de humedad del hormigón con el medio. En este caso debe considerarse solamente la difusión iónica a través de la fracción de porosidad ocupada por solución (w).

En exposición natural no existe un estado de equilibrio permanente. Los parámetros climáticos ocasionan variaciones en el contenido de solución de poro, afectando al perfil de ingreso de cloruro mediante un fenómeno convectivo. Entonces, cuando el grado de saturación es parcial, toma importancia el mecanismo de absorción.

Cuando se analizan perfiles de ingreso de cloruro en hormigón expuesto en atmósfera marina, es común encontrar la concentración máxima de cloruro a cierta profundidad y no en la superficie del hormigón. Este efecto también es resultado de la acción convectiva. Debido a que las acciones climáticas afectan las concentraciones de cloruro en la zona superficial, el perfil de cloruro se ve disminuido en esta zona por desorción y lavado debido al agua de lluvia. En estos casos, el análisis del perfil de ingreso de cloruro permite distinguir dos zonas [Sandberg et al. 1998, Castro et al. 2001, Lindvall 2003], una interna en la que el transporte es dominado por la difusión, y una externa en la que se manifiestan la absorción, la desorción y el lavado por parte del agua de lluvia. Esta acción podría verse afectada por la dirección del viento que puede generar una leve presión hidrostática sobre la superficie mojada, aumentando el espesor de la zona convectiva. La frecuencia y duración de los períodos de mojado y secado en cada zona es otro factor que definiría el peso relativo de los fenómenos convectivos.

El espesor de la zona superficial es función de la estructura porosa (y por lo tanto de la relación a/mc y el grado de hidratación), y de la agresividad del medio.

Esto también se explica cuando se analiza la variación estacional del depósito de cloruro sobre la superficie del hormigón [Meira et al. 2006], con lo que se produciría una disminución estacional del contenido de cloruro en la superficie del hormigón. En estas consideraciones deberían entonces tenerse en cuenta tanto las acciones macroclimáticas (precipitaciones, dirección del viento), como las mesoclimáticas (reparo de los vientos) y microclimáticas (exposición al agua de lluvia, asoleamiento).

Asimismo, pueden distinguirse tres zonas distribuidas verticalmente, según el grado de contacto que se permite al hormigón con el agua de mar. Estas zonas son la de inmersión, la de salpicaduras, y la atmosférica. La mayor velocidad de ingreso de cloruro se produce en la zona de inmersión, seguida por la de salpicaduras y finalmente la atmosférica [Tang y Andersen 2000], en coincidencia con el grado de saturación de cada zona. Este orden no es necesariamente el que corresponde al riesgo de corrosión, ya que la disponibilidad de oxígeno es otro factor fundamental en el proceso electroquímico.

Cabe destacar que este fenómeno se ve afectado debido a la exposición atmosférica, es por ello que se descartara de los ensayos a realizar en esta investigación.

2.8 Acción agresiva del agua de mar

Existen diferentes tipos de exposición marina dependiendo de la zona en que se encuentre el hormigón con respecto al mar. Las zonas que se identifican son:

➤ Zonas de atmósfera marina: En esta zona, el hormigón nunca está en contacto con el mar. Sin embargo, recibe sal procedente de la brisa marina y niebla salina. El nivel de cloruros decrecerá al aumentar la distancia al mar. Dependiendo de la naturaleza de la costa y de los vientos dominantes, la sal puede ser transportada por muchos kilómetros hacia el interior.

➤ Zonas de salpicaduras: Esta zona está, por encima de la zona de marea alta, sujeta a la humectación directa con agua de mar procedente de las olas y la espuma.

➤ Zonas de mareas: Esta zona está comprendida entre los niveles de marea alta y baja. El hormigón estará sumergido cíclicamente cada día.

➤ Zona sumergida: Es la zona por debajo del nivel de marea baja, en la cual el hormigón está permanentemente sumergido.

➤ Zona enterrada: Esta zona corresponde al fondo marino. Debe observarse que no existen unos límites definidos entre zonas y de hecho, cada zona se solapa con la siguiente.

Cabe destacar que dentro de la investigación no se realizarán ensayos sobre la acción agresiva del mar debido a que se aleja del objetivo a realizar.

Metodología de la investigación

La metodología de la investigación tiene como fin determinar una serie de pasos o acciones que permitan estudiar de manera eficiente los efectos de la adición de pigmentos colorantes inorgánicos en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón.

Se parte como punto de estudio principal de dos parámetros básicos que son: hormigones coloreados y la de hormigones en contacto con el mar. En cuanto a los hormigones coloreados, se estudian las distintas formas para su obtención y se define el mejor método para su realización, el cual se consigue mediante la utilización de pigmentos de óxidos minerales inorgánicos, definiendo las proporciones óptimas de acuerdo a antecedentes bibliográficos consultados. Con respecto al cloruro, es importante determinar cómo este afecta al hormigón de recubrimiento y el pigmento, para entregar datos concretos sobre su permeabilidad, decoloración, resistividad entre otras propiedades.

Luego se procede con la definición de un programa experimental, el cual, parte con el diseño del experimento a realizar. El diseño experimental tiene por objeto determinar los efectos del ataque de cloruro en el hormigón pigmentado. Además el diseño del experimento permite determinar la cantidad de mezcla a realizar y el tipo de análisis estadístico con que se procesaran los resultados.

Luego de diseñado el experimento se procede con la caracterización de los componentes de la mezcla, es decir, los materiales. Como son los siguientes: el cemento, el agua, los pigmentos y los áridos (gravas y arenas), utilizados en el estudio. Una vez caracterizados los componentes se realiza la fabricación de las mezclas, y por último la fabricación de las probetas, para determinar finalmente las propiedades del hormigón con pigmento. Una vez obtenidos los resultados de los ensayos realizados. Se hará un análisis estadístico de los datos, para finalmente formular las conclusiones y recomendaciones del estudio.

3.1 Diseño Experimental

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en las respuestas de salida.

El objetivo del desarrollo de la serie de experimentos a realizar en este caso es medir la migración de ión-cloruro, permeabilidad al aire, permeabilidad al agua, el desgaste del pigmento en el tiempo y la propiedad mecánica de flexo tracción. Los materiales a utilizar son cemento portland puzolanico de grado corriente nacional, se utilizara una relación agua/cemento con independencia del pigmento, pero con relación directa acorde al tipo de cemento utilizado. Se utilizara pigmento inorgánico en polvo de óxido de hierro de dos colores: Amarillo y rojo de óxido de hierro. Las probetas fabricadas con cemento portland puzolanico grado corriente, serán adicionados con pigmento de color amarillo y rojo. Así se realizaran 7 series de hormigón, con tres replicas para cada ensayo que corresponde a lo establecido para poder realizar el estudio estadístico. Para una valoración numérica con mayor exactitud para los diversos ensayos, las mediciones serán realizadas siempre en la misma área seleccionada previamente, ya sea directamente sobre las probetas o en muestras tomadas de la misma, correspondiente a la cara lateral de la cara de llenado de la probeta cubica.

3.2 Materiales y métodos

Para la realización de los ensayos y la evaluación de comportamiento de los diferentes ensayos frente al hormigón pigmentado, se utilizarán los materiales especificados a continuación:

3.2.1 Cemento

Especial Portland puzolánico, es un cemento elaborado sobre la base de Clinker, pulozana y yeso, de marca comercial Bio- Bio. De acuerdo a la norma Nch148 of.68, se clasifica según su composición y resistencia como cemento clase puzolánico, grado corriente. Según norma ASTM C595 (USA), se clasifica como IP. Según la norma EN 197-1 (UE) notación II/B-P. Es altamente demandado por el público en general, siendo un cemento de uso frecuente en construcción en nuestro país, presenta ventajas comparativas en las siguientes aplicaciones:

- Hormigones en general de viviendas y edificios.
- Hormigones masivos.
- Hormigones en ambientes agresivos.
- Morteros de pega y estuco.
- Elementos prefabricados

No se contempla la realización de ensayos al cemento, debido a que sus propiedades se obtienen mediante la certificación realizada en los laboratorios propios del fabricante.

Tabla 3.1- Datos técnicos del cemento.

Datos técnicos	Tipo de cemento
Clasificación	Bio Bio especial
Clase Grado	Portland Puzolánico Corriente
Características físicas y mecánicas	
Peso específico (g/cm ³)	2,8
Expansión de autoclave (%)	0,05
Fraguado inicial (h:m)	2:40
Fraguado final (h:m)	3:40
Resistencia a compresión (kg/cm ²)	
3 días	280
7 días	320
28 días	410
Características químicas	
Pérdida por calcinación	3,0
SO ₃ (%)	2,8

Fuente: Bio Bio, 2019.

3.2.2 Agua

El agua empleada en la confección de las distintas probetas, se regirá según la Nch1498 of82, este se puede utilizar sin verificar su calidad.

3.2.3 Pigmentos

Para pigmentar los hormigones en este estudio, se considera la utilización de pigmentos inorgánicos de óxido de hierro de 2 colores, amarillo y rojo. Estos se presentan en forma de polvo seco y fino; de los cuales ambos colores son provenientes de la química internacional BAYER Ltda. Y distribuido en nuestro país por Ibérica industrial. Cuyas características se indican en la tabla 4.3.

Tabla 3.2- Propiedad de los pigmentos.

Información técnica	Unidad	Pigmento Rojo	Pigmento Amarillo
Contenido de Fe ₂ O ₃	%	aprox. 96	min. 86 - máx. 87
Contenido de agua soluble	%		máx. 0,5
Perdida por ignición a 1000° C	%	aprox. 0,7	máx. 13,0
Residuo en tamiz (0,045 mm)	%		máx. 0,05
pH		min. 3,0-máx 6,0	min. 3,5-máx. 7,5
contenido de SiO ₂ +Al ₂ O ₃	%	aprox. 3	aprox. 2,0
Densidad Aparente	g/ml	aprox. 0,9	min. 0,4- máx 0,8
Densidad	g/ml	aprox. 5,0	aprox 4,2
Forma de la partícula		esférica	prismática
Partículas medias predominantes	µm	aprox. 0,12	max 0,1x0,7
Estabilidad térmica	°C		
Contenido de humedad (después de la producción)	%	aprox. 0,3	máx 0,5
Absorción de aceite	g/100g	aprox. 28	aprox. 43
Peso específico	g/ml	5	4,2
Sales solubles	%	0,1-0,5	0,1-1,0
Absorción de agua	g/100g	45-55	55-65

Fuente: Iberica Industrial, 2019.

Es importante destacar que los datos de las propiedades de cada pigmentos se obtuvieron de parte de los distribuidores.

Dosis estudio pigmento

Para el estudio se considera una dosis de pigmento continua entre el 2%, 3%, 4% y 5 % por kilo de mezcla, partiendo de la recomendación entregada en el estudio castro (2005) y Leveque y Oyarzún (1994) quien señala que al utilizar una dosis mayor al 5% no se produce incremento en la intensidad del color.

Materiales y métodos:

a) Moldes:

Para la fabricación de probetas de hormigón H-30 se utilizaran tres tipos de moldes prismáticos de dimensiones 15x15x15 cm según NCh 2262, otro de dimensiones 15x15x50 cm según NCh 1038, y otros moldes cilíndricos de diámetro 100[mm] y largo 190 [mm] según ASTM C1202 .

Figura 3.1- Moldes prismáticos.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

b) Fuente de poder:

Equipo proporcionado por la Universidad Católica de Valparaíso. Para realizar el ensayo de migración de cloruro se utilizara una fuente de poder con capacidad de 60 V, ya que al aplicar un flujo de corriente los iones de cloruro deberán migrar al polo positivo. Las mediciones se realizaran cada 6 horas con cuidado de las temperaturas en el ambiente, una vez obtenida la información entregada por las mediciones gracias a la fuente de poder, se registran los coulomb y se verifican los datos de la migración de cloruro según la ASTM C1202.

Figura 3.2- Fuente de poder.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

c) Nitrato de plata:

Se utilizara una pulverización de nitrato de plata para rosear las probetas y evaluar las manifestaciones patológicas. Consiste en un método cualitativo para identificar la presencia de cloruros libres en materiales a base de cemento, cuando la solución de nitrato de plata es rociada en la superficie del concreto, ocurre una reacción fotoquímica, donde hay presencia de cloruros libres ocurre la formación de un precipitado blanco de cloruro de plata. En la región sin cloruros o con cloruros combinados, hay formación de un precipitado marrón u oxido de plata. Químico necesario según ASTM C1202/05.

Figura 3.3- Polvo nitrato de plata.

Fuente: <http://www.labarracademaria.com>, 2019.

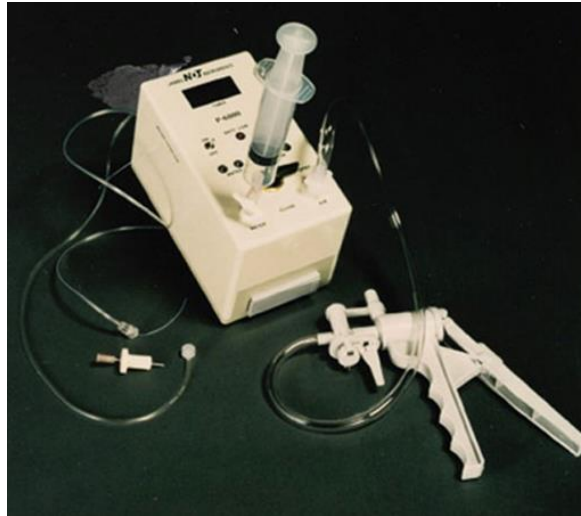
d) Poroscopio pluss:

Equipo proporcionado por la Facultad de ciencia de la Universidad Valparaíso.

Este aparato se utiliza para medir la permeabilidad al aire y agua de las probetas, aunque en esta investigación lo utilizare solo para realizar mediciones de tipo permeabilidad al aire, es un ensayo no destructivo.

La prueba de aire involucra medir el tiempo necesario para que el aire fluya dentro por un conocido volumen en una cámara de vacío, a la cual se toma el tiempo de la reducción la presión del vacío desde 55kpa a 50 kpa, este tiempo es una valoración de permeabilidad de aire por el concreto. Aparato necesario según ASTM C1202.

Figura 3.4- Poroscopio pluss.



Fuente: <http://www.meldic.cl>, 2019.

e) **Equipo de penetración de agua:**

Equipo proporcionado por los laboratorios de la Universidad Valparaíso. Se utilizara este equipo para verificar la permeabilidad al agua en las probetas. Este equipo determina la profundidad de penetración de agua bajo presión constante a un hormigón endurecido, el dato obtenido se usa para evaluar la permeabilidad. El ensayo evalúa la impermeabilidad del hormigón al agua directamente vinculado con la relación agua/cemento. El equipo se utilizó según NCh 2262.

Figura 3.5- Equipo penetración de agua.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

f) Espectrofotómetro:

Se utilizara para medir la intensidad de los colores en las probetas de hormigón H-30, se utilizara como instrumento y así analizar en el tiempo el desgaste del mismo. Con la implicancia de obtener una cara de la probeta lo más lisa posible para realizar la medición. Facilitado por la Universidad Valparaíso.

El espectrofotómetro permite cuantificar diferencias de color por medio de una técnica no destructiva, entregando valores numéricos precisos a través de coordenadas cromáticas, específicamente del modelo colorimétrico CIELAB establecido por la corporación de la iluminación (CIE)

Figura 3.6- Espectrofotómetro.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

g) **Prensa de ensayo:**

Esta herramienta se utilizara para medir la capacidad de flexo-tracción de la probeta, esta se realizara sometiendo la probeta a cargas que gracias a su diseño no es afectada por fuerzas laterales. El ensayo se realizará según la NCh 1038.

Figura 3.7- Prensa de ensayo



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Desarrollo experimental

4.1 Generalidades

A partir de los parámetros descritos en el capítulo anterior, se ejecutaran primeramente los ensayos que permiten caracterizar los áridos según la normativa vigente, para luego proceder a dosificar y confeccionar el hormigón H-30 con pigmentos colorantes.

4.2 Granulometría de los áridos

4.2.1 Áridos

Se utilizara arena y grava proporcionada por el laboratorio de cementos Bio-Bio proveniente de la empresa proveedora Fresno Ltda. Ubicada en la zona sur oriente de Santiago el diámetro de los áridos será de un máximo de 40 mm y la granulometría se regirán bajo la Nch 163 of 2013.

4.2.2 Tamizado y determinación de la granulometría

La determinación de la distribución granulométrica de los áridos se realizó por tamizado respetando el procedimiento establecido en la Nch 165. La muestra seca se tamizo utilizando los tamices de la serie preferida tomando como dato la masa retenida de cada uno de ellos. Con esta masa retenida se determinara los porcentajes parciales retenidos y los acumulados que pasan, con los cuales se obtiene el módulo de finura, los tamaños máximos absolutos y nominal de los áridos.

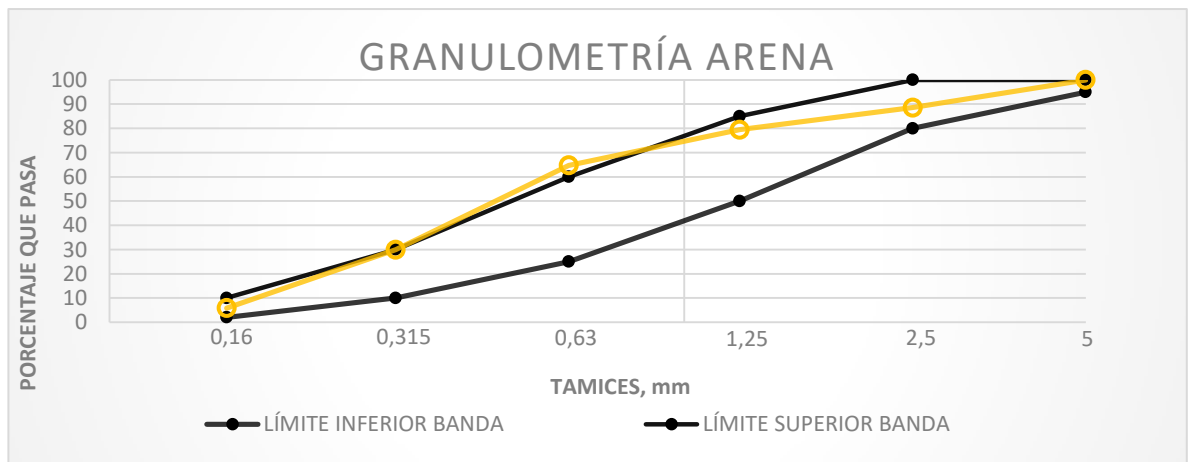
En la tabla 4.4 se presentan los resultados obtenidos para la determinación granulométrica del árido fino, utilizados en los hormigones fabricados con cemento portland puzolanico de grado corriente.

Tabla 4.1- Granulometría arena.

TAMIZ		PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	%	BANDA GRANULOMETRICA NCH163 OF 2013	
ASTM	TAMIZ (mm) NCH163 OF 79	MUESTRA 1 (gr)	MUESTRA 2 (gr)	MUESTRA 3 (gr)	(gramos)	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	QUE PASA CORREGIDO	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
3/8	10,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0	100		100	100
4	5,00	25,0	27,1	24,0	25	3	3	97	100	95	100
8	2,50	87,0	89,1	88,0	88	11	14	86	89	80	100
16	1,25	70,0	68,0	72,0	70	9	23	77	79	50	85
30	0,63	116,0	110,0	114,0	113	14	37	63	65	25	60
50	0,315	278,0	250,0	275,0	268	34	71	29	30	10	30
100	0,16	177,0	200,0	180,0	186	23	94	6	6	2	10
BAJO 100		43,0	50,0	42,0	45	6	100	0			

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Grafica 4.1 - Curva granulométrica arena



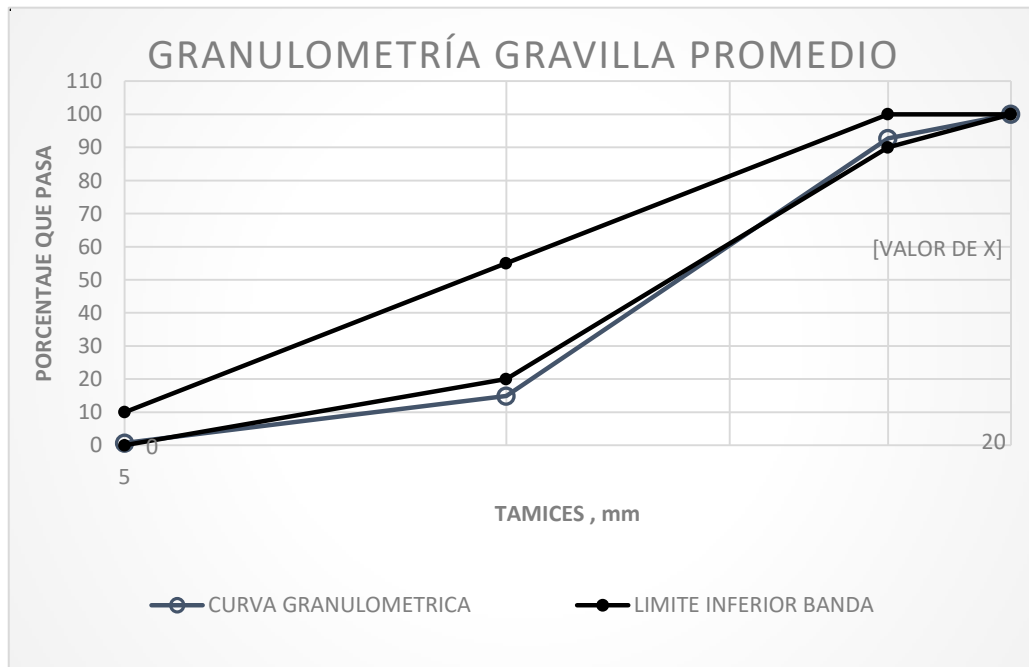
Fuente: elaboración propia, 2019.

Tabla 4.2- Granulometría gravilla.

TAMIZ		PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	BANDA GRANULOMÉTRICA NCH163 Of 2013 (Dmax 20 mm - 5 mm)	
ASTM	TAMIZ (mm) NCH163 Of 79	MUESTRA 1 (gr)	MUESTRA 2 (gr)	MUESTRA 3 (gr)	(gramos)	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
1"	25	0	0	0	0	0	0	100	100	100
3/4"	20	350	348	345	348	7	7	93	90	100
3/8"	10	3703	3705	3710	3706	78	85	15	20	55
4"	5	682	670	678	677	14	99	1	0	10
BAJO 4"		30	33	32	32	1	100	0	0	5

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Grafica 4.2 - Curva granulométrica gravilla



Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.3 Densidades y absorción

Tablas 4.3 - Densidades y absorción

ARENA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
MATRAZ CON AGUA (gr) - Ma	656	654,8	655
MATRAZ CON MUESTRA (gr) - Mm	800	798	799
Msss (gr)	231	230	231
Ms (gr)	224,5	225	225
ρ NETA (Kg/m ³)	2789	2751	2770
ρ REAL SECA (Kg/m ³)	2580	2592	2586
ρ REAL SSS (Kg/m ³)	2655	2650	2652
% ABSORCIÓN	2,9	2,2	3

GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
MASA SUMERGIDA (gr) - A	1284	1281	1283
MASA Mss (gr) - B	2056	2053	2055
Ms (gr) - C	2029	2026	2028
ρ NETA (Kg/m ³)	2723	1765	2244
ρ REAL SECA (Kg/m ³)	2628	2624	2626
ρ REAL SSS (Kg/m ³)	2663	2659	2661
% ABSORCIÓN	1,3	1,3	1,33

Fuente: elaboración propia

Densidad aparente suelta

Tablas 4.4 - Densidades aparente suelta

ARENA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO	P. TACHO* (gr)	V. TACHO* (cm ³)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	2979	2984	2980	2981,000	1510	1003
D. AP SUELTA (gr/cm ³)	1,465	1,470	1,466	1,467		
D. AP SUELTA (Kg/m ³)	1465	1470	1466	1467		
GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO	P. TACHO* (gr)	V. TACHO* (cm ³)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	11498	11529	11499	11508,667	3677	5033
D. AP. SUELTA (gr/cm ³)	1,554	1,560	1,554	1,556		
D. AP SUELTA (Kg/m ³)	1554	1560	1554	1556		

Fuente: elaboración propia

Densidad aparente compactada:**Tablas 4.5 - Densidades aparentes**

ARENA	MUE STRA 1	MUE STRA 2	MUE STRA 3	PROM EDIO	P. TACHO* (gr)	V. TACHO* (cm3)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	3156	3177	3165	3166,000	1510	1003
D. AP COMPACTADA (gr/cm3)	1,641	1,662	1,650	1,651		
D. AP COMPACTADA (Kg/m3)	1641	1662	1650	1651		
GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO	P. TACHO* (gr)	V. TACHO* (cm3)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	12110	12100	12108	12106,000	3677	5033
D. AP COMPACTADA (gr/cm3)	1,676	1,674	1,675	1,675		
D. AP COMPACTADA (Kg/m3)	1676	1674	1675	1675		

Fuente: elaboración propia

(*) Información entregada del elemento ocupado.

4.2.4 Dosificación

Los hormigones utilizados en este estudio, han sido dosificados de acuerdo a lo establecido en la metodología aportada por Iberica Industrial, el cemento proviene de cementos Biobío, utilizados por el departamento de asesoría técnica de esta empresa. Se realizara la dosificación del hormigón H-30 en base a mantener la resistencia de 30 MPa, la cual es la utilizada en las fundaciones o muelles en zonas en contacto con el mar. Con un nivel de confianza del 90% tamaño máximo del árido permitido de 40 mm, pero se utilizó un máximo de 25 mm. A continuación se presentara en la tabla 4.6 la dosificación empleada, para cemento portland puzolanico grado corriente en mi hormigón patrón a utilizar.

Tablas 4.6 - Dosificación hormigón patrón

Material	Para 1 metro cubico. (kg)
Cemento	407.44
Agua	187.83
Gravilla	1146.78
Arena	770.24

Fuente: elaboración propia

La determinación de las cantidades del pigmento se utilizara proporciones del % sobre el total del peso de cemento, del 2% al 5%, a partir de la información obtenida en las fuentes bibliográficas consultadas (Leveque y Oyarzun, 1994; Coelho, 2002), para la elaboración de la mezcla.

Tabla 4.7- Resumen dosificación.

DOSIS PIGMENTOS	COLOR PIGMENTOS	DOSIS (kg/m3)			
		CEMENTO	ARENA	GRAVILLA	PIGMENTO
2%	AMARILLO	407.44	770.24	1146.78	4.2
	ROJO	407.44	770.24	1146.78	4.2
3%	AMARILLO	407.44	770.24	1146.78	6.4
	ROJO	407.44	770.24	1146.78	6.4
4%	AMARILLO	407.44	770.24	1146.78	8.2
	ROJO	407.44	770.24	1146.78	8.2
5%	AMARILLO	407.44	770.24	1146.78	10
	ROJO	407.44	770.24	1146.78	10

Fuente: Elaboración propia, 2019.

4.3 Fabricación de la mezcla

Todos los hormigones se elaborarán en la misma betonera de eje inclinado con capacidad para 100 litros, pero efectivamente se obtendrán entre 60 y 70 litros como máximo por cada amasada.

Las mezclas de hormigón pigmentado se amasaron de acuerdo lo establecido por el fabricante para aprovechar el poder de coloración del pigmento, optimizando costos y logrando un hormigón de color uniforme al romper los aglomerados de pigmento. Además este procedimiento posibilita un mayor control de las cantidades de pigmento a incorporar.

El procedimiento establecido para realizar la mezcla consiste en poner en la mezcladora los materiales en el siguiente orden y forma de colocación:

1. Se agregan los Áridos finos (arena)
2. Se agrega el cemento.
3. Adicionar el pigmento y mezclar durante un minuto.
4. Se agregara el Árido grueso (gravilla) y mezclar durante 1 min. Así los áridos hacen de medio de molienda y rompen los aglomerados de pigmento, logrando que este se incorpore a la mezcla.
5. Finalmente se agrega agua, la cual es rigurosamente controlada pues su variación puede influir en la trabajabilidad y resistencia, se debe mezclar durante 3 minutos.

4.4 Fabricación de probetas

Una vez terminado el tiempo de mezclado del hormigón, se verterá la mezcla en los moldes, una vez vertido el hormigón de forma manual sobre los recipientes de muestreo, metálicos previamente humedecido con desmoldante, se compacta con vibrador, introduciendo el vibrador en el centro y sacándolo lentamente, manteniendo un exceso de hormigón para desalojar la cantidad máxima de aire incorporado en el hormigón.

Terminado su enrasado y alisado, las probetas se colocaran en la sala de curado a una temperatura de 18 ± 2 °C y una humedad del 95%, cubiertas con láminas de plástico hasta completar un tiempo mínimo de 20 horas de fraguado. Una vez terminado el tiempo de fraguado, las probetas será desmoldadas y colocadas nuevamente en la cámara húmeda durante 28 días.

Para la realización de las probetas, la preparación y selección de estas se confeccionaran de acuerdo a los ensayos requeridos, para los ensayos de permeabilidad al aire, penetración de agua bajo presión, decoloración se ocuparan probetas de dimensiones 150X150X150 [mm] para todos los ensayos con excepción del ensayo de flexo tracción el cual ocupara probetas de dimensiones 150x150x550 [mm] y el ensayo de migración de cloruro el cual ocupara probetas cilíndricas de dimensiones 100 [mm] de diámetro y 190[mm] de largo.

Una vez fabricadas la probetas de hormigón, para las tres series, éstas son almacenadas en ambientes de laboratorio, con humedad mayor al 50% y temperatura controlada de 23 ± 2 °C, hasta que son desmoldadas a los siete días siguiente. Una vez desmoldadas, se guardan sumergidas en agua, luego viene el proceso de curado que demora 28 días en obtener su máxima resistencia.

4.5 Procedimiento aplicado en cada ensayo:

4.5.1 Ensayo de Permeabilidad de ion cloruro: ASTM C1202

Este ensayo, también conocido como RCPT (Rapid Chloride Permeability Test), desarrollado por Whiting en 1981, determina un índice para caracterizar la penetrabilidad que posee el ion cloruro de un hormigón, mediante un ensayo acelerado de permeabilidad a cloruros mediante la aplicación de un campo eléctrico. El ensayo consiste en posicionar un espécimen previamente condicionado y saturado en agua, en una celda que contiene, por un extremo, una reserva con una solución al 3% de NaCl y por otro una reserva con una solución 0,3M NaOH.

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

- Durante seis horas se registra la cantidad de carga eléctrica que pasa, en Coulombs, y el resultado se asocia a la penetrabilidad del ión cloruro en la muestra. De acuerdo al criterio de la Norma ASTM C 1202, la cantidad de carga total que pasa por el cilindro permite clasificar el hormigón de acuerdo a una tabla de rangos de penetrabilidad al ión cloruro (Tabla 5.3 Clasificación migración de cloruros).

4.5.2 Ensayo de Nitrato de plata ASTM C1202/05

La aspersión de nitrato de plata ha sido utilizada asociada al ensayo acelerado de migración de cloruros prescrito por la ASTM C 1202/05.

- Se rocía solución acuosa de AgNO_3 0,1 M a las rebanadas fracturadas de concreto posterior al ensayo de migración de iones. Ese procedimiento causa la formación de dos regiones bien definidas, una blanquecina con precipitado de AgCl , indicando la presencia de cloruros y otro color marrón, que corresponde a la región libre de cloruros [27, 28, 29,30].

- Como la penetración de cloruros no es uniforme, la NT BUILD 492 (2000) recomienda realizar siete medidas a cada 10 mm, siendo el resultado el promedio entre todas ellas.

- La penetración de cloruros en la muestra se puede medir a partir del precipitado blanco que resulta de la reacción del nitrato de plata con los iones de cloruro que penetraron en el hormigón.

- Una vez medida la distancia de penetración, se puede calcular el coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario (D_{nssm} ; non steady state migration).

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

4.5.3 Ensayo de permeabilidad al aire: Método Figg modificado

Este método de ensayo se realiza utilizando el Poroscope plus, el cual permite medir la permeabilidad al aire en la zona de recubrimiento del hormigón, mediante un método no destructivo, obteniendo resultados en pocos minutos, seguros y reproducibles, es decir, posibilita pronósticos significativos en cuanto a la permeabilidad al aire del hormigón.

Se basa principalmente en el método de figg modificado, en el cual se mide la variación del tiempo necesario para que se produzca una determinada variación de la presión de aire y a partir de estos datos obtener valores de permeabilidad.

El Poroscope plus mide el tiempo que toma el aire en fluir hacia un volumen conocido de una cámara sellada y evacuada en el hormigón. Cuando el vacío se reduce de 55 kPa a 50 kPa, se determina la medida de la permeabilidad al aire.

Los equipos y materiales utilizados serán los siguientes:

- Taladro para hormigón con broca de 10 mm
- Manómetro digital portátil
- Tapón de silicona
- Vaselina sólida
- Bomba de vacío manual
- Tubo flexible
- Aguja hipodérmica.

Determinación de la permeabilidad al aire con equipo Poroscope plus.

El procedimiento para la realización de la experiencia se describe a continuación:

- a) Preparación del orificio de prueba.
 - Se taladra un orificio de 10 mm de diámetro, con una profundidad de 40 mm, el cual no puede estar a menos de 30 mm desde el borde del hormigón.
 - Se limpia el orificio, cuidando que no queden restos de polvo en su interior.
 - Se coloca un tapón de silicona especial en los orificios de prueba a una profundidad de 20 mm, aplicando vaselina sólida en sus bordes.
 - Se inserta la aguja hipodérmica a través del tapón, esta debe asomarse a través del fondo del tapón.
 - Como resultado se obtiene un cilindro vacío exactamente de 20 mm de largo y 10 mm de diámetro con una aguja hipodérmica conectada a la atmosfera.
- b) Permeabilidad al aire
 - Se conecta el instrumento a la aguja hipodérmica
 - Se conecta la bomba de vacío manual, al instrumento.
 - Luego se gira la válvula de vacío del instrumento, marcando abierto.
 - Posterior a ello de manera lenta se aprieta la manecilla hasta realizar un vacío superior a los 55 kPa por debajo de la presión atmosférica (durante este proceso se encienden las luces rojas).
 - Al encender la segunda luz roja, se encierra inmediatamente la válvula de vacío del instrumento.
 - Se obtienen las lecturas de tiempo (s) en el manómetro digital en el momento en que hay 55 kPa ,se continua hasta obtener 50 Kpa (se apaga la segunda luz roja).

Tabla 4.8 Clasificación Poroscope plus

clase	$kT(10^{-16} \text{ m}^2)$	permeabilidad
PK1	<0,01	Muy Baja
PK2	0,01-0,1	Baja
PK3	0,1-1,0	Moderada
PK4	1,0-10	Alta
PK5	10-100	Muy Alta
PK6	>100	Ultra alta

Fuente: ASTM C1202

4.5.4 Ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión según NCh 2262

Cuando las probetas cumplan 28 días de edad, se colocan en el equipo, de modo que la presión de agua actúe sobre la cara prevista y las otras caras puedan ser observadas. Se coloca un anillo de sellado (ver figura 1), de goma u otro material similar, en la unión entre la parte del equipo que aplica la presión de agua y la probeta, de modo que no se produzcan pérdidas de agua en dicha zona durante el ensayo. Se aplica una presión de agua de 0,1 MPa, durante 48 h. A continuación se aplican presiones de 0,3 MPa y 0,7 MPa durante 24 h cada una de ellas. Si el agua aflora hacia el exterior de alguna probeta, se deben registrar la presión y el instante en que se produce el afloramiento de agua, deteniéndose el ensayo de esa probeta. Inmediatamente de finalizado el ensayo, las probetas en que no hubo afloramiento de agua se someten a rotura por hendimiento, colocando en su parte media las barras de carga, una arriba y otra abajo. Aplicar la carga preferentemente perpendicular al sentido en que se ejerció la presión de agua. Inmediatamente se debe establecer la profundidad de la penetración de agua y la forma en que se distribuye, marcando indeleblemente la zona con un elemento de punta fina.

Medida de penetración

Medir la máxima profundidad de penetración de agua en cada una de las probetas, con aproximación de 1 mm. La impermeabilidad del mortero o del hormigón medida como penetración de agua, se expresa en mm, como el promedio de las máximas profundidades de penetración de agua medidas en las tres probetas, con aproximación a 1 mm.

4.5.5 Ensayo de decoloración (espectrofotómetro)

Para mejorar la representación del color de los objetos, la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) desarrollo en 1976 modelos de color. Estos representan de manera gráfica el color, teniendo como base que es posible la reproducción de cualquier color que distinga el ojo humano a través de la mezcla de tres colores fundamentales, rojo, verde y azul. Dentro de estos modelos colorimétricos uno de los más conocidos se encuentra el modelo CIELAB y el modelo CIELCH. Siendo el primero el empleado en la gran mayoría de las normativas de análisis de color.

El instrumento que se emplea para medir la decoloración será el espectrofotómetro que permite una valoración numérica, precisa y comparativa entre distintos materiales y sus diferentes tratamientos de conservación. Este instrumento emplea una técnica no destructiva, ya que no afecta al soporte sobre el que se realizan las medidas y permite obtener datos precisos. El análisis del color se realizara in situ. Las medidas deben ser efectuadas considerándose siempre el ángulo de observación, el tipo de luz empleada y las condiciones ambientales, como pueden ser temperatura y humedad relativa. El espectrofotómetro entrega resultados en formas de coordenadas las cuales se pueden ser cuantificadas a través del modelo CIELAB.

4.5.6 Ensayo de Flexo- Tracción (NCh 1038)

Colocar las probetas sobre los elementos de apoyo. La cara de llenado debe quedar en un plano perpendicular centrada al de los elementos de apoyo. Centrar el sistema de aplicación de la carga con relación a la fuerza aplicada, colocar elementos de aplicación de carga en contacto con la superficie de la probeta en los puntos correspondientes a los tercios y aplicar una carga entre el 3% y un 6 % de la carga ultima estimada, para determinar si hay espacios entre las probetas y los elementos de aplicación o apoyo de carga y corregir. Aplicar la carga sobre la probeta de manera continua y sin golpes. La carga debe ser aplicada a una velocidad constante hasta el punto de rotura.

4.6 Cantidad de probetas por ensayo

Tabla 4.9 – Probetas a utilizar en la investigación.

Ensayos	Probetas	Días				Cantidad total de probetas
		1	28	42	56	
Nitrato de plata	P.Rojo		3			6
	P. Amarillo		3			
Colorimetría	P.Rojo			3		6
	P.Amarillo			3		
Migración de ion-cloruro	P.Rojo		3			6
	P.Amarillo		3			
Permabilidad al aire	P.Rojo		3			6
	P.Amarillo		3			
Permabilidad al agua	P.Rojo		3			6
	P.Amarillo		3			
Flexotracción	P.Rojo		3			6
	P.Amarillo		3			
					TOTAL	24
					x4 (cada % usado)	96
					probetas H. Patron	24
					Total de probetas	120

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Presentación y análisis de datos:

5.1 Generalidades

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en los distintos procedimientos realizados, Decoloración, permeabilidad al agua, permeabilidad al aire, penetración de AgCl, permeabilidad a la migración del ión de cloruro y flexo tracción.

5.2 Decoloración superficial

Después de terminado el periodo de curado de las probetas, estas se ubican en la cámara de secado durante 5 días para luego medir su coloración a través del espectrofotómetro. La cámara de secado se encuentra con un rango de temperatura de 23 ± 2 °C y humedad relativa de $50 \pm 4\%$. La coloración es medida a través de tres parámetros: a representa la variación del color del verde al rojo, b representa la variación del azul al amarillo y L corresponde a la luminosidad.

5.2.1 Medición de coloración

La siguiente tabla 5.1 muestra los datos iniciales de coloración de las probetas pigmentadas medidas con el espectrofotómetro, los cuales fueron tomados como referencia para el cálculo de la diferencia de total del color producida por la exposición a radiación.

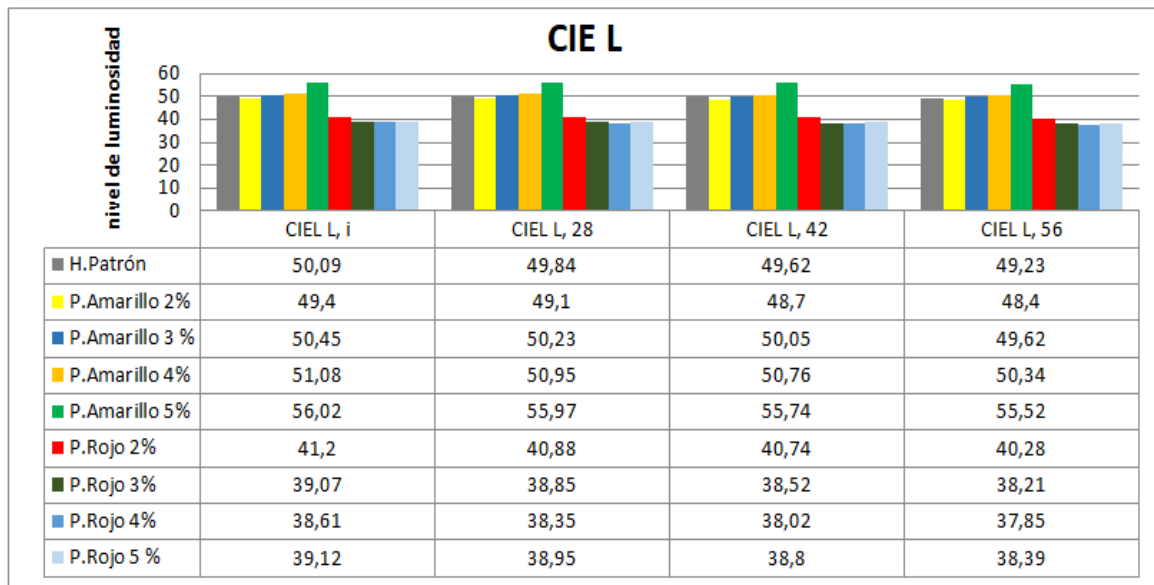
Tabla 5.1 – coordenadas de coloración en el tiempo

PROBETAS	coloración inicial			coloración día 28			coloración día 42			coloración día 56		
	CIEL L	CIE a	CIE b	CIEL L	CIE a	CIE b	CIEL L	CIE a	CIE b	CIEL L	CIE a	CIE b
Hormigón patrón	50,09	1,68	8,02	49,84	1,45	7,91	49,62	7,76	8,02	49,23	1,06	7,53
Amarillo 2%	49,4	3,49	20,57	49,1	3,21	20,23	48,7	2,81	20,02	48,4	2,76	19,85
Amarillo 3%	50,45	4,71	23,86	50,23	4,45	23,67	50,05	4,23	23,48	49,62	4,12	23,21
Amarillo 4%	51,08	5,96	27,44	50,95	5,71	27,23	50,76	5,39	26,97	50,34	5,04	26,81
Amarillo 5 %	56,02	8,56	34,38	55,97	8,34	34,06	55,74	8,13	33,87	55,52	7,95	33,69
Rojo 2%	41,2	17,06	13,45	40,88	16,85	13,21	40,74	16,65	13,11	40,28	16,51	12,95
Rojo 3%	39,07	20,7	15,26	38,85	19,91	15,02	38,52	19,83	14,95	38,21	19,72	14,8
Rojo 4%	38,61	22,03	16,84	38,35	21,9	16,72	38,02	21,76	16,51	37,85	21,53	15,98
Rojo 5%	39,12	24,12	16,94	38,95	23,94	16,62	38,8	23,8	16,32	38,39	23,43	16,01

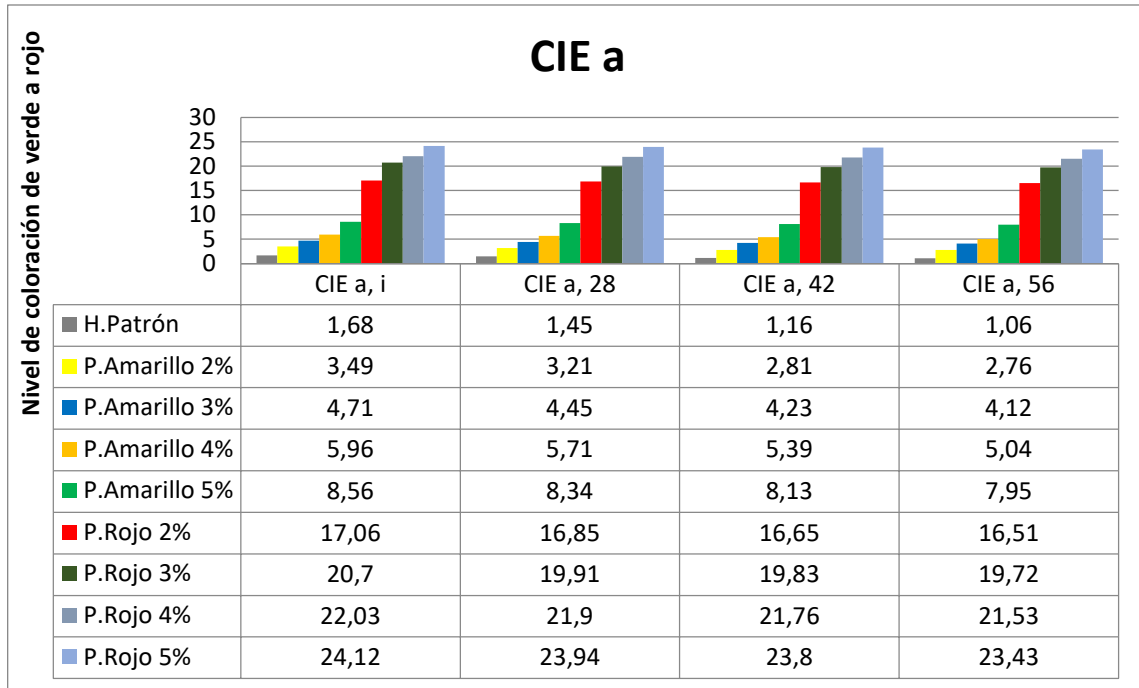
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Después de haber medido la coloración inicial de las probetas, (el día 1 del desmoldado), se procede a colocar las probetas en la piscina durante los 28 días. Al medir la coloración de las probetas de hormigón pigmentadas, se destaca el parámetro L como el valor más significativo en el cambio del color expresado.

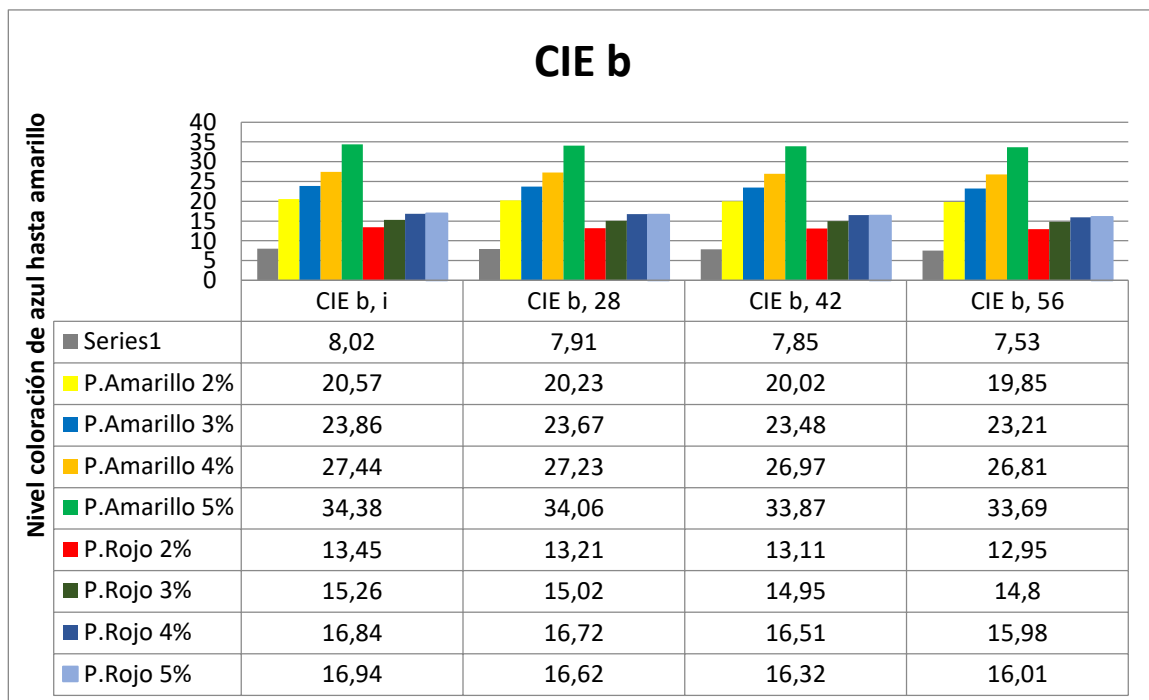
Grafico 5.2- Comparación variable “CIE L” en el tiempo en cada probeta.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Grafico 5.3- Comparación variable “CIE a” en el tiempo en cada probeta.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Grafico 5.4- Comparación variable “CIE b” en el tiempo en cada probeta.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 5.5- espectrofotómetro con probeta con pigmento rojo.



Fuente: Elaboración propia, 2019

5.2.2 Análisis de la experiencia






Después de analizar cada grafica podemos inferir que el desgaste es menor de cada color y en cada dosis, por lo que ambos pigmentos sirven como alternativa constructiva desde el punto de vista de este ensayo, la decoloración fue la esperada, los cambios de tonalidad y luminosidad fueron menores.

Las variables CIE L, CIE a, y CIE b, tuvieron una disminución menor en el tiempo como muestran las gráficas 5.2, 5.3, 5.4, por lo cual es una excelente alternativa sustituta de la pintura tradicional en zonas expuestas a iones de cloruro.

5.3 Medición de migración de cloruros:

El total de corriente que pasa por el espécimen en un total de 6 horas es registrado para clasificar al hormigón de acuerdo al criterio establecido en la norma ASTM C1202 que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.5- Clasificación migración de cloruro.

Carga Pasada (coulomb)	Penetrabilidad al Ion Cloruro	Color asignado
>4000	Alta	
2000-4000	Moderada	
1000-2000	Baja	
100-1000	Muy Baja	
<100	Despreciable	

Fuente: ASTM C1202

Las siguientes tablas 5.6, 5.7 y 5.8, muestran los datos obtenidos mediante una medición exhaustiva durante periodos de 6 horas, de las cargas eléctricas que se transportan desde el polo positivo hasta el polo negativo, registrado en coulomb.

Tabla 5.6.- Registro de energía eléctrica de migración de cloruro.

P. amarillo			
Porcentaje de pigmento	Probeta	Carga eléctrica [coulomb]	Nivel de carga según ASTM C1202
5%	muestra 1	1951	bajo
	muestra 2	1830	bajo
	muestra 3	1700	bajo
4%	muestra 1	1754	bajo
	muestra 2	1852	bajo
	muestra 3	1902	bajo
3%	muestra 1	1785	bajo
	muestra 2	1864	bajo
	muestra 3	1923	bajo
2%	muestra 1	1756	bajo
	muestra 2	1829	bajo
	muestra 3	1745	bajo

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.7- Registro de energía eléctrica en ensayo de migración de cloruro.

P.Rojo			
Porcentaje de pigmento	Probeta	Carga eléctrica [coulomb]	Nivel de carga según ASTM C1202
5%	muestra 1	1832	bajo
	muestra 2	1856	bajo
	muestra 3	1754	bajo
4%	muestra 1	1598	bajo
	muestra 2	1675	bajo
	muestra 3	1822	bajo
3%	muestra 1	1852	bajo
	muestra 2	1836	bajo
	muestra 3	1732	bajo
2%	muestra 1	1865	bajo
	muestra 2	1853	bajo
	muestra 3	1845	bajo

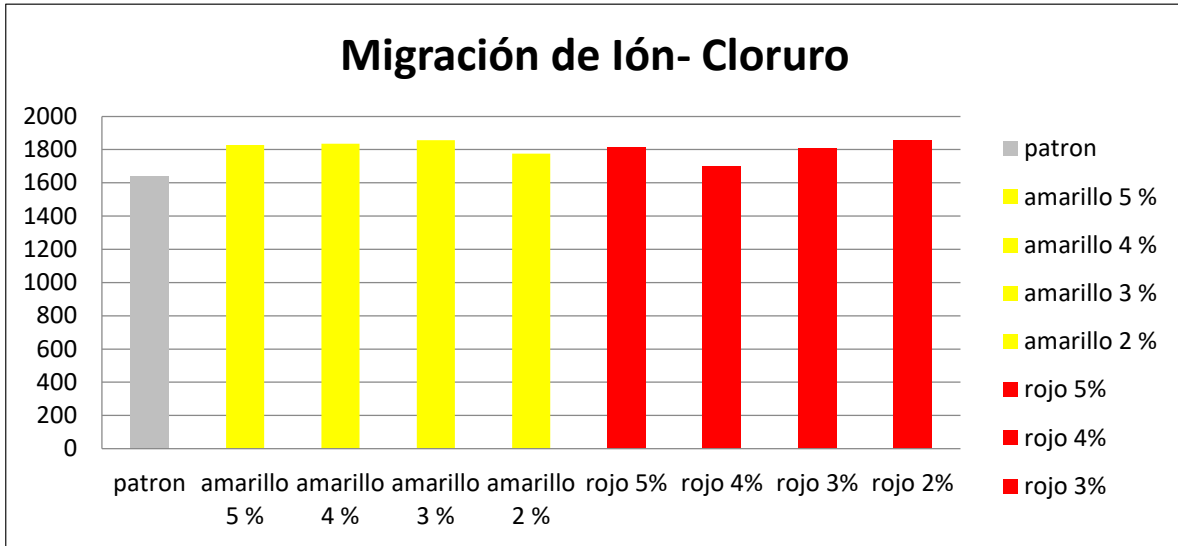
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.8- Registro de energía eléctrica en ensayo de migración de cloruro.

Hormigón patrón	Probeta	Carga eléctrica [coulomb]	Nivel de carga según ASTM C1202
0%	muestra 1	1598	bajo
	Muestra 2	1685	bajo
	Muestra 3	1645	bajo

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Grafico 5.6- Comparación carga eléctrica entre tipos de probetas.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 5.7- Toma de cargas eléctricas



Fuente: Elaboración propia, 2019.

5.3.1 Análisis de la experiencia

Mediante el grafico podemos deducir que al agregar una dosis de pigmentos por muy mínima que esta sea, esta afecta su conductividad eléctrica y con ella aumenta la migración del ion cloruro, a pesar que los valores obtenidos por el hormigón con pigmento amarillo y rojo están elevados estos se mantienen dentro de un margen admisible, por lo cual si podemos deducir que la migración de cloruro será mayor y con ella la corrosión se llevara a cabo un poco más rápido teniendo en cuenta que la conductividad eléctrica aumento en 11 % aproximadamente en el hormigón con pigmento amarillo en comparación del hormigón patrón, y en el caso del pigmento rojo aumento en 10 % aproximadamente en relación al hormigón patrón.

Según la tabla de clasificación la cual está basada en la norma ASTM C1202, todos los valores registrados caben dentro de la clasificación de baja conducción eléctrica, a lo que se traduce como una aceptación de los pigmentos sobre el hormigón a utilizar en los muelles de las zonas costeras con lo que respecta a la evaluación de la migración de cloruro.

5.4 Medición de flexo-tracción:

Las siguientes tablas 5.9, 5.10 y 5.11, muestran el registro obtenido a partir del ensayo de flexo tracción aplicado al hormigón con pigmento amarillo en cada una de sus dosificaciones.

Tabla 5.9- Registro de resistencia máxima y carga máxima en probetas hormigón patrón.

Hormigón patrón	Probeta	Resistencia máxima [Mpa]	Carga máxima [KN]
0%	muestra 1	3.577	26.82
	Muestra 2	3.747	28.10
	Muestra 3	3.622	27.16

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.10- Registro de resistencia máxima y carga máxima en probetas con pigmento rojo.

P. Rojo			
Porcentaje de pigmento	Probeta	Resistencia máxima [Mpa]	Carga máxima [KN]
5%	muestra 1	4.142	31.06
	muestra 2	4.251	29.29
	muestra 3	3.906	31.88
4%	muestra 1	3.85	29.22
	muestra 2	3.92	31.45
	muestra 3	4.12	31.02
3%	muestra 1	4.12	31.05
	muestra 2	4.22	30.26
	muestra 3	4.13	31.13
2%	muestra 1	3.89	29.13
	muestra 2	4.15	31.08
	muestra 3	4.12	30.89

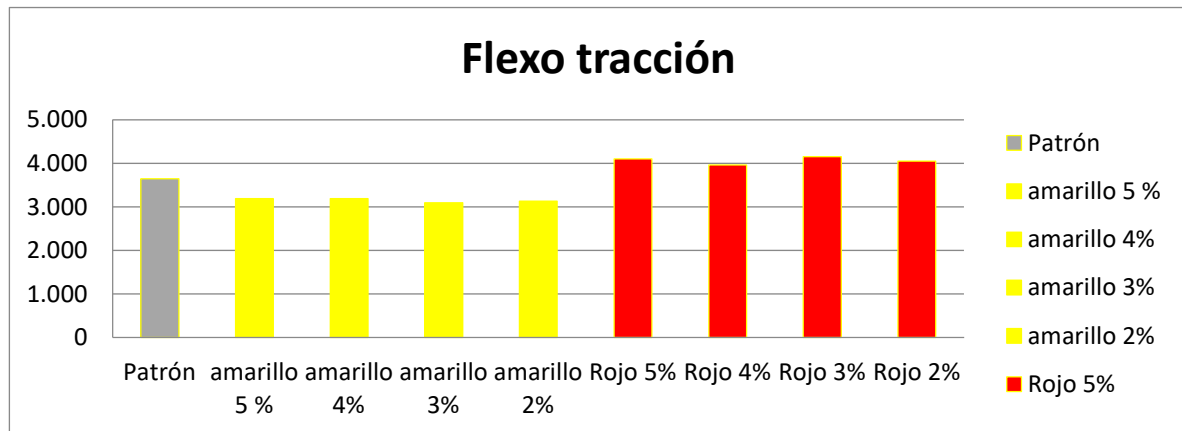
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.11- Registro de resistencia máxima y carga máxima en probetas con pigmento amarillo.

P. amarillo			
Porcentaje de pigmento	Probeta	Resistencia máxima [Mpa]	Carga máxima [KN]
5%	muestra 1	3.171	23.782
	muestra 2	3.183	23.871
	muestra 3	3.220	24.152
4%	muestra 1	3.19	23.95
	muestra 2	3.24	24.12
	muestra 3	3.15	23.21
3%	muestra 1	3.09	23.12
	muestra 2	3.12	23.25
	muestra 3	3.06	23.15
2%	muestra 1	3.16	23.78
	muestra 2	3.14	23.22
	muestra 3	3.10	23.15

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Grafica 5.8- Comparación resistencia máxima de flexo tracción.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 5.9- Probeta con pigmento amarillo en prensa de rotura.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 5.10- Probeta con pigmento rojo en prensa de rotura.



Fuente: Elaboración propia, 2019

5.4.1 Análisis de la experiencia

En relación a la gráfica 5.8 se concluye que cada una de las muestras se comportó de manera óptima debido que se obtuvo una resistencia máxima superior a 3 [mpa] en cada una de las probetas, la cual es la resistencia máxima establecida para un hormigón H-30.

Mientras que las probetas con pigmento amarillo entregaron resultados aproximadamente en un 14 % menores en comparación al hormigón patrón, el hormigón con pigmento rojo arrojó resultados superiores en un 12 % aproximadamente. Aunque cabe destacar que cada uno de ellos se encuentran dentro de los parámetros establecidos según la Nch 1038.

5.5 Medición permeabilidad al agua:

En las siguientes tablas 5.12, 5.13 y 5.14 se registró la profundidad máxima y profundidad media que penetro el agua dentro de las probetas, estas mediciones se realizaron sometiendo la probeta a compresión por hendimiento, de aquí que se obtuvieron los valores de resistencia máxima y carga máxima soportada por cada muestra.

La prueba se realizó después de 72 horas de estar cada probeta sometida a agua con aire a presión constante de 5 bares.

Tabla 5.12- Registro de penetración de agua en las probetas con pigmento amarillo.

P. amarillo					
Porcentaje de pigmento	Probeta	Resistencia maxima [Mpa]	Carga maxima [KN]	Maxima profundidad [mm]	punto medio penetración [mm]
5%	muestra 1	41.966	67.145	45	20
	muestra 2	47.525	76.040	45	22
	muestra 3	43.545	69.450	47	27
4%	muestra 1	45.32	68.584	46	24
	muestra 2	42.46	67.965	45	25
	muestra 3	42.85	71.664	44	23
3%	muestra 1	43.45	72.475	47	22
	muestra 2	41.42	71.469	44	24
	muestra 3	44.69	68.213	45	23
2%	muestra 1	43.69	69.469	45	22
	muestra 2	46.25	67.215	43	25
	muestra 3	47.21	74.569	45	23

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.13- Registro de penetración de agua en las probetas con pigmento rojo.

P.Rojo					
Porcentaje de pigmento	Probeta	Resistencia maxima [Mpa]	Carga maxima [KN]	Maxima profundidad [mm]	punto medio penetración [mm]
5%	muestra 1	42.651	71.32	45	30
	muestra 2	45.348	68.54	42	25
	muestra 3	46.452	69.82	38	22
4%	muestra 1	45.32	70.46	44	24
	muestra 2	44.75	71.51	45	23
	muestra 3	44.36	69.47	45	22
3%	muestra 1	46.85	68.46	43	25
	muestra 2	46.25	69.44	43	22
	muestra 3	41.22	67.85	41	25
2%	muestra 1	42.56	68.75	46	27
	muestra 2	45.43	69.25	43	25
	muestra 3	46.54	67.45	42	24

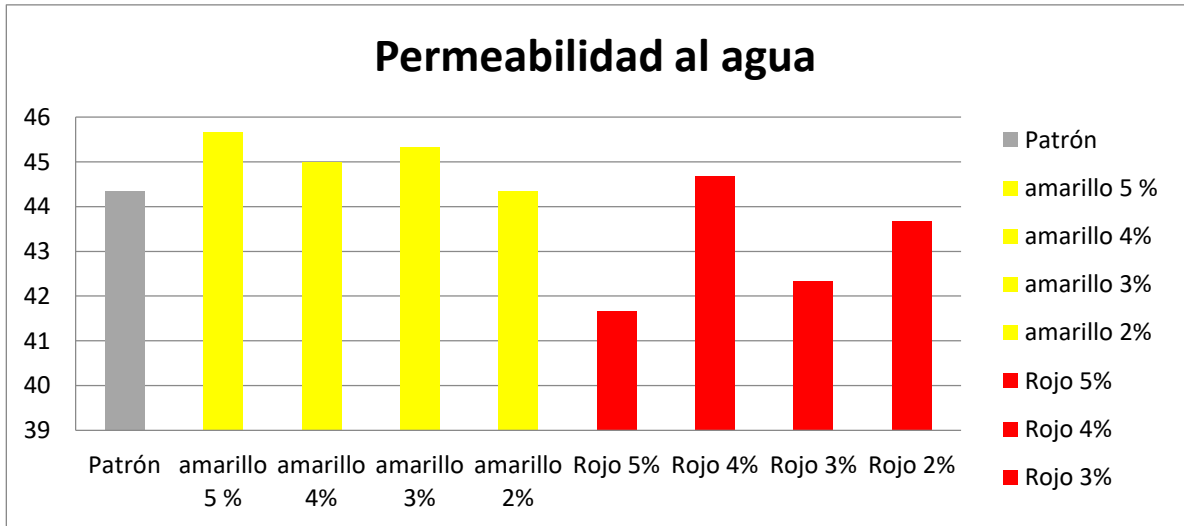
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.14- Registro de penetración de agua en las probetas de hormigón patrón

Hormigón patrón	Probeta	Resistencia maxima [Mpa]	Carga maxima [KN]	Maxima profundidad [mm]	punto medio penetración [mm]
0%	muestra 1	42.655	70.54	41	30
	Muestra 2	46.845	75.76	47	35
	Muestra 3	47.521	67.23	45	28

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Grafica 5.11- Comparación resultados profundidad máxima de agua penetrada.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 5.12- Probeta con pigmento rojo y patrón en ensayo de permeabilidad al agua.



Fuente: Elaboración propia, 2019

Figura 5.13- Probeta con pigmento amarillo sometido a rotura por hendimiento.



Fuente: Elaboración propia, 2019

5.5.1 Análisis de la experiencia

Según lo mostrado en la gráfica 5.11 podemos concluir que el agregar pigmento este no afecta mayormente la permeabilidad ya que las diferencias en la penetración de agua son mínimas, según la clasificación de la norma nch2262 la profundidad máxima permitida es de 50 mm, así que todas las probetas ensayadas cumplen con este requisito, por lo que se puede deducir que no existe alteración significativa en cuanto a la permeabilidad al agregar distintos porcentajes de pigmentos, permitiendo así su uso en muelles en zonas costeras con lo que respecta al ensayo de permeabilidad.

5.6 Medición nitrato de plata:

Los valores registrados en las siguientes tablas 5.15, 5.16 y 5.17, son datos promediados de 7 mediciones en la misma muestra con distanciamiento de 10 mm.

Tabla 5.15.- Registro de penetración de AgCl en probetas con pigmento amarillo

P. amarillo			
Porcentaje de pigmento	Probeta	Máxima profundidad [mm]	punto medio penetración [mm]
5%	muestra 1	20	12
	muestra 2	19	11
	muestra 3	21	12
4%	muestra 1	18	10
	muestra 2	20	10
	muestra 3	19	13
3%	muestra 1	21	12
	muestra 2	20	14
	muestra 3	19	12
2%	muestra 1	17	10
	muestra 2	18	11
	muestra 3	20	12

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.16.- Registro de penetración de AgCl en las probetas con pigmento rojo.

P. Rojo			
Porcentaje de pigmento	Probeta	Máxima profundidad [mm]	punto medio penetración [mm]
5%	muestra 1	19	12
	muestra 2	20	10
	muestra 3	20	10
4%	muestra 1	18	11
	muestra 2	19	12
	muestra 3	19	13
3%	muestra 1	17	12
	muestra 2	18	14
	muestra 3	20	10
2%	muestra 1	20	11
	muestra 2	19	12
	muestra 3	18	11

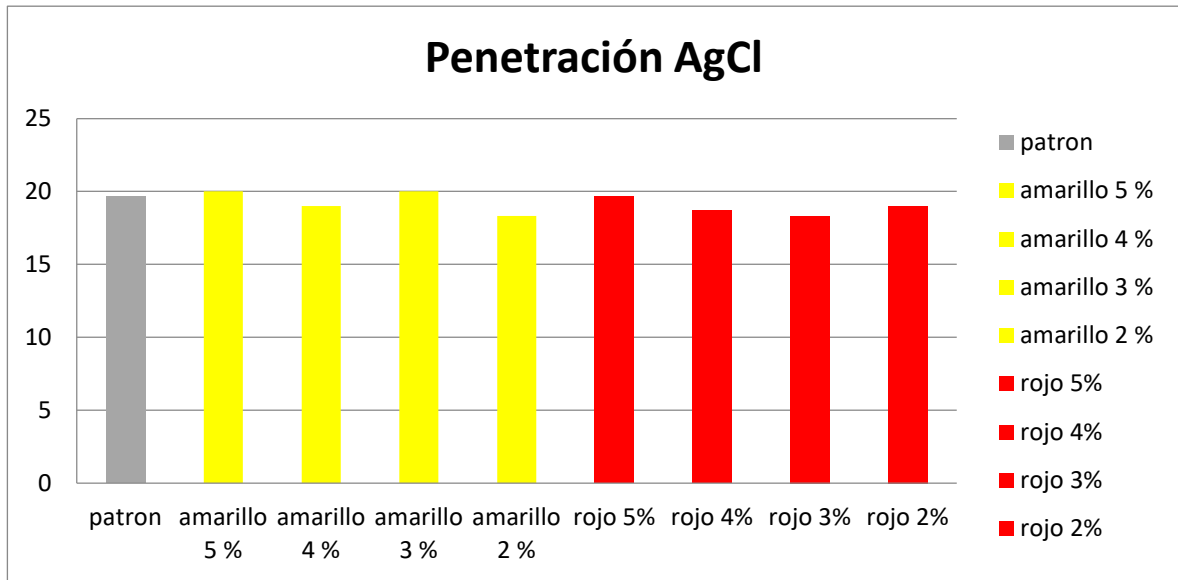
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.17.- Registro de penetración de Agcl en probetas patrón

Hormigón patrón	Probeta	Máxima profundidad [mm]	punto medio penetración [mm]
0%	muestra 1	20	10
	Muestra 2	19	12
	Muestra 3	20	11

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 5.14- Comparación del registro de penetración de AgCl en las probetas



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 5.15- Probeta con pigmento amarillo sometido AgCl.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

5.6.1 Análisis de la experiencia

De acuerdo a la gráfica 5.14 se puede concluir que la penetración del Nitrato de plata se mantiene dentro de los márgenes aceptables, con lo cual rectificamos el ensayo de migración de cloruro en el cual los resultados fueron variados pero dentro de lo acotado.

El límite permitido de penetración al AgCl es de 20 [mm], llegando hasta esta profundidad las muestras con pigmento amarillo de 5 % y 3 %. Por esto queda demostrado que el pigmento no afecta negativamente en las propiedades de permeabilidad al AgCl

Se obtuvieron mejores resultados de parte del pigmento rojo en cada uno de sus respectivos porcentajes en relación a las muestras con pigmentos amarillo, a excepción de la muestra amarilla del 2 % la cual tuvo menos penetración de AgCl en comparación a la muestra con pigmento roja del 2 %.

5.7 Medición permeabilidad al aire:

Los datos obtenidos se clasificaran según la tabla mostrada a continuación en la cual se detalla cualitativamente e nivel de permeabilidad según la variable kt.

Tabla 5.18- Clasificación permeabilidad al aire en función de kT.

clase	kT(10^{-16} m^2)	permeabilidad
PK1	<0,01	Muy Baja
PK2	0,01-0,1	Baja
PK3	0,1-1,0	Moderada
PK4	1,0-10	Alta
PK5	10-100	Muy Alta
PK6	>100	Ultra alta

Fuente: ASTM C1202

Los datos registrados se mostraran a continuación en las tablas 5.19, 5.20 y 5.21 con su respectiva clasificación según la tabla 5.18.

Tabla 5.19- Registro de permeabilidad al aire en las probetas con pigmento amarillo.

P. amarillo				
Porcentaje de pigmento	Probeta	Clase	kT(10^{-16} m^2)	Permeabilidad
5%	muestra 1	PK3	0,042	Baja
	muestra 2	PK3	0,035	Baja
	muestra 3	PK3	0,048	Baja
4%	muestra 1	PK3	0,045	Baja
	muestra 2	PK3	0,069	Baja
	muestra 3	PK3	0,041	Baja
3%	muestra 1	PK3	0,051	Baja
	muestra 2	PK3	0,06	Baja
	muestra 3	PK3	0,038	Baja
2%	muestra 1	PK3	0,047	Baja
	muestra 2	PK3	0,052	Baja
	muestra 3	PK3	0,048	Baja

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.20- Registro de permeabilidad al aire en las probetas con pigmento rojo.

P. Rojo				
Porcentaje de pigmento	Probeta	Clase	kT(10^{-16} m ²)	Permeabilidad
5%	muestra 1	PK3	0,045	Baja
	muestra 2	PK3	0,049	Baja
	muestra 3	PK3	0,038	Baja
4%	muestra 1	PK3	0,039	Baja
	muestra 2	PK3	0,04	Baja
	muestra 3	PK3	0,068	Baja
3%	muestra 1	PK3	0,078	Baja
	muestra 2	PK3	0,074	Baja
	muestra 3	PK3	0,068	Baja
2%	muestra 1	PK3	0,058	Baja
	muestra 2	PK3	0,051	Baja
	muestra 3	PK3	0,046	Baja

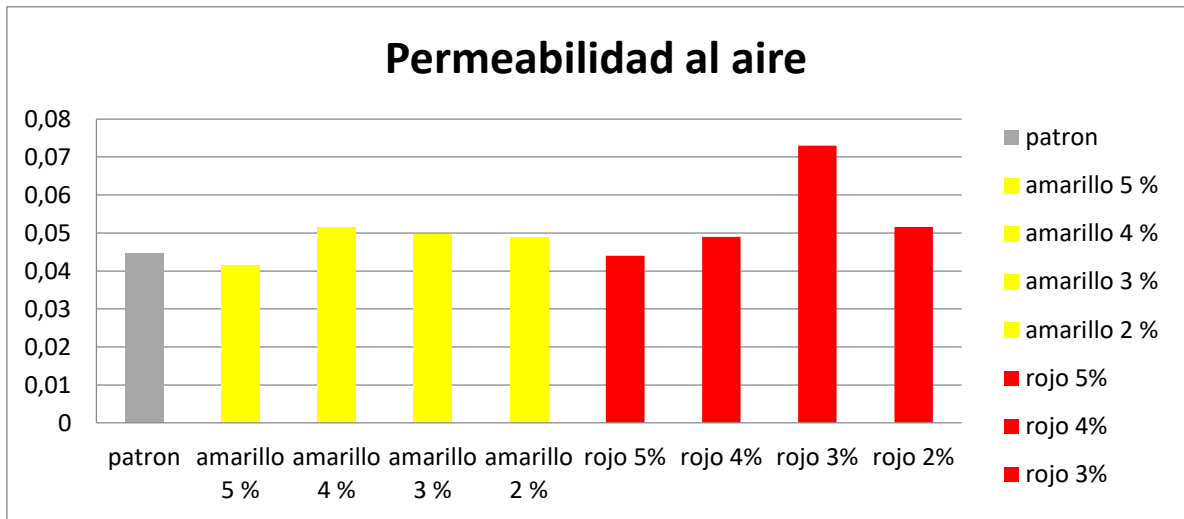
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5.21- Registro de permeabilidad al aire en las probetas de hormigón patrón.

Hormigón patrón	Probeta	Clase	kT(10^{-16} m ²)	Permeabilidad
0%	muestra 1	PK3	0,045	Baja
	Muestra 2	PK3	0,048	Baja
	Muestra 3	PK3	0,041	Baja

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Grafica 5.16- Comparación del registro de permeabilidad al aire en las probetas



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 5.17- Probetas amarillas con poroscopio plus.



Fuente: Elaboración propia, 2019

5.7.1 Análisis de la experiencia

El grafico 5.16 entrega los datos relacionados al valor kT , el cual es el coeficiente de permeabilidad al aire, este valor entregado se basa en diferentes variables los cuales son: volumen de la cámara interior, área de la cámara interior, viscosidad dinámica del aire, porosidad del hormigón, presión atmosférica, presión en la cámara interior tanto en el principio del ensayo como al final.

Una vez que fue analizado el hormigón patrón se obtuvo una clasificación baja de permeabilidad al aire, luego al probar dicho ensayo en los hormigones con diversos porcentajes de pigmentos, los resultados fueron óptimos dado que aunque varían entre uno y otro, cada uno de los resultados se encuentra dentro de la clasificación baja de permeabilidad, a lo cual se concluye que el pigmento no es ningún factor excluyente para la mezcla del hormigón.

Conclusiones

Para el empleo del pigmento se debe tener claro que este estudio se basó en pigmentos inorgánicos, ya que al realizar el estudio con un pigmento orgánico los resultados deberían variar.

Al analizar cada color en el estudio de migración de cloruro, comprobamos que el pigmento de color amarillo Bay Ferrox y26 y el pigmento rojo Bay Ferrox OX aumentan su migración de cloruro en relación al hormigón patrón, este aumento es de un 10 % aproximadamente en cada dosis, aun con este aumento cada valor entregado en cada pigmento y dosis, se encuentra dentro de los parámetros admisibles según la norma ASTM C1202, dado que el nivel de carga eléctrica transmitida durante el ensayo se califica como baja. Cabe recalcar que dentro de las diferentes opciones, la dosis que se comportó de mejor manera fue el 2% del pigmento amarillo.

Respecto el ensayo de permeabilidad al agua, el pigmento rojo me entregó mejores resultados, dado que el agua penetra menos que en el hormigón patrón, la penetración es variante dependiendo de la dosis de pigmento a usar pero generalizando penetra de 1 a 2 [mm] menos. No así las probetas con pigmento amarillo las cuales demostró una mayor permeabilidad, penetrando de 1 a 2 mm más en relación al hormigón patrón, de todas maneras cada resultado se encuentra dentro de los márgenes admisibles dado que lo mayor penetrado fue de 45.5 [mm] y el máximo aceptable por la norma Nch 2262 es de 50 [mm].

Sobre el ensayo de Nitrato de plata los resultados entregados se encuentran bastantes equilibrados entre el hormigón patrón y las probetas con pigmentos, según la norma ASTM C1202 permite una penetración máxima de 20 [mm] de nitrato de plata, límite alcanzado tanto en el hormigón patrón como en cada dosificación de pigmentos, en ningún caso este límite fue superado y los resultados oscilan desde 17 a 20 [mm] de profundidad, por lo cual cada dosis y tipo de pigmento está en un rango aceptable según la norma.

En el caso del ensayo de permeabilidad al aire los resultados se clasificaron según la variable kT usada en la tabla 5.18 la cual se extrajo de la norma ASTM C1202, los resultados se clasifican de manera cualitativa de muy baja hasta ultra alta. Se obtuvo una clasificación baja en el hormigón patrón y hormigón con pigmentos, la mayoría de los resultados entregados por las probetas con pigmento, en especial con pigmento rojo, se obtuvieron valores kT más elevados lo que simboliza que si bien cada tipo de pigmento con sus dosis cumplen con la norma, el agregado de pigmento hace levemente más permeable el hormigón.

Respecto las propiedades mecánicas, como detalle en el ensayo, el estudio a compresión se encuentra realizado en la tesis tesis “Influencia de la adición de pigmentos colorantes en la durabilidad del hormigón” la cual realizada por Jeanette M. Núñez Allendes de la Universidad de Valparaíso por lo cual me centre en el estudio del ensayo a la flexo-tracción. Dada la dosificación que se empleó para un hormigón H-30 se esperan mínimo 3 [Mpa] de resistencia según la Nch 1038, en el caso del hormigón patrón entrego un promedio de 3,6 [Mpa], en el caso de las probetas con pigmento rojo los resultados fueron muy superiores obteniendo una media de 4,1 [Mpa], mientras que en las probetas con pigmento amarillo tuvieron una media de 3,1 [Mpa], si bien los resultados son inferiores en comparación al hormigón patrón, es aceptable por norma.

En el ensayo de decoloración después de analizar cada grafica podemos inferir que el desgaste es menor de cada color y en cada dosis, por lo que ambos pigmentos sirven como alternativa constructiva desde el punto de vista de este ensayo, la decoloración fue la esperada, los cambios de tonalidad y luminosidad fueron menores.

Las variables CIE L, CIE a, y CIE b, tuvieron una disminución menor en el tiempo como muestran las gráficas 5.2, 5.3, 5.4, por lo cual es una excelente alternativa sustituta de la pintura tradicional en zonas expuestas a iones de cloruro.

Resumiendo ambos pigmentos han funcionado en esta experiencia en cada una de sus dosificaciones, cada una de ellas se encuentran dentro de los márgenes aceptable y óptimos para sus diferentes normas, si bien a diferentes dosificaciones reaccionaron levemente diferente, todos demostraron no fallar ante los diferentes ensayos.

Propuesta a futuras investigaciones

Evaluar la incorporación de pigmento orgánico al hormigón frente a la migración del ion cloruro.

Evaluar la incorporación de pigmento verde de óxido de cromo ante las repercusiones de la migración de cloruro.

Bibliografía

- [1] Castro Guiachetti, (2005). Tesis “Hormigón con pigmento de color” Universidad Austral del Chile, facultad de CS Ingeniería , escuela construcción civil, ingeniero constructor. Valdivia.
- [2] Castro, M. (2005). Tesis Universidad Austral de Chile. Hormigones con pigmento de color. Valdivia, Chile.
- [3] Núñez Allendes, J. (2007). Tesis Universidad Valparaíso. Influencia de la adición de pigmentos colorantes en la durabilidad del hormigón.
- [4] Manuel Fernandez Cánovas 2011. Libro “Hormigón”.
- [5] Andrade (1997) ANDRADE, J. J. O. (1997). Durabilidade de estruturas de concreto, análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. 148 p. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil). Universidades Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [6] Thomas, M.D.A., Pantazopoulou, S.J., and Martin-Perez, B. “Service Life Modelling of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides-A Literature Review”, prepared for the Ministry of Transportation, Ontario, at the University of Toronto, 1995.
- [7] Carvalho, F (2002). Tesis “Estructura de hormigón coloreado”. Simpósio internacional sobre concretos especiales.
- [8] Ganero, P (2010). Estudio comparativo de morteros empleados como revoques en nuestro medio. Recuperando el 10 de octubre de 2014, de http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar_2010/topico%203/CINPAR%20083.pdf
- [9] PARIS, N. CHUSID, M. (1999). Tesis “Color in Concrete”: Beauty and Durability. Concrete International. California.
- [10] KRASOWSKY (1997). Metallurgical and materials transaction a thermodynamic analysis of the empirical power relationships for creep rate and rupture time. Artículo, Rusia
- [11] Alejandra Benitez, (2004). Síntesis "Hormigones de alta prestación elaborados con cemento gris y cemento blanco". Instituto Nacional de tecnología industrial. Argentina.
- [12] Balzamo, (2004) Publicación del instituto nacional de tecnologia industrial INTI.
- [13] BÜCHNER, G. (1991). Libro “Pigments in Concrete Production. Betonwerk +FertigteileTechnik”. Alemania.
- [14] Daniela Cristea (2006). “Improving light fastness of natural dyes on cotton yarn”, Artículo. Francia.

- [15] Heinrich Zollinger (2003). "Color chemistry: syntheses, properties, and applications of organic Dyes and Pigments." Libro 3ra edición, Suiza.
- [16] Martínez (2011). Materiales funcionales híbridos: control de la morfología y química de nanoestructuras. Tesis, España, Alicante.
- [17] Espinoza Fernández, H. (2008) Pigmentos orgánicos e inorgánicos en las industrias de pintura o recubrimientos y del plástico. Recuperado el 12 de octubre del 2014, http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/espinoza_h/sources_h.pdf [18] Hugo Barrera V. (2002) "Hormigones decorativos" Tesis. Chile.
- [19] Carvalho (2001). Estructuras de hormigón coloreado. Recuperado el 20 de agosto de 2014, de <http://feb.unesp.br/pbastos/c.especiais/Art%20colorido%201.pdf>
- [20] Mejía, R.; Rodríguez, P.: Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios, CYTED, Artículo, Costa Rica (1999)
- [21] Bertolini, L.; Elsener, B.; Pedferri, P.; Polder, R.: Corrosion of Steel in Concrete, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim. Libro 2da edición. Estados Unidos. (2004).
- [22] El-Reedy, M. A.: Steel-reinforced Concrete Structures, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton (2008). Libro 2da edición. Florida, Estados Unidos.
- [23] CCAA "Chloride Resistance of Concrete". Cem. Concr. Aggr. Australia (2009). Libro volumen 9 número 2, Rio grande do sul Brasil.
- [24] Princigallo, A.: "Cálculo del transporte de cloruros en la pasta de cemento", Mater. Construcc., Libro, vol. 62, no 306 (2012), pp. 151- 61.
- [25] Güneyisi, E.; Özturan, T.; Gesog˘lu, M.: "Effect of initial curing on chloride ingress and corrosion resistance characteristics of concretes made with plain and blended cements", Build. Environ., Libro vol. 42, no 7 (2007), pp. 2676-85.
- [26] Angst, U.; Elsener, B.; Larsen, C. K.; Vennesland, Ø.: "Critical chloride content in reinforced concrete-A review", Cem. Concr. Res. vol. 39, no 12 (2009), pp. 1122-38.
- [27] Medeiros, M. H. F. (2008), Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção de superficial frente à ação de íons cloreto. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- [28] Trindade, G. H. (2011), Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

- [29] Marriaga, J. L.; Claisse, P. (2003), Influencia de la adición de escoria de alto horno em la penetración de los cloruros en el concreto. *Ingenieria e investigación*, v.31, p. 38-47, 2011
- [30] Marcondes, G. N. (2012), Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas. *Dissertação (mestrado)*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- [31] Torrent R. y Frenzer G. (1995), "Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Ueberdeckungsbetons auf der Baustelle", Report N° 516, Office Federal des Routes, Zurich.
- [32] Lea, F.M. "The Chemistry of Cement and Concrete", Edward Arnold, London, 1970.
- [33] Odd E. Gjörv. "Durability design and quality assurance of major concrete infrastructure", Norwegian University of Science and Technology - NTNU, Trondheim, Norway, 2013.
- [34] Odd E. Gjörv. "Durability design of concrete structures in severe environments", Taylor & Francis, New York, USA, 2009.
- [35] Thomas, M.D.A., Pantazopoulou, S.J., and Martin-Perez, B. "Service Life Modelling of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides-A Literature Review", prepared for the Ministry of Transportation, Ontario, at the University of Toronto, 1995.
- [36] Hasan Yildirim, Tolga Ilica, Ozkan Sengul. "Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration", Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Istanbul, Turkey, at Construction and Building Materials Magazine 25, 2011.
- [37] Detwiler, R.J., Kjellsen, K.O., and Gjorv, O.E. "Resistance to Chloride Intrusion of Concrete Cured at Different Temperatures", *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 1, pp. 19-24, 1991.
- [38] Cao, Y., and Detwiler, R.J. "Backscatter Electron Imaging of Cement Pastes Cured at Elevated Temperatures", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 627-638, 1995.
- [39] TUUTTI K. (1982), Corrosion of steel in concrete. PhD Thesis. Swedish Cement and Concrete Institute, CIB, Research Report No. 4, 468 p.
- [40] ACI Committee 201 (1977), ACI 201.2R-77 Guide to Durable Concrete, ACI Committee 201, Manual of Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, Estados Unidos.
- [41] ACI Committee 318 (2002), ACI 318M-02/318RM-02 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, 445p.
- [42] ANOOP M.B., RAO K.B., RAO T.V.S.R.A. (2002), «Application of fuzzy sets for estimating service life of reinforced concrete structural members in corrosive environments», *Engineering Structures*, 24, pp. 1229-1242.

- [43] ROSTAM S. (2000), «Vida útil de las estructuras de hormigón. Cómo satisfacer los requerimientos del nuevo milenio», *Hormigón*, 36, pp. 11-44.
- [44] CONTECVET (2001), Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura. EC Innovation Programme IN 30902I. Instituto Eduardo Torroja - GEOCISA. DG Enterprise, CEC. 152 p.
- [45] REHABCON (2004), Rehabcon Manual. Strategy for Maintenance and Rehabilitation in Concrete Structures. EC DG ENTER-C-2 Innovation and SME Programme, IPS-2000-00063 CEC. 145 p.
- [46] DURAR (1998), Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, CYTED, Maracaibo, Venezuela, 208 p.
- [47] COLLEPARDI L., MARCIALIS A., TURRIZIANI R. (1970), «La cinetica di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo», *Il Cemento*, 67, pp. 157-164.
- [48] MONOSI S., MORICONI G., ALVERÀ I. (1989), «Effect of water/cement ratio and curing time on chloride penetration into concrete», *Materials Engineering*, 1, pp. 483-489.
- [49] GLASS G.K., BUENFELD N.R. (2000), «The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete», *Corrosion Science*, 42, pp. 329-344.
- [50] DELAGRAVE A., BIGAS J.P., OLLIVIER J.P., MARCHAND J., PIGEON M. (1997b), «Influence of the interfa-cial zone chloride diffusivity of mortars», *Advanced Cement Based Materials*, 5, pp. 86-92.
- [51] FERNÁNDEZ LUCO L. (2001), «La durabilidad del hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos», en: *Durabilidad del Hormigón Estructural*. AATH, Ed. E.F. Irassar, 2001, 306 p.
- [52] SANDBERG P., TANG L., ANDERSEN A. (1998), «Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations», *Cement and Concrete Research*, 28, pp. 1489-1503.
- [53] TRAVERSA L.P. (2001), «Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales», en: *Durabilidad del Hormigón Estructural*. AATH, Ed. E.F. Irassar, 2001, 306 p.
- [54] ANDRADE C., ALONSO C., SARRÍA J. (2002), «Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere», *Cement & Concrete Composites*, 24, pp. 55-64.
- [55] TRAVERSA L.P. y DI MAIO A.A. (2002), «Difusión de cloruros en el hormigón», en: *Memoria Jornadas Tecnológicas sobre Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón: Evaluación, Diagnóstico y Reparación*, 24-25 de octubre de 2002, Mar del Plata, Argentina, AATH, pp. 87-95.

- [56] DI MAIO A.A., LIMA L.J., TRAVERSA L.P. (2004), «Chloride profiles and diffusion coefficients in structures located in marine environments», *Structural Concrete*, Vol. 5, Nº1, pp. 1-4.
- [57] DI MAIO A.A., EPERJESI L., GASSA L., TRAVERSA L.P., ZERBINO R.L. (2000), «Exposed reinforcement: Assessment of corrosion activity», *Concrete International*, Vol. 22, Nº3, pp. 47-51.
- [58] NILSSON L.O. (1996), «Interaction between microclimate and concrete - a prerequisite for deterioration», *Construction and Building Materials*, Vol. 10, Nº5, pp. 301-308.
- [59] LINDVALL A. (2003), Environmental actions on concrete exposed in marine and road environments and its response-Consequences for the initiation of chloride induced reinforcement corrosion. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Publication P-03:2, Göteborg, Suecia, 233 p.
- [60] ISGOR O.B., RAZAQPUR A.G. (2006), «Advanced modeling of concrete deterioration due to reinforcement corrosion», *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33, 707-718.
- [61] MEIRA G.R., ANDRADE M.C., PADARATZ L.L., ALONSO M.C., BORBA J.C. (2006), «Measurements and modeling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil», *Atmospheric Environment*, Vol. 40, pp. 5596-5607.
- [62] DURAR (1998), Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, CYTED, Maracaibo, Venezuela, 208 p.
- [63] CORDERO M. (2005), Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a la corrosión por cloruros, Tesis Doctoral, Department d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya, 180 p.
- [64] FREDERIKSEN J.M., SØRENSEN H.E., ANDERSEN A., KLINGHOFFER O. (1997), HETEK, The effect of the w/c ratio on chloride transport into concrete - Immersion, migration and resistivity tests. The Road Directorate, Copenhagen, Dinamarca, 35 p.
- [65] BASHEER, P.A.M. (2001), «Permeation Analysis», en: Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. Principles, Techniques and Applications, Ramachandran, V.S., Beaudoin, J.J., eds. Noyes Publications. New Jersey, Estados Unidos, pp. 658-737.
- [66] KROPP J., BASHEER L. (2000), «Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A Review», en: Near-surface Testing for Strength and Durability of Concrete, Basheer, P. A. M., V CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain.
- [67] CCAA (2009), «Chloride Resistance of Concrete», *Cement Concrete & Aggregates Australia*, Sydney, Australia, 37p.

[68] IRAM 1554 (1983), Hormigón de Cemento Pórtland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido. IRAM, Buenos Aires, 13p.

[69] WHITING D.A., NAGI M.A. (2003), Electrical Resistivity of Concrete – A Literature Review. PCA R&D Serial No. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, Estados Unidos, 57 p.

[70] WHITTINGTON H.W., McCARTER J., FORDE M.C. (1981), «The conduction of electricity through concrete», Magazine of Concrete Research, Vol. 114, N°33, pp. 48-60.

[71] HANSON C.M., FRØLUND TH., MARKUSSEN J.B. (1985), «The effect of chloride cation type on the corro-sion of steel in concrete by chloride salts», Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp. 65-73.

[72] OSTERMINSKY K., SCHIEßL P., VOLKWEIN A., MAYER T.F. (2006), «Modelling reinforcement corrosion – usability of a factorial approach for modelling resistivity of concrete», Materials and Corrosion, Vol. 57, N°12, pp. 926-931.

[73] BASHEER P.A.M., GILLEECE P.R.V., LONG A.E., Mc CARTER W.J. (2002), «Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetra-tion», Cement & Concrete Composites, Vol. 24, pp. 437-449.

[74] POLDER R.B., PEELLEN W.H.A. (2002), «Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity», Cement & Concrete Composites, Vol. 24, pp. 427-435.

[75] TAUS V.L. (2010), Análisis de la Succión Capilar en Hormigones: Influencia de distintos Parámetros de Ensa-yo. Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UNCPBA, 170p.

[76] TANG L., NILSSON L. O. (1993), «Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mor-tars», Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp 247-253.

[77] DELAGRAVE A., MARCHAND J., OLLIVIER J.O., JULIEN S., HAZRATI K. (1997a), «Chloride binding ca-pacity of various hydrated cement paste systems», Advanced Cement Based Materials, 6, pp. 28-35.

[78] ATKINSON A., NICKERSON A.K. (1984), «The diffusion of ions through water-saturated cement», Journal of Materials Science, Vol. 19, pp. 3068-3078.

[79] ANDRADE C. (1993), «Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration meas-urements», Cement and Concrete Research, 23, pp. 724-742.

- [80] GLASS G.K., BUENFELD N.R. (2000), «The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete», *Corrosion Science*, 42, pp. 329-344.
- [81] TRITTHART J. (1989b), «Chloride binding in cement. II. The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding», *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, pp. 683-691.
- [82] NEVILLE A.M. (1995), «Chloride attack of reinforced concrete: an overview», *Materials and Structures*, Vol.28, pp. 63-70.
- [83] MARTÍN PÉREZ B. (1999), Service life modeling of r.c. highway structures exposed to chlorides. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 168 p.
- [84] BICZOK I. (1972), *Corrosión y protección del hormigón*. Ed. Urmo, Bilbao, España, 715 p.
- [85] RASHEEDUZZAFAR, EHTESHAM HUSSAIN S., AL-SAADOUN S. S. (1991), «Effect of cement composition on chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete», *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, pp. 777-794.
- [86] ARYA C., BUENFELD N.R., NEWMAN J. B. (1990), «Factors influencing chloride-binding in concrete», *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, pp. 291-300.
- [87] GATES B. C. (1992), *Catalytic Chemistry*, John Wiley & Sons, Inc., 480 p.

