



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**ANÁLISIS DE EFECTOS DE SALINIDAD EN
ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN MEDIANTE PRUEBA DE
INTEMPERISMO ACELERADO**

Juan Pablo Esteban Jorquera García

Abril 2014

**ANÁLISIS DE EFECTOS DE SALINIDAD EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN MEDIANTE
PRUEBA DE INTEMPERISMO ACELERADO**

Juan Pablo Esteban Jorquera García

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

RAÚL UGALDE P.
Profesor guía

JORGE ROJAS A.
Docente

ROBERTO PRADO F.
Docente

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

AGRADECIMIENTOS

A las empresas que aportaron con insumos para la ejecución de la presente investigación,

A Cecilia Chávez y Angel Espitia por el apoyo prestado en la ejecución de los ensayos de laboratorio,

A Raúl Ugalde quien me orientó en la ejecución del presente texto,

A mi madre que financió mis locuras,

A mi hermana que corrigió mis errores, y

A México por forjar mi filosofía.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
CONTENIDO	V
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS.....	VIII
RESUMEN	X
1 INTRODUCCIÓN	1
2 MARCO TEÓRICO.....	2
2.1 DESCRIPCIÓN DEL HORMIGÓN.....	2
2.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL HORMIGÓN	2
2.1.2 HISTORIA DE LA INNOVACIÓN DEL HORMIGÓN	3
2.1.3 MATERIALES DEL HORMIGÓN	3
2.1.4 RELACIÓN AGUA CEMENTO.....	7
2.1.5 RESISTENCIA DEL HORMIGÓN	8
2.1.6 ACCIONES Y EFECTOS SOBRE EL HORMIGÓN.....	9
2.1.7 HORMIGÓN ARMADO.....	11
2.2 EFECTOS DE AMBIENTES MARINOS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	12
2.2.1 ENTORNO MARINO.....	12
2.2.2 PROCESO DE CORROSIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO.....	15
2.2.3 FACTORES QUE INFLUYEN AL PROCESO DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.....	16
2.3 INTEMPERISMO ACELERADO	17
2.3.1 DEFINICIÓN.....	17
2.3.2 NORMATIVAS DE APLICACIÓN.....	18
2.4 ESTADO DEL ARTE	18
2.4.1 RECOMENDACIONES BIBLIOGRÁFICAS	18
2.4.2 ESTUDIOS DE INTERÉS	20
2.4.3 INNOVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
3 OBJETIVOS.....	23
3.1 GENERAL	23
3.2 ESPECÍFICOS	23
4 METODOLOGÍA.....	24
4.1 LOCALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	24
4.2 MATERIALES Y EQUIPOS.....	24
4.2.1 CEMENTOS UTILIZADOS.....	24
4.2.2 ÁRIDOS.....	26
4.2.3 ACERO DE REFUERZO.....	29
4.2.4 AGUA	29
4.2.5 SULFATO DE SODIO ANHIDRO	29
4.2.6 EQUIPO DE COMPRESIÓN Y TRACCIÓN	30
4.3 ETAPAS DE IMPLEMENTACIÓN.....	31
4.3.1 PREPARACIÓN DE INSUMOS.....	31
4.3.2 MEZCLADO DE HORMIGÓN	33
4.3.3 CALENDARIZACIÓN DE LA APLICACIÓN DE INTEMPERISMO ACELERADO	34

4.3.4	PREPARACIÓN y ENSAYO DE CILINDROS Y ACERO DE REFUERZO.....	35
5	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	37
5.1	CILINDROS DE HORMIGÓN.....	37
5.1.1	ETAPA 1: ANTES DE APLICACIÓN DEL CICLO DE INTEMPERISMO	37
5.1.2	ETAPA 2: DESPUÉS DE APLICACIÓN DEL CICLO DE INTEMPERISMO	38
5.1.3	ETAPA 3: ENSAYO DE CILINDROS	41
5.2	ACERO DE REFUERZO	42
5.2.1	ETAPA 1: ACERO ANTES DEL FRAGUADO.....	42
5.2.2	ETAPA 2: DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE INTEMPERISMO ACELERADO	43
5.2.3	ETAPA 3: ENSAYO DE ACERO DE REFUERZO	45
6	CONCLUSIONES	47
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PARTICIPACIÓN DE LOS COMPUESTOS DEL HORMIGÓN EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	5
FIGURA 2: RELACIÓN AGUA/CEMENTO.	8
FIGURA 3: INFLUENCIA DE LA HUMEDAD AMBIENTAL SOBRE LA RESISTENCIA.	9
FIGURA 4: MODELO DE RAÍZ DE TIEMPO DE INTRUSIÓN POR CARBONATACIÓN.	10
FIGURA 5: SALINIDAD DEL AGUA DE MAR SUPERFICIAL EN EL MUNDO.	13
FIGURA 6: PERFIL DE TEMPERATURA Y SALINIDAD FRENTE A LAS COSTAS DE VALPARAÍSO.	14
FIGURA 7: PROCESOS DE DETERIORO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN.	15
FIGURA 8: DIAGRAMA DE LA DESTRUCCIÓN DE CAPA PASIVANTE POR EFECTO DE CLORUROS.	16
FIGURA 9: COLUMNA AFECTADA POR "CORROSIÓN MARINA".	21
FIGURA 10: UBICACIÓN DE FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS, UCOL.	24
FIGURA 11: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CPC 30R.	25
FIGURA 12: RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS SULFATOS.	26
FIGURA 13: GRAVA UTILIZADA.	27
FIGURA 14: ARENA UTILIZADA.	27
FIGURA 15: TAMIZADORA PIFI 2010.	28
FIGURA 16: ACERO DE REFUERZO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN.	29
FIGURA 17: EMPAQUE DE DISTRIBUCIÓN DE SULFATO DE SODIO EN ANHIDRO.	30
FIGURA 18: MÁQUINA DE ENSAYO DE COMPRESIÓN.	30
FIGURA 19: MÁQUINA DE ENSAYO DE TRACCIÓN.	31
FIGURA 20: RECIPIENTES PARA CILINDROS DE HORMIGÓN.	32
FIGURA 21: CAJÓN DE MADERA.	32
FIGURA 22: ARMADURA DE ACERO.	33
FIGURA 23: EFECTO DEL CURADO EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.	33
FIGURA 24: VIGAS DE HORMIGÓN SUMERGIDAS PARCIALMENTE.	34
FIGURA 25: CILINDRO CABECEADO EN EQUIPO A COMPRESIÓN.	35
FIGURA 26: BARRA DE ACERO SOMETIDA A TRACCIÓN SUJETA POR MANDÍBULAS DE ACERO.	36
FIGURA 27: CILINDROS DE HORMIGÓN.	38
FIGURA 28: PRESENCIA DE CRISTALES DE Na_2SO_4 EN CILINDROS.	40
FIGURA 29: VIGAS DE HORMIGÓN A LOS 14 DÍAS DE EXPOSICIÓN.	43
FIGURA 30: ZONAS DISTINGUIBLES EN VIGAS DE HORMIGÓN.	44
FIGURA 31: BARRA DE ACERO ENSAYADA.	46
FIGURA 32: ESTIMACIÓN DE VIDA RESIDUAL DE UNA ESTRUCTURA.	48

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: COMPUESTOS BÁSICOS DEL CLÍNKER.	4
TABLA 2: CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPUESTOS BÁSICOS DEL CLÍNKER.	4
TABLA 3: CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS SEGÚN COMPOSICIÓN.	5
TABLA 4: CEMENTO PORLAND SEGÚN ASTM.	6
TABLA 5: COMPOSICIÓN DE IONES PARA AGUA DULCE Y DE MAR.	12
TABLA 6: CLASIFICACIÓN DE AGUA SEGÚN SALINIDAD.	13
TABLA 7: REQUISITOS PARA HORMIGÓN EXPUESTO A SOLUCIONES QUE CONTIENEN SULFATOS.	19
TABLA 8: RESISTENCIA DE ALGUNAS ROCAS EN [KGF/CM ²].	20
TABLA 9: GRANULOMETRÍA DE GRAVA.	28
TABLA 10: GRANULOMETRÍA DE ARENA.	28
TABLA 11: CALENDARIO DE APLICACIÓN DE PRUEBA DE INTEMPERISMO.	35
TABLA 12: INFORMACIÓN DE CILINDROS ANTES DE LA APLICACIÓN DE ACCIÓN QUÍMICA.	37
TABLA 13: INFORMACIÓN DE CILINDROS DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE ACCIÓN QUÍMICA.	39
TABLA 14: VARIACIÓN DE LA MASA DE CILINDROS SEGÚN TIPO DE CEMENTO.	39
TABLA 15: VARIACIÓN DEL VOLUMEN DE CILINDROS SEGÚN TIPO DE CEMENTO.	40
TABLA 16: VARIACIÓN DE DENSIDAD DE CILINDROS SEGÚN TIPO DE CEMENTO.	40
TABLA 17: RESULTADOS DE RESISTENCIA DE CILINDROS LUEGO DE 14 DÍAS.	41
TABLA 18: MASA DE ACERO DE REFUERZO ANTES DE COLOCARLAS EN LA VIGA.	42
TABLA 19: MASA DE ACERO DE REFUERZO DESPUÉS DE COLOCARLAS EN LA VIGA.	44
TABLA 20: RESISTENCIA PROMEDIO DE BARRAS DE ACERO DE REFUERZO.	45
TABLA 21: DEFORMACIÓN PROMEDIO EN BARRAS DE ACERO DE REFUERZO.	45

Dedicada a
mi viejo, mi vieja, mis hermanos,
amigos y amigos de Triple XXX

RESUMEN

La investigación presenta un análisis a la resistencia del hormigón y acero de refuerzo en ambientes salinos mediante la prueba de "Intemperismo Acelerado", utilizando sulfato de sodio (Na_2SO_4), que se le aplica a los áridos, con el objeto de estimar pérdidas o ganancias de carga de los elementos.

El agua de mar, al estar en contacto con otra superficie, generará diversos efectos desde la abrasión (por efecto del oleaje) o la penetración de cloruros por los intersticios del hormigón. Esto posibilita un desmembramiento de la capa superficial y la corrosión del acero en su interior. Producto a lo anterior se estará afectando la resistencia a la compresión y también a la flexión de elementos de hormigón.

Considerando que el hormigón se constituye casi en un 80% de áridos, además de material cementante y agua, se presume que la prueba de intemperismo acelerado, (asumiendo que los efectos que se producen en ambientes salinos son de similar efecto a las consecuencias provocados por la prueba), resultará muy adecuada para estimar las variación a la resistencia en probetas cilíndricas de hormigón como de acero de refuerzo con diversos recubrimientos.

Para realizar la prueba se utilizó una mezcla de hormigón de $f_c=250[\text{kg}/\text{cm}^2]$, además de recubrimientos de 3, 5 y 7 [cm], además el uso de cemento corriente y resistente a sulfatos. Para la mezcla no se utilizaron aditivos y se manipularon áridos utilizados en obra.

Los cilindros de hormigón fueron ensayados a compresión luego de 14 días, durante el cual se sometieron a regímenes completos en saturación mediante prueba de intemperismo acelerado. Además se aplicó una combinación mixta de saturación y exposición al aire, así como cilindros de control para comparar sus resultados. Por otra parte, las barras de acero fueron ensayadas a tracción luego de ser recuperadas siendo sometidas previamente a diversos recubrimientos con exposiciones continuas de saturación de sulfato de sodio.

Los resultados concluyen que, debido a su composición, el cemento corriente adquiere una alta resistencia en un breve periodo siendo despreciables los efectos de los agentes químicos aplicados. Las cualidades del cemento especial hacen que su resistencia se aprecie reducida frente a agentes químicos debido a su resistencia de diseño la alcanza en forma tardía. Por otra parte en las barras de acero no se distingue mayor variedad de resistencia debido a que en el plazo no se evidenció corrosión en sus piezas.

1 INTRODUCCIÓN

El uso de hormigón en estructuras es uno de los avances tecnológicos más relevantes de la historia, en lo que se refiere a la realización de obras civiles, gracias a la amplia gama de aplicaciones y especificaciones que posee, según el uso que se le aplique.

En el ámbito de la ingeniería marítima, el uso del hormigón es uno de los casos especiales, debido a una carga variable existente. Esto tiene que ver tanto con la acción de oleaje, como con la ocurrencia de sismos y la misma acción salina; a esto se suma la existencia de altos niveles de humedad constante, la evaporación de la capa superficial e incluso el material biológico que se le adhiere.

Es así como, en ambientes marítimos, el hormigón estará sometido a la acción de una serie de efectos físicos, químicos y biológicos, además de las grietas que se le generan debido a las cargas sobre el mismo.

Del mismo modo, el acero de refuerzo que contienen las estructuras de hormigón reforzado estará expuesto a mayores niveles de corrosión, que en condiciones distintas. (Skalny, J. 2001).

Otro aspecto que es relevante tener en consideración es el hecho de que las estructuras se verán afectadas por el contacto directo con el agua salada, así como también por el rocío causado por la evaporación de la capa superficial de agua de mar y la existencia de un ambiente salino en todo el entorno.

La capacidad de carga de las estructuras de hormigón depende tanto de la configuración de la mezcla (tipo de cemento, relación agua/cemento, granulometría, aditivos, etc.) como del uso del acero de refuerzo (Nilson A., 2001). Así también, será fundamental contar con una aproximación lo más certera posible de la variación de la capacidad de carga del hormigón por la acción salina.

En función a lo anterior, es vital contar con una estimación que permita determinar cambios relativos a la disminución del área, pérdida de capacidad de carga en compresión u otros efectos atribuibles a la acción que causa la salinidad del agua y del entorno en la estructura.

Es así que el presente trabajo tiene la finalidad de estudiar los efectos de salinidad en cilindros y cajones de hormigón armado, utilizando un procedimiento de "intemperismo acelerado".

Con ello se busca analizar y comparar los siguientes aspectos, en relación al proceso de erosión a que está expuesto el hormigón en ambientes marítimos:

- Pérdida (o ganancia) de carga, masa y volumen que sufren los cilindros de hormigón bajo esfuerzos de compresión en ambientes salinos.
- Pérdida (o ganancia) de masa y de resistencia a la tracción del acero de refuerzo en ambientes salinos.

Con los resultados a obtener se espera concluir y entregar recomendaciones respecto al diseño de estructuras de hormigón en masa y armado, lo que permitirá mejorar y optimizar los recursos y materiales que se utilizan en las obras de ingeniería marítima.

2 MARCO TEÓRICO

La presente sección describe tres áreas necesarias para la definición del marco teórico comprendiendo la “Descripción del Hormigón”, que introduce en el insumo que conlleva esta investigación; el “Intemperismo Acelerado”, a fin de encuadrar la presente investigación, que aplica la mencionada técnica de acción química y, finalmente, el “Estado del Arte”, que resume estudios e investigaciones aplicadas al efecto salino en hormigón.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL HORMIGÓN

A lo largo de la historia del hombre, la búsqueda de la máxima duración de las estructuras que construye, junto con el uso eficiente de los insumos, ha permitido la incorporación de nuevas tecnologías de materiales que permiten aumentar la capacidad de carga y también la resistencia a la exposición a diversas acciones meteorológicas, físicas o químicas que permiten una mayor durabilidad de las estructuras.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL HORMIGÓN

El hormigón es un compuesto constituido por una mezcla de cemento, agua y áridos finos y gruesos, con la eventualidad de incorporar aditivos que alteren sus propiedades físicas o químicas, generando un producto de alta capacidad de compresión.

Con una mezcla adecuada se puede generar una pasta para diversos usos, principalmente en la construcción de edificaciones y caminos, la cual es fácilmente transportable y moldeable.

Una vez mezclado el cemento y los áridos en las cantidades adecuadas, según su uso final, el agua genera un proceso físico-químico que hidrata los componentes del cemento permitiendo un fraguado inicial, seguido de un endurecimiento gradual que - bajo requerimientos de temperatura y humedad - genera una creciente capacidad resistente y sólida del conglomerado.

Dentro de los diversos modos de uso del hormigón se encuentran:

- Hormigón en grandes masas: especialmente utilizado en obras como presas o defensas costeras, en las que se generan estructuras macizas de gran peso.
- Hormigón pre y post tensado: éste fue impulsado principalmente en la construcción de puentes y vigas de grandes luces.
- Pavimentos: utilizado en vialidad, principalmente en autopistas que conllevan condiciones especiales de carga aplicada sobre el suelo, pendientes altas y condiciones climatológicas, como ciclos de hielo-deshielo que - mediante una muy baja fluidez y alta calidad en la terminación superficial - han permitido destacar en su uso.
- Hormigón armado: innovación propuesta en el siglo XIX que incluía reforzar con barras de acero, a fin de mejorar el comportamiento a la tracción.
- Hormigones especiales: en la actualidad se han innovado diversos hormigones con aditivos que permiten mejorar la capacidad de ataques químicos, usos en obras subterráneas, livianos, expansivos, proyectados, entre otros.

Es de este modo que el hormigón ha destacado en las obras civiles de los últimos 200 años, permitiendo generar estructuras en diversas áreas. De igual modo dentro de las características que han permitido al hormigón destacar en los últimos años destacan:

- Facilidad para conferirle diversas formas gracias a su plasticidad.

- Adaptabilidad a los requerimientos de cualquier tipo de obra.
- Posibilidad de uso sin grandes requerimientos técnicos para obras pequeñas.
- Adecuada durabilidad y resistencia a la corrosión en condiciones ambientales desfavorables y al fuego.

2.1.2 HISTORIA DE LA INNOVACIÓN DEL HORMIGÓN

El desarrollo de las tecnologías en la construcción no ha sido ampliamente conocido, principalmente dado que las invenciones o tecnologías desaparecen con la aparición de nuevos productos, con los que generalmente decae el producto anterior.

Según H. Zabaleta (1988) se distinguen tres etapas en las tecnologías de la construcción que aplican al hormigón:

- Inicios:** Etapa que abarca desde 7.000 años antes de Cristo hasta 1 siglo antes de Cristo, que se caracteriza por el uso de bloques elaborados por insumos disponibles en el entorno, tales como roca, adobe, cerámicos, etc., que eran unidos por aglomerantes como la arcilla y el yeso.
- Avances:** Etapa en que se desarrollan avances tecnológicos - principalmente gracias a los avances logrados en la época del Imperio Romano -, que generaron un elemento similar al hormigón. Esto se hacía sobre la base de bloques que se formaban mediante la unión de puzolana con cal, materiales pétreos y trozos de ladrillo con los que moldeaban estructuras.
Marco Vitruvio, arquitecto del emperador romano Julio César¹, señalaba la existencia de un asombroso polvo, que se encontraba en las ciudades italianas de Bota y Putuoli (Puzzuoli). Dicho producto, al mezclarse con cal y piedras, proveía resultados fascinantes e incluso permitía construir pilares en el mar.
- Redescubrimiento:** Se obtiene el cemento como adhesivo hidráulico, producto de la investigación desarrollada desde mediados del siglo XVIII a los inicios del siglo XIX. Se generaron adecuados morteros, lo que confluyó en 1824 con la patente del cemento Portland, creado por Joseph Aspdin quien lo definía como una "piedra artificial".

A lo largo de la historia de estas innovaciones se han producido diversos hitos posteriores, entre los que destacan:

- Lambot, 1850: Primera construcción con hormigón reforzado mediante barras de acero,
- Wayss, 1887: Primer texto sobre hormigón armado en el cual se explica su uso en diferentes estructuras.
- Johnson, 1884: Proceso de clínquerización para la producción de cemento en forma industrial.
- Férét, 1890: Relación agua/cemento en la resistencia del hormigón.
- Río Maipo, Chile, 1856: Primera aplicación de cemento importado para la construcción del puente ferroviario sobre el Río Maipo.
- Cemento Melón, 1906: Primera fábrica de cemento en Sudamérica.

2.1.3 MATERIALES DEL HORMIGÓN

2.1.3.1 CEMENTO

El cemento es un aglomerante de color gris; se presenta como un polvo muy fino que, al mezclarse con agua, genera una pasta capaz de endurecer tanto al aire libre, como bajo el agua.

¹ Biografías y Vidas, <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/v/vitruvio.htm>, Consultado el 01/11/2013.

El cemento se obtiene mediante un proceso de fabricación que utiliza caliza y sílice, además de proporciones menores de aluminio y hierro.

El calcio (Ca) es obtenido desde depósitos calcáreos abundantes de carbonato de calcio (CaCO_3), siendo un compuesto muy estable a los agentes atmosféricos y que está disponible en diversas partes del mundo, como calizas y depósitos marinos, entre otros.

El CaCO_3 se puede descomponer a altas temperaturas, resultando en dos productos: anhídrido carbónico (CO_2) y cal u óxido de calcio (CaO), donde el primero se libera a la atmósfera producto de la combustión.

Por otra parte el silicio, el aluminio y el hierro se pueden obtener de las arcillas, de escorias de altos hornos², e incluso de arena silícica disponible en minas de cuarzo.

Dentro de la industria del cemento se denomina “cal” al óxido de calcio (CaO), “sílice” al óxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3) como “alúmina”.

Mediante un proceso de secado, deshidratado, molienda y calentado según adecuadas mezclas de los productos mencionados se genera el clínker que queda compuesto por los elementos indicados en la Tabla 1:

Tabla 1: Compuestos básicos del clínker.

Fuente: Cementos Bio Bio.

Nombre	Designación	Compuesto
Silicato tricálcico ³	C_3S	3CaO SiO_2
Silicato bicálcico	C_2S	2CaO SiO_2
Aluminato tricálcico	C_3A	$3 \text{CaO Al}_2\text{O}_3$
Ferroaluminato tetracálcico	C_4AF	$4 \text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$

Junto al listado de la tabla anterior, éstos componen casi el 95% del total del clínker, están presentes también otros sulfatos (SO_3), magnesia (MgO), cal libre (CaO) y otros óxidos (óxido de manganeso, óxido de vanadio, anhídrido fosfórico, etc.).

De los principales compuestos, cada uno de ellos entrega cualidades específicas que determinan las características finales del cemento, como se indica en la Tabla 2:

Tabla 2: Características de los compuestos básicos del clínker.

Fuente: Cementos Bio Bio.

Designación	Fraguado	Desarrollo de la resistencia	Contribución a la resistencia	Estabilidad química
C_3S	Rápido	Rápido	Alta (a poca edad)	Buena
C_2S	Lento	Lento	Alta (a mayor edad)	Muy Buena
C_3A	Muy Rápido	Muy Rápido	Baja	Mala
C_4AF	Lento	Lento	Muy baja	Buena

Finalmente, el clínker es sometido a molienda hasta obtener un polvo finísimo, al que se le incluye yeso en alrededor de un 5% de su peso, a fin de regular el proceso de fraguado conformando el conocido Cemento Portland.

Cada uno de los componentes básicos del clínker entrega una cualidad potencial al cemento. Es así como un alto contenido de C_3S provocará resistencias iniciales altas; un alto contenido de C_2S provocará resistencias altas a largo plazo y, finalmente, la

² De la NCh 148, Of 68. “Cemento: Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales”, se entiende a la escoria básica granulada de alto horno como el producto del enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento del mineral de hierro en un alto horno. La escoria molida por sí sola tiene propiedades adhesivas, pero carece de rapidez en su fraguado.

³ Tanto el C_2S como el C_3S componen el 75% del clínker.

resistencia a sulfatos vendrá dada por un menor contenido de C_3A como se aprecia en la Figura 1.

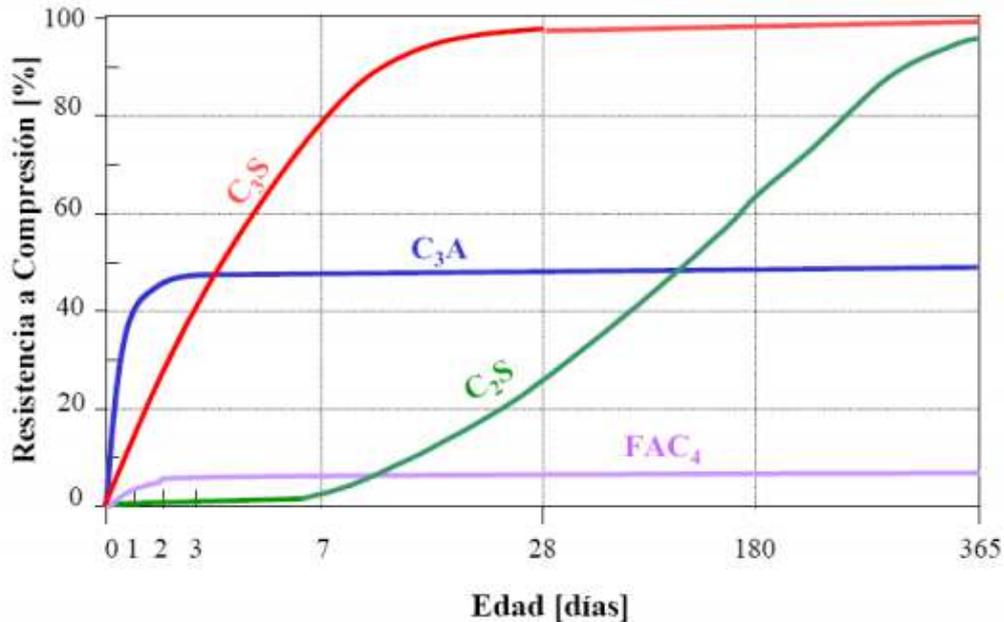


Figura 1: Participación de los compuestos del hormigón en la resistencia a compresión.
Fuente. Francisco Blanco, Universidad de Oviedo, España.

Durante la molienda se pueden adicionar también otros productos naturales o artificiales que permiten variar el comportamiento del hormigón en el fraguado, capacidad de carga, durabilidad y/o resistencia a agentes químicos.

La NCh 148 clasifica los cementos nacionales según resistencia y composición de acuerdo a la Tabla 3⁴:

Tabla 3: Clasificación de los cementos según composición.
Fuente NCh 148. Of 68.

Clasificación	Clínker	Puzolana	Escoria
Portland	100 %	-	-
Portland Puzolánico	≥ 70 %	≤ 30 %	-
Portland Siderúrgico	≥ 70 %	-	≤ 30 %
Puzolánico	50 - 70 %	30 - 50 %	-
Siderúrgico	25 - 70 %	-	30 - 75 %

De igual modo la ASTM⁵ clasifica en 5 grupos los tipos de cemento, los cuales posteriormente los subdividen según mayor o menor cantidad de puzolana, escoria u otros elementos. Sobre la base de lo anterior, la normativa de la ASTM C-150-07⁶ establece los siguientes tipos observados en la Tabla 4:

⁴ Se reconoce también el cemento con "Agregado tipo A" o con "Agregado calcáreo arcilloso" que registra la NCh 148, pero éste ha dejado de ser utilizado por la industria de la construcción (Fuente: Cementos Bio Bio)

⁵ ASTM, por sus siglas en inglés, "American Society for Testing and Materials". www.astm.org

⁶ ASTM C-150-07: Especificación Normalizada para cemento Portland.

Tabla 4: Cemento Portland según ASTM.
Fuente: ASTM Norma C-150-07

Tipo I	Cemento Portland común y sin requisitos especiales.
Tipo II	Cemento Portland de moderado calor de hidratación y moderada resistencia a sulfatos. Contenido máximo de 8% de C ₃ A.
Tipo III	Cemento Portland de alta resistencia inicial.
Tipo IV	Cemento Portland de bajo calor de hidratación, con contenidos máximos de 35% de C ₃ S y 7% de C ₃ A.
Tipo V	Cemento Portland resistente a los sulfatos, con un contenido máximo de 5% de C ₃ A y la suma de C ₄ AF + 2C ₃ A es menor a un 20% del peso.

Es de éste modo que la acción final de la elección de cada uno de los tipos de cemento dependerá del uso que se le desee dar o asignar, por lo que, sobre el tema que convoca esta investigación, será conveniente aquel que tenga una mayor capacidad resistente al ataque de sulfatos.

2.1.3.2 ÁRIDOS

La mezcla que conglomerará el hormigón también conlleva áridos que permiten entregar estabilidad físico-química al elemento inerte formado solo por cemento, además de las razones económicas que implicaría generar una estructura sólo de una pasta que incluya únicamente cemento.

Los áridos constituyen un elemento necesario en las estructuras de hormigón y reúnen entre un 60 y un 80% del volumen total del hormigón, el cual está integrado por material pétreo.

Por lo general, estos insumos se obtienen mediante la fragmentación de rocas más grandes de la corteza terrestre, ya sea por acción natural o artificial, en los que se obtienen partículas de diversos tamaños.

En modo general, se presentan algunos de los criterios para el uso de los áridos según H. Zabaleta (1988):

- Condición Física: Conformar la granulometría del árido, donde según su tamaño se define como arena o grava. La norma NCh 163⁷ califica como arena a aquel árido que pasa al menos un 95% de la abertura nominal de 5 [mm], mientras que la grava es aquel árido que es retenido al menos un 95% de la masa tamizada por dicha abertura⁸. Se reconocen también condiciones de contenidos de granos finos, forma de los granos y porosidad, pero no reflejan la intención de la investigación.
- Condición de Resistencia: La resistencia de un árido no resulta fácil de medir en forma directa, por lo que se utiliza el ensayo de abrasión mediante el método de desgaste de la Máquina de Los Ángeles, que está normada por la NCh 1369 y con otras normativas en el extranjero. La prueba estudia, a partir de la forma irregular de los áridos, la capacidad de resistir efectos ambientales y tensiones internas.

⁷ NCh 163: Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales.

⁸ Tanto la NCh como la ASTM establece tamices para definir características granulométricas tal como se aprecian en la tabla siguiente:

Norma	Arena						Grava						
ASTM [mm]	#100 0.15	#50 0.30	#30 0.60	#16 1.18	#8 2.36	#4 4.75	3/8" 9.5	1/2" 12.5	3/4" 19	1" 25	1 1/2" 38.1	2" 50	2 1/2" 63
NCh [mm]	0.16	0.315	0.63	1.25	2.5	5	10	12.5	20	25	40	50	63

- Estabilidad Química y Física: A fin de desarrollar un correcto fraguado es importante que la pasta generada no sea alterada por sulfatos u otros agentes orgánicos que resulten nocivos para el diseño final del hormigón. De igual modo se considera que sea capaz de soportar cambios ambientales importantes, tales como de temperatura o humedad, mediante la prueba de intemperismo que se establece en la NCh 1328⁹.

2.1.3.3 AGUA

En una primera etapa el hormigón tiene una consistencia de pasta, la que se debe a la presencia de agua, elemento que actúa de dos formas:

- Como agente de la hidratación del cemento.
- Fluidez al hormigón para su maleabilidad.

Existen ciertas condiciones para el agua que aparecen definidas en la NCh 1498¹⁰ las que pueden resumirse en las siguientes:

- El agua potable, de consumo humano, es adecuada para el uso.
- Uso de agua de mar se puede utilizar sólo si la resistencia del hormigón es inferior a 150[km/cm²].
- No está permitido el uso de agua con azúcares, glucosas o similares.
- Aguas con origen desconocido deben ser inspeccionadas. De igual modo si el contenido de sólidos disueltos resulta mayor que 5 [g/L], las aguas deben ajustarse a los requisitos químicos que se establecen en la normativa vigente.

A lo largo del territorio chileno, para el uso de aguas es importante conocer su composición, ya que en el norte tiende a contener mayor cantidad de sales disueltas, mientras que en el sur y centro contiene alta concentración de materias orgánicas.

En forma estándar, se calcula que existen, en una relación de 180[L] de agua por cada metro cúbico del hormigón donde está presente 4,93 [mg/L] de Na₂SO₄ (Sulfato de Sodio) disuelto en dicho volumen de hormigón (Zabaleta, H. 1988).

2.1.3.4 ADITIVOS

Los aditivos son compuestos que generalmente se utilizan en pequeñas cantidades, para modificar los atributos del hormigón pudiéndole entregar diversas cualidades tales como:

- Acelerar o retardar tiempo de fraguado,
- Aumentar la maleabilidad,
- Reducir agua requerida,
- Mejorar la resistencia en ataques de sulfato, entre otros.

La dosificación de los aditivos dependerá del objetivo que se desee, ya que éstos se encuentran recomendados por cada fabricante.

2.1.4 RELACIÓN AGUA CEMENTO

La relación Agua/Cemento, simplificada como *a/c*, se define como la relación entre el volumen de agua y el volumen de cemento. Este es un parámetro fundamental, ya que la resistencia final del hormigón dependerá inversamente de la relación *a/c*; esto es, a mayor resistencia del hormigón menor debe ser la relación *a/c*. La Figura 2 ejemplifica dicha relación:

⁹ NCh 1328, Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la desintegración – Método de los sulfatos.

¹⁰ NCh 1498. Of 82. Hormigón – Agua de amasado – Requisitos.

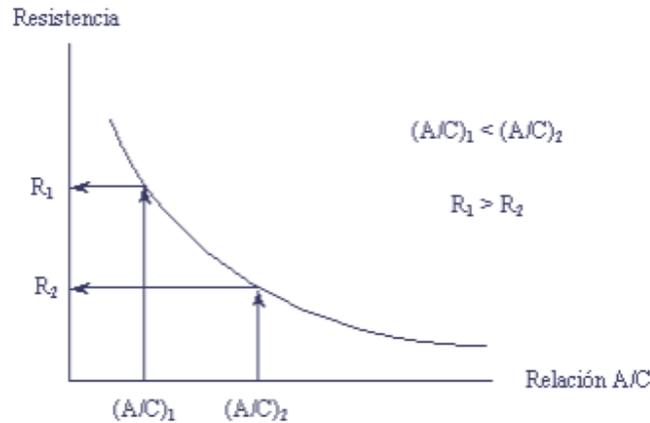


Figura 2: Relación Agua/Cemento.
Fuente: Documento explicativo de Cemento Melón.

La cantidad de agua debe ser siempre la menor posible para obtener un buen mezclado homogéneo del hormigón y también que sea disponible para transporte y colocación. Entre algunas de las empresas de hormigón del mercado chileno reconocen que la menor cantidad de agua permitirá que:

- El hormigón obtenga su resistencia con una menor dosis de cemento, dado que ésta está determinada por una relación a/c.
- Un menor riesgo de fisuración por retracción plástica¹¹, debido a una menor disponibilidad de agua evaporable.
- Reducir la porosidad generando un hormigón más resistente y durable.

Es importante un correcto cálculo, ya que dentro de las consecuencias más importantes en lo que respecta al diseño, resulta que por cada 3 litros de agua adicionales¹² se provoca:

- Disminución hasta 7 [kg/cm²].
- Disminución de la densidad en 5 [kg/m³].

2.1.5 RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

Una de las propiedades más importantes del hormigón es su comportamiento estructural, debido a su significativa resistencia en comparación a otros materiales como la madera, adobe u otros insumos naturales.

En su calidad de elemento estructural, el hormigón queda sometido frente a importantes solicitaciones, de manera que si se sobrepasa su capacidad se producirán fracturas que afectarán la seguridad de una estructura.

Para probar la capacidad de los diversos materiales estructurales, generalmente se utiliza ensayos a compresión y a tracción, correspondiente a tensiones normales. En una segunda etapa, además se realizan pruebas a corte¹³.

En nuestro país, el ensayo a compresión está normado por la NCh 1307 "Ensayo de Compresión de Probetas Cúbicas y Cilíndricas", mientras que en México la normativa

¹¹ La retracción plástica es común en las obras expuestas en zonas con alta radiación solar debido a la rápida evaporación de agua en la superficie, lo que resulta en grietas si los esfuerzos exceden la resistencia a tensión. Este efecto se reduce mediante sombras, rompe vientos o rociados de superficie, entre otras acciones.

¹² Referencias: "Uso de Agua en el amasado", Cemento Melón.

¹³ En Chile y en el mundo existen diversas normativas para las pruebas, pero por los fines de la investigación que consideran ensayo a únicamente a compresión.

utilizada es la M-MMP-2-02-004/04 "Resistencia a la compresión del Cemento Portland", las que no difieren significativamente una de otra, así como en relación a otras normativas del mundo.

Dentro de los elementos de interés en la prueba de resistencia a la compresión se tienen:

- Se establece una velocidad y carga máxima de aplicación, además de un tiempo mínimo que no debe presentarse la rotura.
- Carga centrada en la probeta de ensayo.
- Relación altura/diámetro de la probeta.
- Edad de la probeta.
- Curado realizado.

Frente al requerimiento de la edad de la probeta, es necesario considerar la influencia de la humedad sobre la resistencia del hormigón. Zabaleta, H. (1988, p 33) reconoce las experiencias por Bureau of Reclamation que consideran la resistencia del hormigón según humedad en el que se encuentran (ver Figura 3). De igual manera, el autor indica que no son aplicables para el territorio chileno.

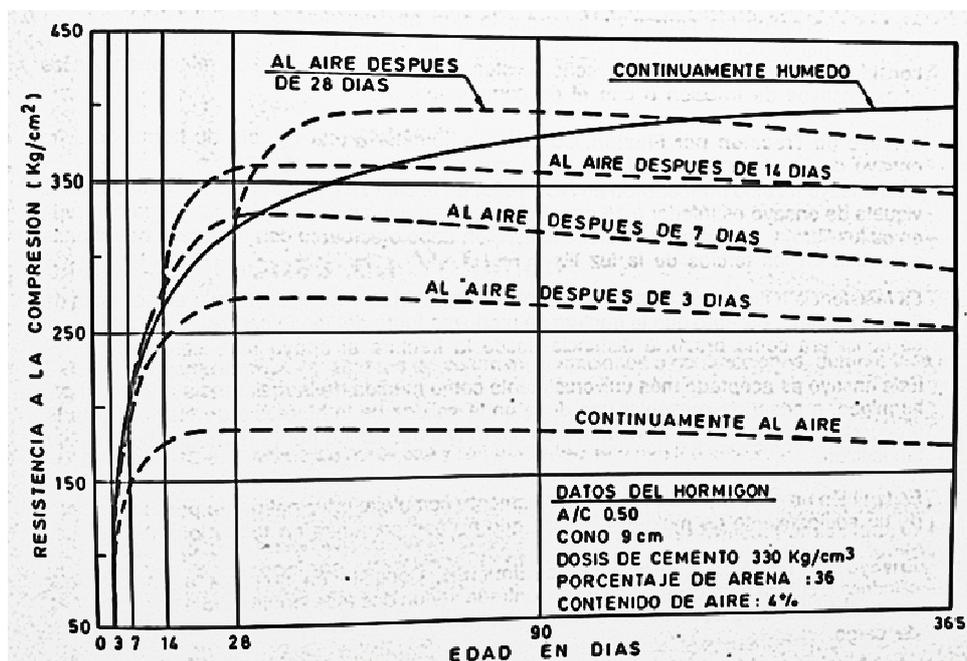


Figura 3: Influencia de la Humedad Ambiental sobre la Resistencia.
Fuente. H Zabaleta (1988)

La figura anterior permite observar la influencia que causa la humedad sobre el hormigón, por lo que un correcto manejo del hormigón mediante el "curado" o humedecer superficialmente el hormigón, una vez que este es colocado resultará fundamental para obtener una mayor resistencia.

2.1.6 ACCIONES Y EFECTOS SOBRE EL HORMIGÓN

Durante la vida útil del hormigón se experimentan diversas acciones que afectan la durabilidad y composición de éste. Es de este modo que existirán variaciones de volumen que finalmente afectarán la porosidad y durabilidad del hormigón, principalmente utilizado con fines estructurales.

2.1.6.1 VARIACIONES DE VOLUMEN.

Durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón, existen frecuentemente cambios de volumen principalmente por causas físicas y químicas, aunque estas no garantizan ser constantes pero sí consecuentes de los cambios de humedad (reacción hidráulica), temperatura (reacción térmica) y componentes atmosféricos principalmente por anhídrido carbónico (Reacción por carbonatación).

- Reacción Hidráulica: Si en el ambiente que lo rodea carece o abunda la humedad, el hormigón puede generar tensiones internas, debido al desecamiento de la capa superficial, lo que puede causar fisuras; o un aumento de volumen por la humedad en su entorno, respectivamente.
- Reacción Térmica: Ésta puede ocurrir por la temperatura, tanto del ambiente como interna, debido al proceso exotérmico del fraguado y endurecimiento de la pasta de hormigón, produciendo variaciones del volumen. Claro está que estos efectos pueden superponerse en zonas frías.
- Reacción por Carbonatación: Dentro de la pasta de cemento hay una porción de cal libre (que no participa en el proceso de fraguado) que es susceptible de combinarse con el anhídrido carbónico del aire, produciendo carbonato de calcio que tiene efectos contractivos. Aun cuando el espesor que puede afectar es pequeño, la zona interior a este puede quedar expuesta a efectos de tensión superficial posibilitado a fisurarse. La Figura 4 muestra las diferentes profundidades alcanzadas por carbonatación según la velocidad de intrusión.

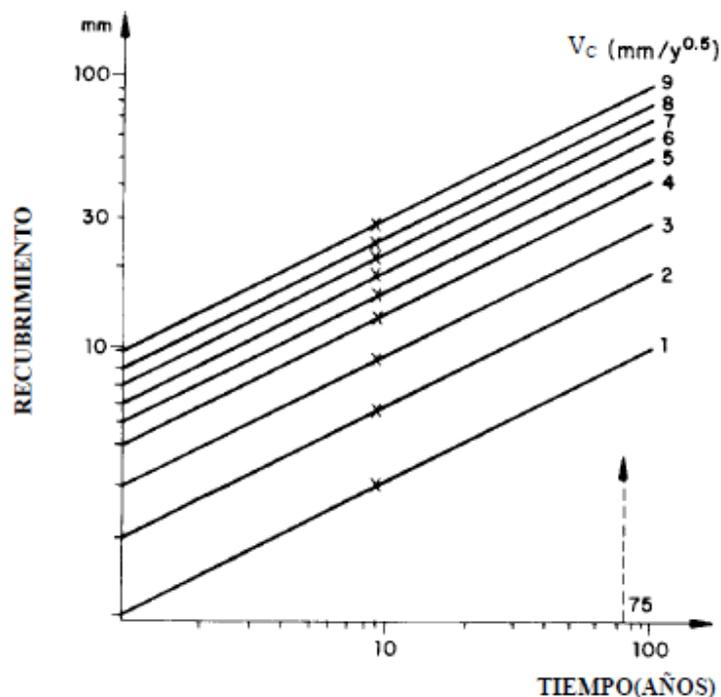


Figura 4: Modelo de raíz de tiempo de intrusión por carbonatación.
Fuente: GEOCISA S.A.

Con lo expuesto, es importante asegurar un adecuado curado de los elementos de hormigón, a fin de asegurar un cierto rango de humedad para evitar daños antes de la puesta en carga de los diversos elementos.

2.1.6.2 PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN

El hormigón es un elemento permeable, es decir, en el que ocurre escurrimiento de agua a través de él. Éste tiene un grado de escurrimiento de entre 10^{-6} y 10^{-10} [cm/s] (Zavaleta, H., 1988, p 43) que resulta catalogado como prácticamente impermeable¹⁴ en comparación a gravas gruesas y sueltas (10^1 a 10^5 [cm/s]) o a arenas muy finas o limosas (10^{-5} a 10^{-6} [cm/s]).

El agua puede escurrir mediante dos vías principalmente:

- Discontinuidades en la pasta de hormigón por poros y fisuras derivadas del agua introducida afectas a acción térmica.
- Porosidad existente en el contacto de material cementante con los áridos, donde el uso de una relación a/c baja y uso apropiado de áridos finos permitirá un buen relleno entre las partes de gravas que están presentes en el amasado.

2.1.6.3 DURABILIDAD DEL HORMIGÓN

En consecuencia, de los cambios de volumen, la permeabilidad del hormigón y otras variables de índole natural o artificial, se puede comprender que los elementos que afectan la durabilidad del hormigón se distribuyen en agentes físicos y químicos:

- Físicos: Acción de tipo ambiental y procesos erosivos.
 - o Ambientales: Afectos a cambios de temperatura y humedad:
 - Temperatura: Principalmente debido a ciclos alternativos, en especial en zonas donde toma al punto de congelación del agua produciendo hielo y deshielo.
 - Humedad: Principalmente a ciclos alternativos de saturación y secado de la capa superficial del hormigón, donde se produce un proceso degradante mediante los poros.
 - o Erosivos: aquellos que ocurren debido a la cavitación y abrasión sobre el hormigón:
 - Cavitación: Es un procesos que experimentan los materiales con el escurrimiento de agua a gran velocidad lo que, según la superficie de éste, puede producir un alto grado de vacío y vaporización del agua causando un efecto destructivo.
 - Abrasión: Ocurrido por el desplazamiento de materiales sólidos, debido al agua que arrastra principalmente material granular.
- Químicos: Afectarán principalmente a la resistencia inicial del hormigón, junto a efectos sobre los tiempos de fraguado. Pueden producirse por agentes internos y externos en el hormigón:
 - o Externos: Hay numerosos elementos que pueden producir ataques de diversa magnitud sobre elementos de hormigón, entre los que sobresale la acción salina y la radiación solar.
 - o Internos: Es posible la presencia de materia orgánica junto a compuestos reactivos, debido a una mala manipulación de los materiales del hormigón dentro del amasado.

2.1.7 HORMIGÓN ARMADO

El hormigón armado o reforzado es el resultado de la unión entre hormigón y barras de acero de refuerzo o armaduras. Esta combinación forma un elemento sólido que, a partir

¹⁴ Alarcón, Y. et al. "Ensayos de permeabilidad en materiales de baja permeabilidad compactados", 1999.

de ciertas características físicas, permite obtener mejores cualidades que al ser utilizados de manera individual.

Por un lado el hormigón presenta grandes resistencias a las sollicitaciones de compresión, mientras que es muy frágil a la flexión y la tracción. Por ello es que, el añadirle refuerzo mediante las barras de acero, resultará fundamental para su capacidad de carga o resistencia final.

Las barras de acero se encuentran dentro de la sección de hormigón y cuentan con una amplia variedad de diámetros y formas en el mercado, las cuales permiten variar su uso y densidad dentro de las estructuras.

2.2 EFECTOS DE AMBIENTES MARINOS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Dentro del campo de la ingeniería marítima resultará inevitable actuar frente a la acción de sales de mar en estructuras y además resultarán significativos los efectos por neblina o evaporación marina (Kumar, P., 2003). Es de este modo que inicialmente se debe considerar la salinidad del agua del mar y el entorno marítimo, y con ellos analizar sus efectos en el hormigón y en el acero refuerzo.

2.2.1 ENTORNO MARINO

2.2.1.1 EL AGUA DE MAR

La salinidad es una propiedad de un fluido que se concibe como la cantidad de sales disueltas en un volumen de agua. Dado que el agua contiene diversos minerales se utilizan métodos indirectos, tales como la conductividad, índice de refracción, entre otros, para determinar la salinidad.

El agua de mar está compuesta, en promedio, de un 96.52% de agua y un 3.49% de sustancias disueltas en ella. Dichas proporciones varían en relación a las latitudes y zonas cercanas a fuentes de agua continental. Dentro de las sales disueltas en el océano, el 99% representan iones de Cl, SO₄, Na, Ca, Mg y K, siendo el sodio y el cloruro los más abundantes (Webber y Thurman (1991).

La Tabla 5 muestra la composición normal de iones en el agua dulce y agua de mar.

Tabla 5: Composición de iones para agua dulce y de mar.

Fuente: Webber y Thurman (1991) y Kumar (2003).

iones	Agua Dulce [mg/L]	Agua Mar [mg/L]
Aniones		
CO ₃ ⁼	58.4	140
SO ₄ ⁼	12.2	27600
Cl ⁻	7.8	19440
Total	77.4	47180
Cationes		
Ca ⁺⁺	15	410
Mg ⁺⁺	4.1	1300
Na ⁺	6.3	10810
K ⁺	2.3	390
Total	27.7	12910

De igual modo, se puede clasificar el tipo de agua de acuerdo a la salinidad en ella según la Tabla 6:

Tabla 6: Clasificación de agua según salinidad.
Fuente: Webber y Thurman (1991).

Salinidad [g/L]	Tipo de Agua
0 – 0.5	Agua dulce
0.5 – 3.0	Agua salobre oligohalina
3.0 – 10	Agua salobre mesohalina
10 – 17	Agua salobre polihalina
17 – 30	Agua de mar oligohalina
30 – 34	Agua de mar mesohalina
34 – 38	Agua de mar polihalina
38 – 150	Salmuera
Mayor a 150	Hipersalina

De modo referencial, se presenta la Figura 5 que diagrama las diversas salinidades superficiales en el mundo.

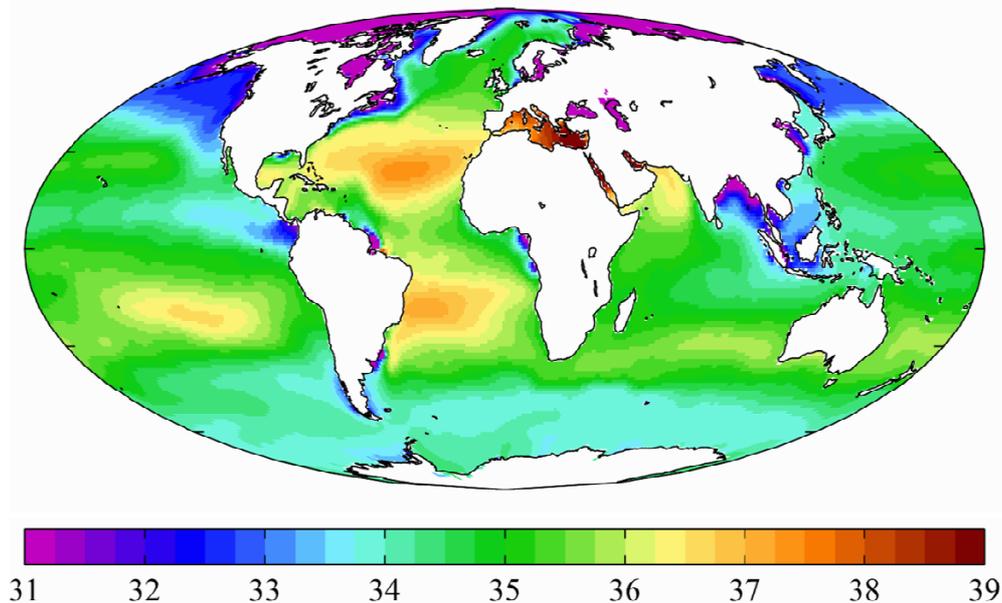


Figura 5: Salinidad del agua de mar superficial en el mundo.
Fuente: Atlas Oceánico Mundial (2001). Escala en PSU¹⁵.

La cantidad de sales afecta en forma directa a las propiedades del agua, en especial la densidad, viscosidad, tensión superficial, solubilidad de gases, entre otros, las cuales variarán tanto en la latitud y profundidad.

2.2.1.2 TEMPERATURA

La temperatura en superficie del agua, al igual que la salinidad, no es uniforme en todo el globo terráqueo, variando desde los -2°C en zonas frías, para alcanzar temperaturas superiores a los 30°C en zonas tropicales. Del mismo modo, en un mismo lugar, la

¹⁵ PSU: Unidad Práctica de Salinidad. 1 [PSU] equivale a 1 [g/L] o 0,1% de sales solubles. En el presente caso indica, por ejemplo, 35 [PSU] = 35 [g/L] = 3,5%.

temperatura y salinidad van variando a medida que cambia la profundidad como es observado en la Figura 6.

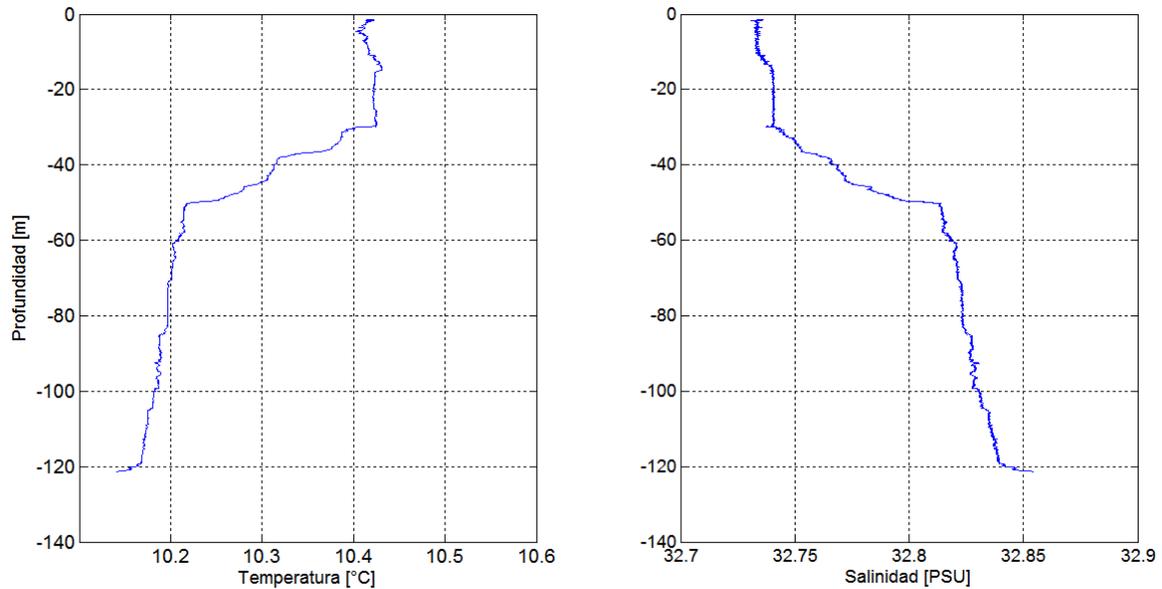


Figura 6: Perfil de Temperatura y Salinidad frente a las costas de Valparaíso.
Fuente: Elaboración Propia.

Fookes et al (1988, p 115) clasifican el clima mundial en 4 grupos: frío (con temperaturas de congelamiento en el agua), templada (promedios anuales entre 10 a 20[°C]), caliente y seco (sectores sobre 45[°C] en el ambiente y escasa lluvia), y finalmente caliente y húmedo (zonas tropicales y que no exceden en promedio los 30[°C]). En dicho estudio, a partir de 10 años de observaciones, se determinó que el mayor deterioro ocurre en zonas calientes, tanto húmedas como secas.

2.2.1.3 MAREAS Y OLEAJE

Producto de los cambios de nivel del mar, debido a la acción astronómica sobre las masas de agua, se presentará una mayor carga química del agua sobre las estructuras de concreto, haciendo variar en un rango de 6 a 12 horas en las zonas húmedas o sumergidas de una estructura en contacto con el agua de mar.

Finalmente, esto se incrementa tanto por efectos de oleaje y tormentas, que generan mayores perturbaciones sobre la sección de una estructura, tal como se aprecia en la Figura 7.

2.2.1.4 OLEAJE, NEBLINA Y ROCÍO

Principalmente en verano, la costa será afectada a altos niveles de radiación y, por ende, habrá una mayor evaporación de la capa superficial de agua. A medida que ésta ocurre, se generará una neblina que incursionará a través de los poros del concreto, pudiendo afectarlo tanto a éste como al acero de refuerzo.

De igual modo, el rocío causado por la acción del oleaje al entrar en contacto con aire y calor, podrá transformarse en una neblina que se ajustará a la descripción anterior.

2.2.1.5 PERIODOS GLACIALES Y ORGANISMOS MARINOS

Si bien se reconocen efectos en el hormigón causados por el hielo y organismos marinos, no son parte de esta investigación.

Dentro de las observaciones importantes a destacar bajo análisis práctico se tiene que:

- El impacto de masas de hielo podrá generar considerables pérdidas de la superficie del concreto debido a la abrasión que éste generará. Investigaciones de campo desarrolladas en Helsinki indican pérdida de 30 [cm] durante 30 años de exposición (Kumar, P. 2003).
- La presencia de moluscos o algas que típicamente se encuentran en estructuras sumergidas - los que se adhieren por la porosidad del hormigón - podrá afectar debido al carbonato de amonio y ácido sulfúrico que es altamente corrosivo al concreto y acero de refuerzo. De igual manera con lo anterior aún no se analiza el efecto extra a las cargas por efecto hidrodinámico sobre la estructura de concreto (Kumar, P. 2003). El Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) reconoce que la profundidad de las incrustación de organismos en estructuras de hormigón puede alcanzar hasta los 30 [cm] en zonas de intermareal.

En resumen, son múltiples los posibles procesos de deterioro que pueden afectar a estructuras de hormigón en ambientes salinos, como se señala en la Figura 7.

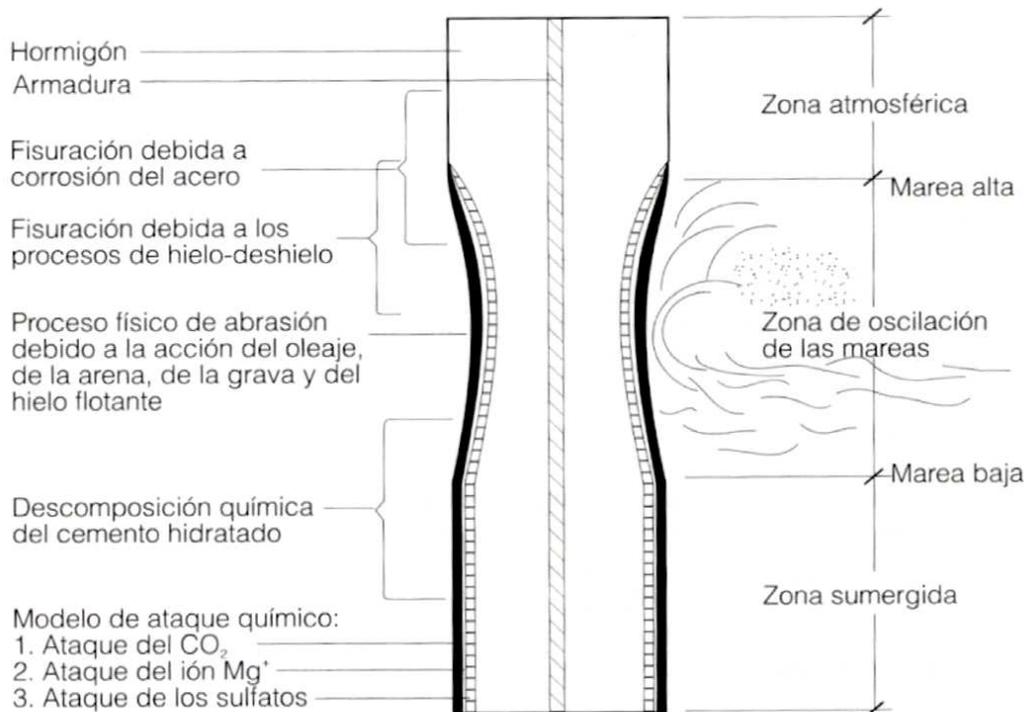


Figura 7: Procesos de deterioro en estructuras de hormigón.

Fuente: IECA

2.2.2 PROCESO DE CORROSIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO

Con frecuencia la corrosión en estructuras de hormigón armado es causa de graves daños en obras, provocando principalmente una menor resistencia y disminuyendo la vida útil de la estructura siendo causa habitual el intemperismo ambiental.

Cuando se presenta una alta concentración de cloruros, tal que la alcalinidad del concreto no es lo suficientemente grande para proteger el acero, se hará presente el inicio de un proceso de corrosión sobre las barras de acero de refuerzo. De igual modo frente al inicio

de fisuras o grietas en estructuras de hormigón armado se da pie para permitir la intrusión de agentes patógenos al acero de refuerzo.

Como fue descrito con anterioridad, los continuos cambios de volumen, densidad y con ellos factores de porosidad, además de la relación a/c producen una distinta penetración de cloruros, donde la relación a/c es proporcional a la penetración de cloruros. Es decir, mayor relación a/c (un hormigón menos denso) generará una mayor penetración de cloruros (Molina, F. et al, 2009).

La armadura al interior del hormigón sufrirá una doble capa protectora dentro del hormigón, inicialmente por la capa de hormigón (recubrimiento) que posee antes de estar expuesto a la superficie, además de la alcalinidad que se forma debido a la fase acuosa del hormigón que forma una capa de óxidos microscópica a la que se puede llamar "capa pasivante"¹⁶ (ver Figura 8).

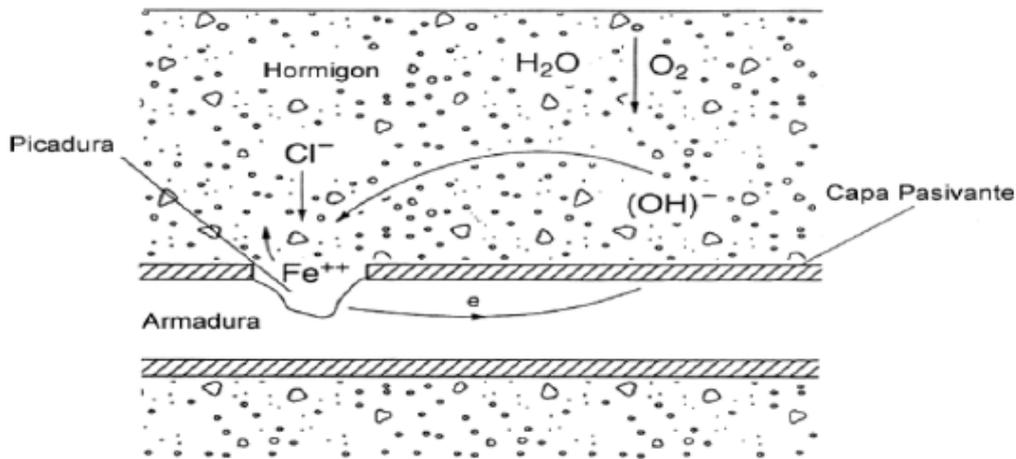


Figura 8: Diagrama de la destrucción de capa pasivante por efecto de cloruros.
Fuente: Molina, F. et al (2009).

La capa pasivante imposibilita la corrosión ya que impide la disolución del fierro en zonas anódicas, siempre que no esté presente la acción de cloruro. Esta capa se mantendrá estable mientras se mantenga un alto pH (superior a 12) en la pasta de hormigón, sin acción de ácidos o carbonatación.

2.2.3 FACTORES QUE INFLUYEN AL PROCESO DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

La armadura de refuerzo compuesto por barras de acero puede ser afectada en entornos marinos, como fue descrita en forma anterior, por la difusión de cloruros a través de los poros que se presentan en el proceso de hormigonado, por lo que una de las soluciones prácticas para evitar este efecto es mediante el aumento del recubrimiento y la reducción de la porosidad.

¹⁶ Fuente: Laboratorio de Materiales, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad de Colima, México.

2.2.3.1 ESPESOR DE RECUBRIMIENTO

La intrusión de agentes patógenos por el hormigón varía en forma proporcional al tiempo, por lo que un aumento del recubrimiento permitirá aumentar el tiempo antes que éstos afecten a las barras de acero.

Molina F. et al (2009, p.14) indican que esta relación de penetración es al cuadrado del tiempo, es decir, una reducción a la mitad del recubrimiento provocará que, principalmente los cloruros, alcancen el acero de refuerzo en una cuarta parte del tiempo. Si bien hay diversas recomendaciones de recubrimiento, los rangos se distribuyen entre 7 a 9 [cm] en ambientes agresivos, mientras que en estructuras tradicionales van de 3 a 6 [cm].

2.2.3.2 PERMEABILIDAD DEL RECUBRIMIENTO

Un adecuado curado y una relación a/c baja permitirán reducir la porosidad y con ello la permeabilidad del hormigón.

Una relación alta de a/c provocará una alta porosidad capilar del hormigón, mientras que el curado evitará el secado prematuro y se evitarán tensiones superficiales del hormigón.

2.2.3.3 LOCALIZACIÓN DE LAS ARMADURAS

Aun cuando está presente el espesor del recubrimiento, la distribución de la armadura es relevante debido a que puede ocurrir que la separación entre las barras provoque que la corrosión de una afecte a la otra. Es de este modo que se debe considerar la profundidad, geometría y recubrimiento, analizando una sección del hormigón y la distribución de la armadura.

2.3 INTEMPERISMO ACELERADO

2.3.1 DEFINICIÓN

La metodología del “Intemperismo Acelerado” o de “Desintegración de los Áridos mediante Sulfatos” es un procedimiento que permite determinar la degradación esperada de los áridos mediante sulfato de sodio o sulfato de magnesio para áridos que se utilizan en la elaboración de hormigones y que contemplen una densidad real de entre 2.000 a 3.000 [kg/m³].

El ensayo de intemperismo acelerado consiste en someter a varios ciclos de saturación y secado diferentes tamaños de agregados en el sulfato adecuado y, en forma posterior, medir la diferencia de masa antes y después de haber realizado este tratamiento.

La desintegración que se obtiene, permite determinar la susceptibilidad de los áridos a los agentes agresivos tales como lluvia, heladas, cambios de temperatura, entre otros.

Dentro de las pruebas realizadas en el mundo, no solo se desarrolla la prueba de intemperismo mediante sulfato de sodio, ya que también se presentan ensayos de humedad, temperatura y radiación solar mediante cámaras QUV a través de entornos de luz¹⁷.

Se puede hablar también de intemperismo como una meteorización, fenómeno que describe la descomposición de minerales y rocas cuando entran en contacto con la atmósfera, hidrósfera y biósfera¹⁸, ya que se estará ejerciendo una acción tanto física como química, mediante las siguientes consideraciones:

- Acción Física: Relacionada con la Haloclastia, esto es, la rotura de áridos por acción de la sal que se incrustará en los poros y fisuras de las rocas, que luego al

¹⁷ Mayor información www.q-lab.com

¹⁸ Chorley, R., et al, 1984, “Geomorphology”, p 605. Inglaterra.

recristalizar y aumentar su volumen generará un aumento en la presión de las paredes internas, provocando la ruptura.

- Acción Química: Como consecuencia de la Hidratación; donde el sulfato de calcio al hidratarse genera un aumento de volumen.

2.3.2 NORMATIVAS DE APLICACIÓN

La prueba es ampliamente aplicada en los diversos laboratorios de áridos investigados y las normativas son similares en su aplicación, teniendo como referencia la ASTM como cabeza de las diversas normativas¹⁹.

Para efectos de la investigación presente se utiliza la M-MMP-4-04-008/03: “Intemperismo Acelerado de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas” de la SCT que propone la acción de una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) o una de sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en una relación de 350[g/L] o 1400 [g/L], respectivamente, diluidos en la que se colocan las muestras de áridos.

La normativa establece que de una selección de áridos tamizados, se procede a una mezcla de agua y sulfato a elección, siendo una alta concentración en comparación a una solución como agua de mar o entornos naturales.

Entre las normativas que describen el ensayo de Intemperismo Acelerado a muestras de áridos se encuentra la NCh 1328 y la ASTM C88, además de la norma mexicana mencionada.

2.4 ESTADO DEL ARTE

La acción de efectos químicos, más que mayormente salinos, en las estructuras se ha manifestado principalmente desde la primera revolución industrial (siglo XVII) con la llegada de las primeras máquinas de combustión que con la acción conjunta de minerales, como el carbón, y el calor dieron el pie inicial de generar movimiento a las nuevas invenciones capaces de satisfacer los insumos y necesidades requeridos por el hombre.

Está en elaboración, al menos en Chile, la normativa para cementos especiales tales como resistentes a sulfatos y cementos de bajo calor de hidratación (Cementos Bío Bío), pero lo que respecta a una normativa de diseño en ambiente salino, al menos en Chile, no existe una dictada salvo por recomendaciones internacionales.

2.4.1 RECOMENDACIONES BIBLIOGRÁFICAS

En función a los objetivos que se presentarán en la siguiente investigación, son dos los datos de interés sobre el estudio de salinidad sobre estructuras de hormigón: Relación a/c y el recubrimiento necesario.

2.4.1.1 RELACIÓN AGUA/CEMENTO

La tendencia en la bibliografía revisada indica que es recomendable una relación a/c lo más baja posible, incluso menor a 0.45. La NCh 170, Hormigón – Requisitos Generales, indica la Tabla 7:

¹⁹ La presente investigación utiliza la norma Mexicana M-MMP-4-04-008/03: “Intemperismo Acelerado de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas” ya que es la que distribuye el laboratorio de la Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad de Colima, México. Comparaciones posteriores con otras normativas no distinguen importantes diferencias.

Tabla 7: Requisitos para hormigón expuesto a soluciones que contienen sulfatos.
Fuente: NCh 170.

Exposición a Sulfato	Sulfato soluble en agua (SO₄) en el suelo, porcentaje por peso	Sulfato (SO₄) en el agua (mg/L)	Hormigón con áridos de peso normal. Razón máxima de a/c, por peso
Despreciable	0,00 – 0,10	0 – 150	-
Moderada	0,10 – 0,20	150 – 1500	0,5
Severa	0,20 – 2,00	1500 – 10000	0,45
Muy Severa	Más de 2,00	Más de 10000	0,4

De igual modo indica que una relación a/c debe ser menor a la indicada según se desee mayor impermeabilidad del hormigón o como protección a la corrosión. Junto a lo anterior señala que el agua de mar se considera como una exposición moderada.

La normativa indica que para estructuras expuestas en ambientes salinos, la relación debe ser 0,4 en secciones delgadas y/o con recubrimiento menor a 2 [cm], o bien 0,45 para toda otra estructura.

La American Concrete Institute, ACI, en su documento ACI 318²⁰ indica una relación de a/c no superior a 0,4, además de máximo de iones de cloruro solubles de agua contenido de 0.15% del peso del cemento.

2.4.1.2 RECUBRIMIENTO

La NCh 430, Requisitos de Diseño y Cálculo, indica que en la protección del acero de refuerzo se deben considerar las condiciones ambientales y el vaciado del hormigón.

La normativa chilena considera al entorno marítimo como una acción severa sobre la estructura, además de que el recubrimiento es necesario para entregarle protección a la armadura contra la corrosión.

Refiriéndose para la presente investigación solo al hormigón vaciado en obra, de la tabla 7.7.1 de la normativa (NCh 430, p. 10) se concluye que si el hormigón está colocado contra el suelo y permanentemente expuesto, se debe utilizar un recubrimiento de 7 [cm] del hormigón con el acero de refuerzo, mientras que si está expuesto al suelo o al aire libre se ajustará entre 5 [cm] para barras de diámetro superior a 1.8 [cm] y de 4 [cm] para barras inferiores a 1.6 [cm] de diámetro. De igual modo señala que para elementos prefabricados el recubrimiento varía de 3 a 5 [cm], mientras menor sea el diámetro del acero de refuerzo.

La ACI-318 propone valores similares de recubrimiento a la normativa chilena, cambiando solo de un recomendado de 7.5 [cm] cuando es vaciado directamente y exposición permanente al suelo.

El documento guía ACI-357, Diseño y Construcción de estructuras de concreto fuera de la costa, propone tres tipos de recubrimiento en zonas marítimas: 5,0 [cm] para zonas que confluyan efectos atmosféricos sin acción de neblina salina; 6,5 [cm] en zonas de rompiente y acción salina por neblina; y finalmente 5 [cm] en zona sumergida. Dichos valores son aumentados a 7,5, 9,0 y 7,5 [cm], respectivamente, para estructuras post tensadas.

De igual modo la FIB²¹ propone que el recubrimiento debe ser de 5 [cm] en zonas sumergidas y 7.5 [cm] en zonas de rotura y zona atmosférica, mientras tanto que las

²⁰ ACI 318: “Requisitos de reglamento para concreto estructura”, 2005.

recomendaciones de Gran Bretaña, por el código del Departamento de Energía, propone recubrimientos menores a las FIB (Kumar, P. 2003, p. 144).

2.4.2 ESTUDIOS DE INTERÉS

Intemperismo o meteorización es la alteración de los materiales rocosos expuestos al aire, la humedad y al efecto de la materia orgánica; puede ser intemperismo mecánico o de desintegración, y químico o de descomposición, pero ambos procesos, por regla general interactúan. Las variaciones de humedad y temperatura inciden en ambas formas de intemperismo toda vez que afectan la roca desde el punto de vista mecánico y que el agua y el calor favorecen las reacciones químicas que la alteran.

Distintos factores ambientales físicos y químicos atacan a las rocas y las cuartean, disgregan y descomponen. Según el carácter de los factores que produzcan la meteorización se distinguen la meteorización física y la meteorización química.

La Tabla 8 indica la capacidad resistente de algunas rocas. Si se compara la acción con el hormigón, se aprecia en la Tabla 8 que es menos resistente, pero no es de olvidar que parte importante de los componentes del cemento se basan en fuentes rocosas.

**Tabla 8: Resistencia de algunas rocas en [kgf/cm²].
Fuente. Duque-Escobar, G. (2003)**

Roca	Compresión	Tracción	Corte
Arenisca	150 - 500	10 - 30	50 - 150
Caliza	400 - 1400	30 - 60	100 - 200
Granito	1000 - 2800	30 - 50	150 - 300
Basalto	2000 - 3500	-	-
Mármol	800 - 1500	-	-
Hormigón	250 - 400	22 - 40	10 - 30

Teniendo en consideración que el hormigón cuenta en su diseño con parámetros de seguridad bastante altos sobre la carga de diseño que contiene, la pérdida de capacidad de carga en su contorno - como se ha descrito debido a tensiones superficiales -, se ha considerado, según la investigación desarrollada, prácticamente despreciable.

Ahora bien, el efecto de la intrusión de los agentes patógenos al acero de refuerzo es de mayor interés debido a que la acción de acero permite al "hormigón armado" percibir mayores y diversas combinaciones de carga, generando una estructura altamente superior.

El hormigón armado contiene en su volumen casi un 80% de material granular (arenas y gravas) y sobre la base de la ya existente prueba de intemperismo acelerado se asume que será correcta la aplicación de la prueba a una estructura de hormigón.

Realizar al hormigón la prueba de intemperismo mediante la acción de Na₂SO₄, permitirá reproducir la acción de agentes patógenos, estimando principalmente la variación química y física en la estructura interna de la pasta fraguada.

Alrededor del mundo se han desarrollado diversos estudios para analizar los efectos del hormigón en ambientes salinos, principalmente en los efectos del acero de refuerzo debido a la acción química, pero en una escala de tiempo real y no con efectos acelerados.

²¹ Fédération internationale du Béton / Federación Internacional del Concreto: www.fib-international.org

En el 2006, García, et al²², desarrollaron un estudio para determinar el comportamiento de hormigón con armaduras en aguas del río Paraná (Argentina), mediante una experiencia en que se expusieron hasta 14 meses en dicho afluente. Luego de la prueba, se concluyó que no hubo pérdida de masa en la armadura ni erosión superficial de los cilindros de hormigón en los que se encontraba inserto el acero de refuerzo.

Reveco, et al²³, en el documento de evaluación a columnas de hormigón del muelle Guardiamarina Riquelme de Iquique (Chile), señala principalmente la presencia de "Corrosión Marina" reflejada en manchas de color óxido, de carbonatación, sectores con armadura expuesta, entre otros, además de fallas de tipo constructivas (ver Figura 9). Del mismo modo, indica que parte de las estructuras afectadas son juntas de hormigón que presentan corrosión local y que coinciden con la zona intermareal. El documento concluye que principalmente la situación actual puede ser efecto de falta de inspección o mala ejecución de la obra.



Figura 9: Columna afectada por "corrosión marina".
Fuente: Reveco, et al.

Skalny, et al,²⁴ comenta en su documento que la presencia de aguas con agentes químicos no solo puede afectar en la superficie al hormigón, sino que - según la concentración que éste posea- , además de la permeabilidad del hormigón, puede afectar tanto la zona de contacto como la composición interna según la velocidad que del flujo en el interior del hormigón, sin incluir la acción de posible de áridos o componentes del hormigón contaminados. Del mismo modo la acción de Na_2SO_4 , en una solución 0.5 molar²⁵, encontrándose en una pasta de hormigón resistente a sulfatos provocó una penetración de 1.1 [mm] en 6 meses mientras que en cemento tradicional y con una solución a la mitad que la anterior se generó una intrusión de entre 0.5 a 1.0 [mm].

Dado que la formación del hormigón es un proceso continuo debido a que éste tiene un endurecimiento a lo largo de su vida útil, los espacios de poros a lo largo pueden ir variando como así también los esfuerzos en su zona superficial. Skalny indica que en la zona superficial en estructuras de hormigón, en altas concentraciones de sulfato,

²² García, E, et al, "Comportamiento de barras de acero en hormigones en aguas de Río Paraná", Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.

²³ Reveco, J, et al, "Curso de Corrosión en estructuras de hormigón armado", Chile, 2010.

²⁴ Skalny, J, et al, "Sulfate Attack on Concrete", 2003.

²⁵ Una solución 0.5 M de Na_2SO_4 corresponde aproximadamente a 71 [g/L].

generará expansiones provocando micro grietas y pérdida de capacidad de unión asociada a la descalcificación, situación que ocurre en cementos con concentraciones bajas de C3A.

De igual modo, si se analiza que en presencia de evaporación de agua sulfatada en la superficie porosa del hormigón (un similar efecto de rocío o neblina, pero en un alta concentración) se puede presentar cristalización de las sales en la superficie. La cristalización a su vez generará presión que será mayormente desfavorable en temperaturas que se encuentren encima de los 32 [°C] y con la estructura en contacto con el agua (Skalny et al).

Por lo general, el daño al concreto por ataques de sulfatos logra reducirse con un cemento con alto contenido de escoria sobre la mezcla tradicional del Portland ordinario. Por otra parte, los cementos que contienen puzolanas no generan diferencias significativas en respuesta a ataques en comparación al Portland ordinario. Ahora bien, hay que destacar que el uso de cemento corriente tiene fraguados más rápidos que los con mayor contenido de puzolana o bien de mayor dureza en comparación a cementos sulfato resistentes (Skalny, et al).

Finalmente, se reconoce que se están desarrollando estudios en la Prefectura de Niigata (Japón) sobre efectos salinos en estructuras de hormigón a escala muy similar a la realidad, tanto en dimensión de elementos, rocío, zonas sumergidas, entre otros²⁶.

2.4.3 INNOVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Presente la acción física-química del agua de mar en estructuras, se propone el desarrollo de una prueba de desgaste al hormigón simulando el efecto marino mediante la prueba de intemperismo acelerado sobre la base de las siguientes justificaciones:

- **Concentración de Solución:** Las pruebas indicadas por Skalny et al, se desarrollaron con una mezcla de 71 [g/L] de Na₂SO₄. Mediante la propuesta de intemperismo se aplicará una carga 5 veces mayor a la de los ensayos propuestos, y a su vez mucho más alta que la concentración en el agua de mar.
- **Simulación Niebla-Rocío:** Siguiendo los ciclos de humedecido y secado, la estructura será expuesta al aire libre, promoviendo la evaporación de la capa superficial y con ello la intrusión al interior del hormigón.
- **Recubrimientos variables:** Se propone el uso de diversos recubrimientos: 3, 5 y 7 [cm] en varillas de 3/8" en estructuras de hormigón armado.
- **Diversidad de Cemento:** Para la prueba se utilizarán dos tipos de cemento: Ordinario y Sulfato-Resistente a fin de comparar y estimar sus beneficios y/o acción perjudicial en el uso de obras marítimas.

²⁶ Hay investigaciones preliminares de efectos salinos en las estructuras de hormigón, pero son similares en conclusión a reportes chilenos.

3 OBJETIVOS

Los objetivos propuestos en el Proyecto de Título son:

3.1 GENERAL

- Determinar la variación (pérdida o ganancia) de capacidad de carga debido a acción salina en estructuras de hormigón y en las barras de acero de refuerzo.

Sobre la base del objetivo principal, a través de una aproximación, y utilizando la prueba de intemperismo acelerado que sustituirá la acción salina, se busca determinar variaciones de resistencia en estructuras de hormigón, considerando también los efectos sobre acero de refuerzo.

3.2 ESPECÍFICOS

- Analizar los efectos de la salinidad en las estructuras de hormigón, mediante intemperismo acelerado.

Para cuantificar pérdida de capacidad de carga en condiciones similares al proceso natural de elementos de hormigón, se utilizará la metodología de intemperismo acelerado para analizar variaciones de masa, volumen y finalmente, como valor determinante, la resistencia que obtiene el hormigón afectado en acción salina.

- Analizar los efectos de la salinidad mediante intemperismo acelerado en barras de acero de refuerzo.

Comprobar el efecto de la salinidad en acero de refuerzo, mediante diferentes recubrimientos propuestos, en vigas de hormigón armado, lo que permitirá determinar variaciones en la resistencia.

4 METODOLOGÍA

4.1 LOCALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se realizó en el Laboratorio de Materiales²⁷ de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad de Colima (UCOL), ubicada en Manzanillo, Estado de Colima, México (Figura 10).

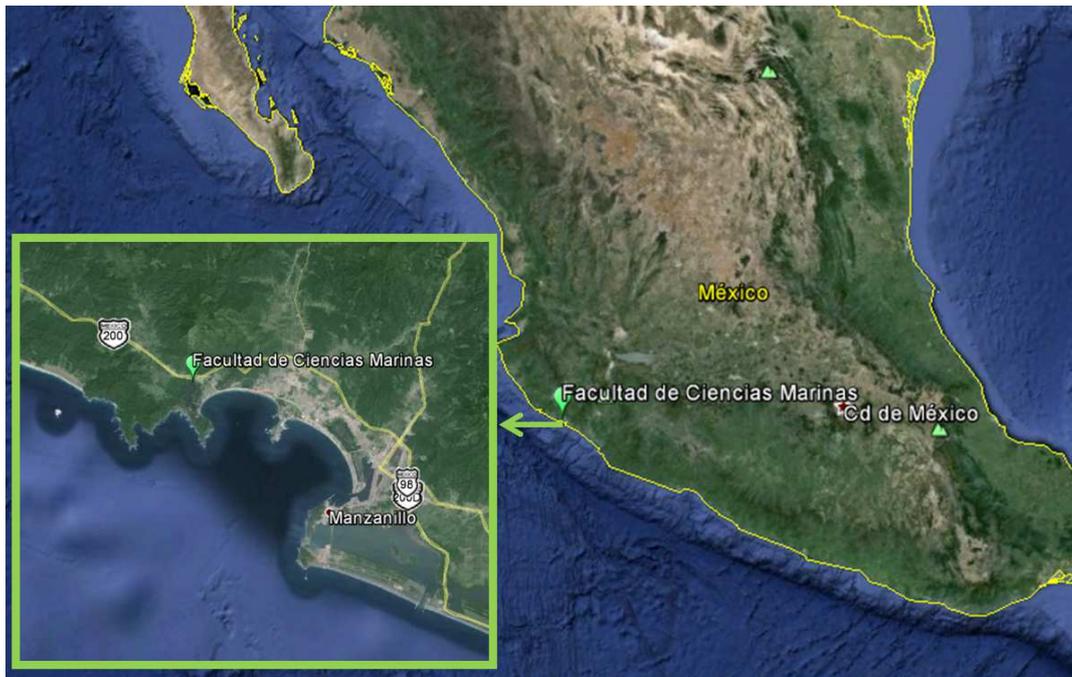


Figura 10: Ubicación de Facultad de Ciencias Marinas, UCOL.
Fuente: Google Earth.

El período en que se realizó desde el 1 de noviembre al 20 de diciembre de 2011, correspondiente al periodo de primavera-verano, cuyas temperaturas oscilan entre los 25 a 35 [°C] en el día y entre 20 a 25 [°C] en la noche.

4.2 MATERIALES Y EQUIPOS

4.2.1 CEMENTOS UTILIZADOS

Considerando que la experiencia supone elementos comparativos, se utilizan dos tipos de cemento de la empresa "HOLCIM APASCO", de la planta de Tecomán, Estado de Colima, México, la que abastece el mercado local y nacional, en especial de la costa pacífico de México. En función a los objetivos propuestos, se utiliza el CPC 30R y CPC 30 RS BRA de la empresa anteriormente mencionada.

²⁷ El Laboratorio de Materiales es administrado por la carrera de Ingeniería Oceánica de dicha casa de estudios, siendo su laboratorista la Ing. Cecilia Chávez.

4.2.1.1 CPC 30R

Uno de los cementos a utilizar es el CPC 30R, que es considerado como el cemento ordinario o clásico, siendo descrito como de resistencia rápida y de uso preferente en losas, columnas, viviendas generales, edificios de baja altura, elementos prefabricados, entre otros.

Su presentación para la distribución es tanto en saco como a granel, por lo que es accesible en el mercado tradicional.

Dentro de las características que indica el fabricante señala:

- Adecuado para la construcción de edificación general debido a buen desempeño del fraguado y resistencia.
- Compuesto con un estricto control de calidad y uniformidad de la mezcla.

Se dispone de la Figura 11 sobre resistencia a la compresión que entrega el fabricante.

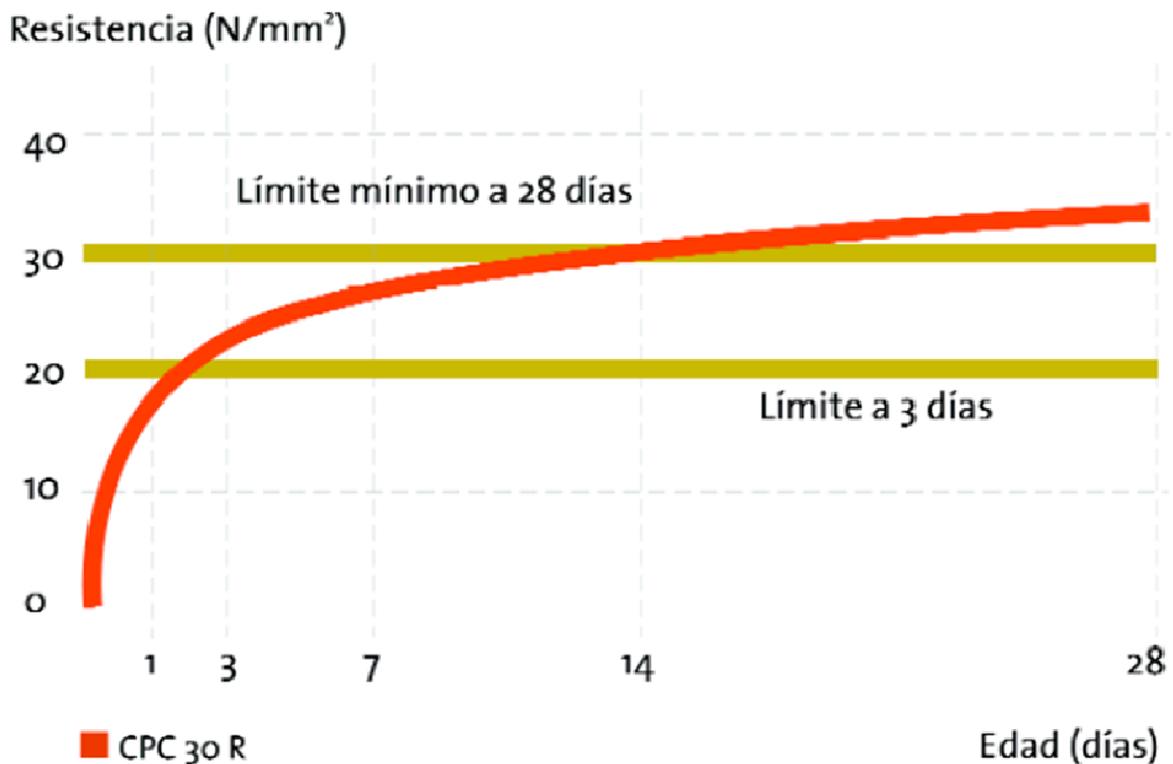


Figura 11: Resistencia a la compresión del CPC 30R.
Fuente: Holcim Apasco.

4.2.1.2 CPC 30 RS BRA

Dado que parte de la investigación es un estudio comparativo, se utiliza también el cemento CPC 30 RS BRA que, a diferencia del CPC 30R, cuenta con resistencia a sulfatos y es de baja reactividad Álcali-Agregado²⁸, siendo recomendado principalmente para estructuras y elementos en ambientes agresivos, tales como plantas de tratamiento

²⁸ La reacción álcali-agregado se manifiesta en forma de fisuras en la masa del concreto debido al aumento de volumen que la caracteriza, propiciando el deterioro de las estructuras y posteriores daños a mayores cargas (Osorio, J. 2013)

de agua, tubos de drenaje, muelles y postes, pilas y pilotes de concreto en ambiente costero.

Su distribución en el mercado es únicamente a granel desde la planta Tecomán, siendo caracterizado por:

- Alta resistencia a sulfatos.
- Gran durabilidad a elementos y obras de concreto.
- Permitir el empleo de agregados reactivos o potencialmente reactivos en la producción de hormigón debido a su baja reactividad álcali-agregado.

Junto a lo anterior, la Figura 12, entrega por la empresa, indica que el cemento CPC 30RS BRA tiene una menor expansión frente a cementos corrientes.

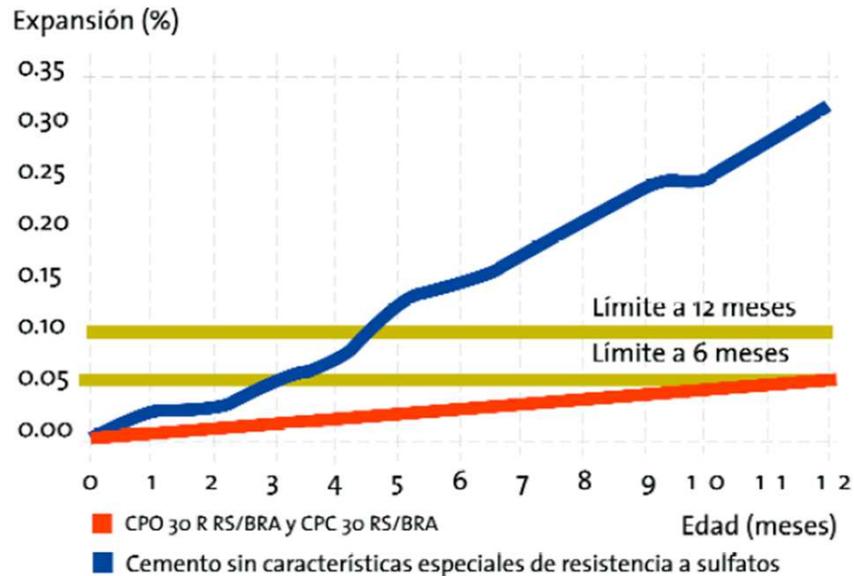


Figura 12: Resistencia al ataque de los sulfatos.
Fuente: Holcim Apasco.

4.2.2 ÁRIDOS

Los áridos utilizados en la experiencia fueron facilitados por la empresa constructora "Areka Construcciones S.A. de C.V."²⁹, que se encontraba desarrollando una obra en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Marinas de la UCOL, contando con excedentes de arena y grava (ver Figura 13 y Figura 14).

²⁹ Junto con mencionar a Areka Construcciones S.A de C.V., agradecer al ing. J. Manuel Velásquez Enríquez quien colaboró con parte de los insumos en la investigación.



Figura 13: Grava utilizada.
Fuente: Propia.



Figura 14: Arena utilizada.
Fuente: Propia.

Considerando que la arena y grava son de uso en obras civiles no se desarrollan estudios profundos a los elementos, limitándose a una granulometría para apoyar el diseño de la mezcla del hormigón considerando un cálculo por volumen.

El tamizado se desarrolló con una tamizadora eléctrica modelo PIFI 2010 (ver Figura 15), la cual agita las muestras por periodos de 5 minutos.



Figura 15: Tamizadora PIFI 2010.
Fuente: Propia.

Los resultados de la tamizadora son presentados en la Tabla 9 y Tabla 10³⁰:

Tabla 9: Granulometría de Grava.
Fuente: Elaboración Propia.

Designación	Abertura [mm]	Retenido (%)	Porcentaje que pasa
1"	25	0.00%	100.00%
3/4"	19	26.29%	73.71%
1/2"	12.5	49.19%	24.52%
3/8"	9.5	17.29%	7.23%
1/4"	6.3	6.01%	1.22%
N°4	4.75	1.03%	0.20%
Tamiz		0.20%	0.00%

Tabla 10: Granulometría de Arena.
Fuente: Elaboración Propia.

Designación	Abertura [mm]	Retenido (%)	Porcentaje que pasa
N°4	4.75	9.52%	90.48%
N°14	2	49.46%	41.02%
N°20	0.85	10.53%	30.49%
N°40	0.425	17.08%	13.42%
N°60	0.25	8.70%	4.72%
N°100	0.15	3.19%	1.52%
N°200	0.075	1.37%	0.15%
Tamiz		0.15%	0.00%

³⁰ Granulometría realizada según norma M-MMP-4-04-002/02 "Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas".

La información adicional de los áridos para el cálculo de la mezcla fue informada por dicha empresa constructora y son presentados en una sección posterior.

4.2.3 ACERO DE REFUERZO

La norma mexicana garantiza que el acero de refuerzo a utilizar debe ser al menos A42, es decir, con una resistencia de 4200 [kg/cm²].

El acero de refuerzo fue obtenido por parte de la empresa constructora Areka, quienes indicaron que se ajustaba a la normativa y es de 3/8" de diámetro (9.5 [mm]). Su presentación comercial es en longitudes de 12[m], siendo ésta posteriormente seccionada en trozos de 50 [cm] para los fines prácticos de la investigación (Figura 16).

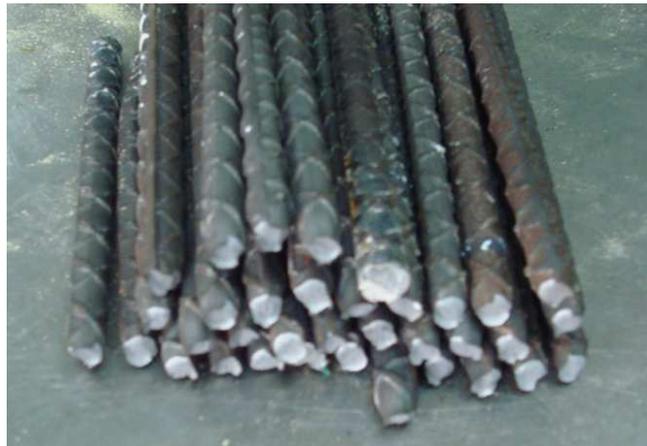


Figura 16: Acero de refuerzo utilizado en la investigación.
Fuente: Propia

4.2.4 AGUA

El agua, bajo su concepto de conglomerante, es uno de los elementos vitales en la elaboración de la pasta de hormigón, y por consiguiente es importante su uso según recomendaciones nacionales e internacionales, siendo aquella que cumple básicamente para el consumo humano.

El agua que se utilizó en la elaboración es potable, incolora, insabor e inodora, siendo la misma que utiliza la empresa constructora que facilitó los áridos.

4.2.5 SULFATO DE SODIO ANHIDRO

El Na₂SO₄ utilizado se provee en presentación "en anhidro", es decir, sin contenido de agua. Su distribución en estudios de investigación es en sacos de 25 [kg] (ver Figura 17) y entregados por parte de Decanato de la Facultad de Ciencias Marinas de la UCOL³¹.

³¹ Agradecer al Decano de la Facultad de Ciencias Marinas, Sr. Juan Mimbela López, por obtener el sulfato para la investigación.



Figura 17: Empaque de distribución de Sulfato de Sodio en anhidro.
Fuente: Propia.

4.2.6 EQUIPO DE COMPRESIÓN Y TRACCIÓN

Para el ensayo se utilizaron equipos de compresión y tracción con los cuales se ensayaron los cilindros de hormigón y acero de refuerzo respectivamente. En primera instancia, los cilindros de hormigón son emparejados y nivelados en una base de azufre para generar una superficie uniforme en los extremos. Luego de eso son ensayados a compresión (ver Figura 18) mediante carga uniforme con maquinaria calibrada a la normativa mexicana vigente.



Figura 18: Máquina de ensayo de compresión.
Fuente: Propia.

Por otra parte el acero de refuerzo es ensayado a tracción (ver Figura 19), donde son sujetados en sus extremos por “mandíbulas de acero” que evitan que se desplacen. Este equipo se encuentra calibrado a la normativa mexicana vigente³².



Figura 19: Máquina de ensayo de tracción.
Fuente: Propia.

4.3 ETAPAS DE IMPLEMENTACIÓN

4.3.1 PREPARACIÓN DE INSUMOS

En función de examinar los efectos de la salinidad mediante la prueba de intemperismo acelerado, se analiza mediante cilindros macizos de hormigón que se ensayan a compresión, mientras que se crean vigas de hormigón con acero de refuerzo en su interior con diversos recubrimientos.

Sobre la base de lo anterior, antes de elaborar la mezcla de hormigón, es necesario preparar los cilindros necesarios, además de preparar los moldes o encofrado para las vigas.

- Cilindros: metálicos, de 30 [cm] de alto y 15 [cm] de diámetro. Se engrasan en su interior para evitar adherencias que afecten la capa superficial del hormigón (ver Figura 20).

³² El análisis consideró solo la norma mexicana tanto en el ensayo a compresión como a tracción ya que se utilizaron implementos de dicho país.



Figura 20: Recipientes para cilindros de hormigón.
Fuente: Propia.

- Cajones: de madera, 20 [cm] de ancho, 20 [cm] de alto y 60 [cm] de largo (ver Figura 21).



Figura 21: Cajón de madera.
Fuente: Elaboración Propia.

- Acero de refuerzo: Se crearon enrejados que se colocaron en el interior de los cajones y que contarán con 3, 5 y 7 [cm] de recubrimiento los que fueron colocados en forma longitudinal al cajón. Se consideró en el vertido del hormigón que no ocurrieran intersticios debido a los espacios interiores de la armadura (ver Figura 22).



Figura 22: Armadura de acero.
Fuente: Propia.

4.3.2 MEZCLADO DE HORMIGÓN

Para la presente mezcla se utilizó la metodología por volumen para calcular la participación o dosificación de arena, grava, agua y cemento en la mezcla del hormigón. El hormigón se diseñó para una resistencia de 250 [kg/cm²] a compresión con una proporción 1:2.5:5, cemento, arena y grava respectivamente, mientras que la razón agua/cemento utilizada fue de 0.45³³.

Aun cuando la mezcla es de una baja resistencia en comparación a recomendaciones de empresas cementeras, que establecen resistencia mínima de 300 [kg/cm²] para ambientes marítimos, la dosificación fue fijada en función al cemento disponible.

Es esperable que, para el momento del ensayo, se obtengan resistencias entre un 80% a 90% de la resistencia de diseño de acuerdo a la Figura 23.

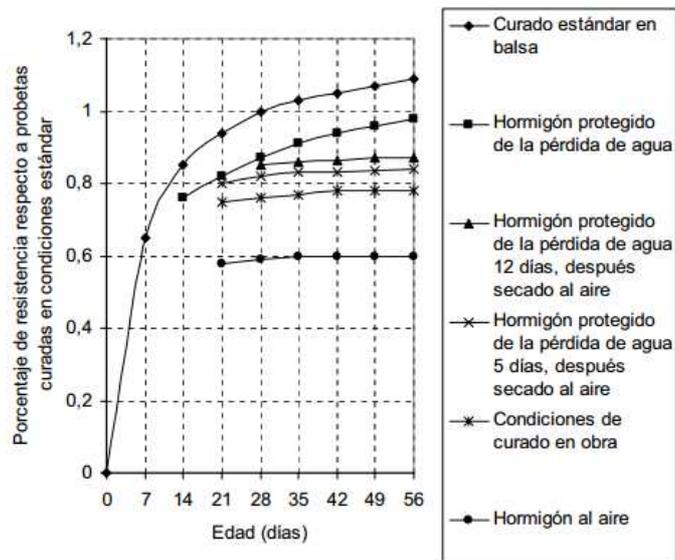


Figura 23: Efecto del curado en la resistencia del hormigón.
Fuente: Revuelta & Gutierrez.

³³ Las dosificaciones fueron obtenidas del documento "Dosificación de Hormigones" de Polanco y Setién, Universidad de Cantabria, 2013.

Finalmente, no se considera el uso de aditivos adicionales u otros componentes que varíen la capa superficial del hormigón, reduzcan la cantidad de agua o la resistencia a compresión o sulfatos ya que no se desea alterar las características químicas del elemento que será sometido a intemperismo acelerado.

4.3.3 CALENDARIZACIÓN DE LA APLICACIÓN DE INTEMPERISMO ACELERADO

La experimentación se realizó mediante tres combinaciones de aplicación de sulfatos en cilindros y una en vigas según la siguiente descripción:

- Control: Considera el cilindro sumergido en agua pura, siguiendo el protocolo para ensayo de cilindros. Esta combinación cumple la función de controlar que la dosificación es la correcta, además de considerarla como valor referencial de la resistencia.
- Continuo: Cilindros o vigas sumergidos en agua según ensayo de intemperismo acelerado, pero con la salvedad que no se retiran de la mezcla. En la condición se aplican las siguientes observaciones:
 - Cilindros de Hormigón: Completamente sumergidos.
 - Vigas: Sumergidas en un 50%, en posición vertical (ver Figura 24).



Figura 24: Vigas de hormigón sumergidas parcialmente.
Fuente: Propia.

- Ciclo Intemperismo: Considera aplicar la prueba de intemperismo mediante 5 ciclos; donde, en periodos que los cilindros no se encuentren sumergidos, éstos estarán en una zona parcialmente soleada a fin de que se genere una evaporación parcial en la superficie.

Sobre lo anterior, se genera el siguiente calendario expuesto en la Tabla 11 que considera tanto los días de aplicación con sulfato de sodio como la condición de control:

Tabla 11: Calendario de aplicación de prueba de intemperismo.
Elaboración Propia.

		Día														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cilindros	Control	Fraguado en Recipiente	Sumergido en Agua potable												Ensayo de Cilindros de Hormigón	Ensayo de Acero de Refuerzo
	Continuo		Sumergido en Na ₂ SO ₄													
	Ciclo intemperismo		SUM ³⁴			SUM			SUM			SUM				
Vigas	Continuo		Sumergido en Na ₂ SO ₄													

Como una forma de tener un parámetro base, una vez retirado los cilindros de los recipientes se masaron y midieron con el objetivo de comparar cambios de peso y volumen (por ende densidad) de éstos.

4.3.4 PREPARACIÓN Y ENSAYO DE CILINDROS Y ACERO DE REFUERZO

Una vez concluida la etapa indicada en la sección anterior, se procedió a la recuperación de las barras de acero de refuerzo al interior de las vigas, mientras que los cilindros de acero se secaron superficialmente y en forma posterior se midieron para analizar cambios de masa y volumen³⁵.

Los cilindros fueron ensayados a compresión previo cabeceo en base de azufre para la nivelación de las superficies de contacto con la prensa (ver Figura 25).



Figura 25: Cilindro cabeceado en equipo a compresión.
Fuente: Propia.

³⁴ SUM: Cilindro sumergido en Na₂SO₄.

³⁵ Los cilindros fueron medidos en 4 puntos la altura, mientras que el diámetro se midió en dos secciones tanto en la base superior como inferior. Estas observaciones se realizaron con un pie de metro o Vernier. Por otra parte la masa de los cilindros se realizó con una balanza con precisión de 50 [g], mientras que la masa del acero de refuerzo con una de precisión de 0.2 [g]

Por otra parte, las barras de acero fueron ensayadas a tracción, donde también se midió la deformación (estiramiento) de la barra, correspondiente a una zona delimitada en forma inicial de 20 [cm] de longitud en la zona media, comparándola en forma posterior con la barra fallada (ver Figura 26).



**Figura 26: Barra de acero sometida a tracción sujeta por mandíbulas de acero.
Fuente: Propia.**

5 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos se distribuyen en la presente sección mediante análisis independientes, tanto para los cilindros de concreto como para el acero de refuerzo.

5.1 CILINDROS DE HORMIGÓN

Una vez que se preparó el hormigón mediante el conglomerado de agua, cemento, grava y arena, se vertió en 18 cilindros metálicos para generar el primer fraguado y con ello la etapa de endurecimiento.

Las etapas posteriores se clasifican en los diversos estados de medición, tanto en tamaños, pesos y resistencia a fin de comparar y analizar los cambios que ocurren.

5.1.1 ETAPA 1: ANTES DE APLICACIÓN DEL CICLO DE INTEMPERISMO

Una vez que los recipientes cilíndricos fueron separados del hormigón, contando ya éste con una dureza suficiente para el desmolde, se obtuvieron los siguientes valores de masa y longitud de los cilindros, los que fueron observadas antes de la aplicación de la acción química.

Tabla 12: Información de cilindros antes de la aplicación de acción química.
Fuente: Propia.

Tipo de Cemento	N° Cilindro	Altura [cm]	Diámetro Superior [cm]	Diámetro Inferior [cm]	Masa [kg]	Tipo de Aplicación
CPC 30RS BRA	1	29.75	14.96	15.015	12.33	Control
CPC 30RS BRA	2	29.925	15.14	15.05	12.45	Control
CPC 30RS BRA	3	29.65	15.005	14.86	12.33	Control
CPC 30RS BRA	4	29.95	14.975	15.03	12.45	Ciclo Intemperismo
CPC 30RS BRA	5	29.8	15.045	14.94	12.45	Ciclo Intemperismo
CPC 30RS BRA	6	29.775	15.1	15.075	12.31	Ciclo Intemperismo
CPC 30RS BRA	7	29.5	15.015	15.02	12.28	Continuo
CPC 30RS BRA	8	29.875	15.06	15.115	12.45	Continuo
CPC 30RS BRA	9	29.8	15.075	15.05	12.38	Continuo
CPC 30R	10	29.975	15.065	15.03	12.30	Control
CPC 30R	11	29.75	14.965	15.045	12.18	Control
CPC 30R	12	29.875	14.93	15.12	12.27	Control
CPC 30R	13	29.95	15.02	15.01	12.10	Ciclo Intemperismo
CPC 30R	14	29.95	14.92	14.995	12.40	Ciclo Intemperismo
CPC 30R	15	30.075	15.005	14.97	12.40	Ciclo Intemperismo
CPC 30R	16	29.9	15.295	14.985	12.33	Continuo
CPC 30R	17	29.875	14.995	15.07	12.16	Continuo
CPC 30R	18	30.1	14.935	14.975	12.18	Continuo

De los valores anteriores, se demuestran las magnitudes y características de los 18 cilindros estudiados³⁶. De allí se obtiene, en promedio, una densidad del hormigón de 2326 [kg/m³], magnitud que se ajusta a los valores típicos de un hormigón de uso general. Por otra parte, se aprecia de los cilindros una uniformidad en la superficie de cada uno de ellos, no observándose grietas o zonas con errores en el colado o colocación del hormigón (Figura 27).



Figura 27: Cilindros de hormigón.
Fuente: Propia.

5.1.2 ETAPA 2: DESPUÉS DE APLICACIÓN DEL CICLO DE INTEMPERISMO

Luego de la aplicación de los diversos ciclos propuestos para la presente investigación, se realizó una nueva medición de masa y dimensiones antes de la aplicación de carga para evaluar su resistencia a la compresión.

En términos de promedios, al obtener la densidad del hormigón luego de la aplicación de los ciclos descritos y éstos secados superficialmente antes de aplicarles cargas para ensayos, la densidad obtenida es de 2358 [kg/m³], valor que es 26 unidades superior al valor obtenido antes de la aplicación de intemperismo.

Los resultados se presentan en la Tabla 13.

³⁶ En la experiencia se elaboraron 24 cilindros, siendo solo 18 testeados. Los restantes fueron entregados al laboratorio para realizar estudios posteriores sin vinculación a la presente investigación.

Tabla 13: Información de cilindros después de la aplicación de acción química.
Fuente: Propia.

Tipo de Cemento	N° Cilindro	Altura [cm]	Diámetro Superior [cm]	Diámetro Inferior [cm]	Masa [kg]	Tipo de Aplicación
CPC 30RS BRA	1	29.8	15.035	14.575	12.45	Control
CPC 30RS BRA	2	29.9	14.985	15.02	12.475	Control
CPC 30RS BRA	3	29.625	14.995	14.94	12.575	Control
CPC 30RS BRA	4	29.85	15.045	15.02	12.625	Ciclo Intemperismo
CPC 30RS BRA	5	29.7	15.03	15.03	12.625	Ciclo Intemperismo
CPC 30RS BRA	6	29.7	15.01	14.955	12.425	Ciclo Intemperismo
CPC 30RS BRA	7	29.6	15.06	15.055	12.425	Continuo
CPC 30RS BRA	8	29.8	15.065	15.095	12.625	Continuo
CPC 30RS BRA	9	29.65	15.08	15.025	12.575	Continuo
CPC 30R	10	29.925	15.04	15.065	12.425	Control
CPC 30R	11	30.125	14.905	15.045	12.325	Control
CPC 30R	12	29.725	15.015	15.045	12.35	Control
CPC 30R	13	29.625	15.01	15.01	12.175	Ciclo Intemperismo
CPC 30R	14	30.025	15.04	15.015	12.5	Ciclo Intemperismo
CPC 30R	15	30.15	15.055	15.025	12.5	Ciclo Intemperismo
CPC 30R	16	30.0	15.025	15.05	12.45	Continuo
CPC 30R	17	29.8	14.955	15.045	12.30	Continuo
CPC 30R	18	30.075	14.945	14.99	12.3	Continuo

Cabe destacar que el incremento de volumen, en una segunda mirada según tipo de cemento, es para ambos casos de cemento. Del mismo modo ocurre, en promedio, que el mayor aumento de densidad es para el CPC 30RS BRA.

De las Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 se desprende que el cemento tradicional o corriente tiende a generar menores cambios de densidad bajo un ambiente con alto grado de sulfatos, donde cuentan como factor característico que la densidad aumenta dado que se incrementa la masa y disminuye la densidad, en términos generales, en forma conjunta.

El incremento logrado - si bien es menor al orden de magnitud del valor inicial - puede haberse obtenido tanto por la ligera permeabilidad en la capa superficial del hormigón, a la retracción de la altura y diámetro (en términos globales hubo una disminución del volumen) o también a la adherencia de pequeñas partículas del compuesto Na_2SO_4 en la capa superficial o por capilaridad al interior de los cilindros de hormigón.

Tabla 14: Variación de la masa de cilindros según tipo de cemento.
Fuente Propia.

	Antes de aplicación [kg]	Después de aplicación [kg]	Incremento [%]
CPC 30RS BRA	12.379	12.533	1.2%
CPC 30R	12.256	12.369	0.9%
Global	12.318	12.451	1.1%

Tabla 15: Variación del volumen de cilindros según tipo de cemento.
Fuente Propia.

	Antes de aplicación [L]	Después de aplicación [L]	Incremento [%]
CPC 30RS BRA	10.567	10.511	-0.5%
CPC 30R	10.611	10.603	-0.1%
Global	10.589	10.557	-0.3%

Tabla 16: Variación de densidad de cilindros según tipo de cemento.
Fuente: Propia.

	Antes de aplicación [kg/m ³]	Después de aplicación [kg/m ³]	Incremento [%]
CPC 30RS BRA	2343.0	2384.8	1.8%
CPC 30R	2310.1	2333.1	1.0%
General	2326.5	2358.9	1.4%

Una vez retirados los cilindros de la mezcla con Na₂SO₄, se observaron adherencias de granos debido a la cristalización de la mezcla, siendo en cada uno de ellos en forma diversa tanto en localización como en cantidad (ver Figura 28).



Figura 28: Presencia de cristales de Na₂SO₄ en cilindros.
Fuente: Propia.

Cabe destacar que la mezcla fue agitada en forma diaria, mientras que los cilindros fueron desplazados para realizar el batido. La creación de los cristales puede deberse a la adherencia continua del contacto de los cilindros con la mezcla ya que a los cilindros ya que estos nunca fueron enjuagados o cepillados durante la experiencia.

5.1.3 ETAPA 3: ENSAYO DE CILINDROS

En forma posterior a la medición, se realizó el ensayo a compresión, cuya resistencia debe ser entendida que éstos tienen 14 días de fraguado. Es importante destacar la mezcla fue para una resistencia a compresión de 250 [kgf/cm²] a los 28 días. Los resultados obteniendo se presentan en Tabla 17:

Tabla 17: Resultados de resistencia de cilindros luego de 14 días.
Fuente: Propia.

Tipo de Cemento	N° Cilindro	Resistencia [kgf/cm ²]	Tipo de Aplicación
CPC 30RS BRA	1	201.9	Control
CPC 30RS BRA	2	144.2	Control
CPC 30RS BRA	3	181.7	Control
CPC 30RS BRA	4	95.2	Ciclo Intemperismo
CPC 30RS BRA	5	155.7	Ciclo Intemperismo
CPC 30RS BRA	6	199.0	Ciclo Intemperismo
CPC 30RS BRA	7	173.1	Continuo
CPC 30RS BRA	8	178.8	Continuo
CPC 30RS BRA	9	141.3	Continuo
CPC 30R	10	245.2	Control
CPC 30R	11	219.2	Control
CPC 30R	12	230.7	Control
CPC 30R	13	248.0	Ciclo Intemperismo
CPC 30R	14	259.6	Ciclo Intemperismo
CPC 30R	15	252.1	Ciclo Intemperismo
CPC 30R	16	240.0	Continuo
CPC 30R	17	20.2	Continuo
CPC 30R	18	234.8	Continuo

En la Tabla 17 se aprecia que el hormigón preparado con cemento resistente a sulfatos (CPC 30RS BRA) no responde adecuadamente a las sollicitaciones estimadas en función a la base de cálculo, siendo las mismas proporciones que el hormigón preparado con cemento corriente.

De igual modo se aprecia que, para un mismo tipo de aplicación, el abanico de resultados es muy disperso, por lo que analizándolo en promedios por cada sección se generará una desviación del valor medio muy alta, lo que se incrementa con tan baja cantidad de muestras.

Por otra parte, se aprecia una mayor regularidad de los resultados obtenidos en el cemento tradicional, con la excepción de un dato escapado, donde se obtienen valores de resistencia de acuerdo a rangos esperados de entre un 85% a 90% de la resistencia de diseño, es decir entre 212 a 225 [kgf/cm²]. Además se observa que aquel hormigón

puesto al ciclo de intemperismo en el cemento corriente alcanza un alto grado de resistencia, obteniendo, en promedio, la resistencia de diseño en menos tiempo.

La cualidad química que posee el cemento corriente sobre el resistente a sulfatos, donde este último posee una menor cantidad de C_3A , permite que el cemento 30R obtenga un endurecimiento y una resistencia inicial en forma más rápida. La particularidad característica expuesta permite obtener contrarrestar la acción química de ambientes sulfatados o con otras cargas químicas.

De lo anterior se puede extraer que debe ocurrir una menor permeabilidad, la que se ve reflejada en que la variación de la masa y volumen será menor, en términos absolutos, entre los dos cementos utilizados.

5.2 ACERO DE REFUERZO

Los resultados del ensayo en las vigas de hormigón reforzado con diversos recubrimientos distinguen tres etapas las cuales recorren desde la medición de su masa antes de colocarse como refuerzo, una segunda etapa en que se recuperan y finalmente estas son ensayadas a tracción.

5.2.1 ETAPA 1: ACERO ANTES DEL FRAGUADO

Antes de la colocación de las barras de acero al interior de las vigas, estas se pesaron para controlar su diferencia de masa antes y después de la exposición a sulfatos con el recubrimiento de hormigón³⁷.

La masa indica en la Tabla 18 considera el total del enrejado, sin incluir el alambre para fijarlo, señalado para cada cajón con el recubrimiento indicado.

Tabla 18: Masa de acero de refuerzo antes de colocarlas en la viga.
Fuente: Propia

	Tipo de Cemento	Recubrimiento [cm]	Masa Acero de Refuerzo [g]
Cajón 2	CPC 30R	3	1092.08
Cajón 3	CPC 30R	5	1091.91
Cajón 5	CPC 30R	7	1088.45
Cajón 1	CPC 30RS BRA	3	1084.59
Cajón 4	CPC 30RS BRA	5	1089.45
Cajón 6	CPC 30RS BRA	7	1096.33

Cabe destacar que las barras son de acero A42 y poseen un bajo grado de oxidación superficial, no se les aplicó tratamiento o aditivos especiales para contribuir en su oxidación. De igual modo se aprecia una baja diferencia en la masa de acero en el interior de cada cajón, lo que permitirá distinguir cambios drásticos en caso de efecto sobre el acero.

³⁷ En forma paralela también se midió la masa del alambre utilizado en el enrejado, pero para efectos de la investigación no se analizaron los efectos sobre estos, ya que no se contenía información técnica de ellos, además de la alta posibilidad de perder parte del alambre al recuperar el acero de refuerzo.

5.2.2 ETAPA 2: DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE INTEMPERISMO ACELERADO

Como se indicó en el marco teórico, las vigas de hormigón semisumergidas se retiraron a los 14 días de iniciado el fraguado (ver Figura 29), donde se evidenciaron tres áreas en la superficie del hormigón claramente distinguibles.



Figura 29: Vigas de hormigón a los 14 días de exposición.
Fuente: Propia.

Las tres áreas en la superficie distinguibles son:

- Zona sumergida: Porción media inferior que se encontraba bajo el agua, la que evidenciaba una capa adherida de sulfato sólido o consolidado con un espesor de 2 a 5 [mm].
- Zona intermedia: Porción correspondiente de la zona media hasta $\frac{3}{4}$ de la longitud de la viga en que se apreciaba una ligera masa adherida sólida además de gran cantidad de sales en estado semisólido con textura de polvillo.
- Zona superior: Área superior con baja o nula concentración de sulfato adherido y con un polvillo escasamente visible pero sensible al tacto.

Lo anteriormente descrito es observado en la Figura 30:



Figura 30: Zonas distinguibles en vigas de hormigón.
Fuente: Propia.

En forma posterior, al recuperar las barras de acero se masaron obteniendo los resultados indicados en la Tabla 19.

Tabla 19: Masa de acero de refuerzo después de colocarlas en la viga.
Fuente: Propia

	Tipo de Cemento	Recubrimiento [cm]	Masa Acero de Refuerzo [g]
Cajón 2	CPC 30R	3	1092.97
Cajón 3	CPC 30R	5	1092.65
Cajón 5	CPC 30R	7	1089.11
Cajón 1	CPC 30RS BRA	3	1085.51
Cajón 4	CPC 30RS BRA	5	1090.61
Cajón 6	CPC 30RS BRA	7	1097.22

De la tabla anterior se aprecia que, en general, la masa aumentó en forma poco significativa, lo que probablemente se debe al polvillo que éstos pudieran haber adquirido al estar en contacto en la viga.

5.2.3 ETAPA 3: ENSAYO DE ACERO DE REFUERZO

Antes de ser ensayadas, las barras de acero contaban en forma parcial con polvillo claro en su superficie, probablemente, debido a la acción de adherencia entre la barra y el hormigón, siendo una situación extensa en todas las barras. De igual modo, no se apreciaron zonas de erosión significativa ni áreas con pérdida de sección ni de las estrías que éstas cuentan.

Una vez medido el acero de refuerzo, se ensayó a tracción donde se presentan en la Tabla 20 y Tabla 21 los resultados promedios del ensayo de 4 varillas por cada combinación, además la deformación promedio de la zona inferior correspondiente a los 20 [cm] centrales de la barra.

Tabla 20: Resistencia promedio de barras de acero de refuerzo.
Fuente: Propia.

	Tipo de Cemento	Recubrimiento [cm]	Resistencia ³⁸ [N/mm ²]
Cajón 2	CPC 30R	3	1409.0
Cajón 3	CPC 30R	5	1437.3
Cajón 5	CPC 30R	7	1430.0
Cajón 1	CPC 30RS BRA	3	1407.0
Cajón 4	CPC 30RS BRA	5	1392.3
Cajón 6	CPC 30RS BRA	7	1441.1

Tabla 21: Deformación promedio en barras de acero de refuerzo.
Fuente: Propia.

	Tipo de Cemento	Recubrimiento [cm]	Deformación [cm]
Cajón 2	CPC 30R	3	3.38
Cajón 3	CPC 30R	5	3.40
Cajón 5	CPC 30R	7	3.53
Cajón 1	CPC 30RS BRA	3	3.45
Cajón 4	CPC 30RS BRA	5	3.58
Cajón 6	CPC 30RS BRA	7	2.75

En general, tanto la resistencia como la deformación obtenida, en promedio, no reflejan variaciones de interés, debido sus resultados dispersos para las variables indicadas. Es probable que, debido a los periodos de experimentación junto con la permeabilidad que el hormigón entrega, no permitieron realizar efectos sobre la barra de acero.

En una primera instancia, el acero obtuvo una resistencia muy superior por sobre el estándar de diseño, donde alcanzó una resistencia superior a los 14000 [kgf/cm²] siendo un acero A42.

Si bien la deformación obtenida con recubrimiento de 7 [cm] para el hormigón con resistencia a sulfatos fue mayor, es poco congruente a los resultados anteriores, que muestran una dispar resistencia y deformación media para recubrimientos menores, lo que no se traduce en resultados concluyentes.

³⁸ 1 [N/mm²] ≈ 10.2 [Kgf/cm²]

La Figura 31 muestra la zona de contacto fracturada en la que no se observan anomalías de la falla y su rotura en la zona de menor diámetro debido al estiramiento.



Figura 31: Barra de acero ensayada.
Fuente: Propia.

Dentro del marco de la investigación realizada, la baja permeabilidad del hormigón y por otra parte el tiempo de exposición - incluso sin el recubrimiento - hace que la experimentación en las barras de acero pueda requerir mucho más tiempo que el que cubre esta investigación.

Finalmente, cabe destacar que las barras fueron recuperadas mediante sierra, mazo y picota, por lo que las cualidades físicas de la barra, en términos de su resistencia, fueron afectas en gran medida, pero dado que todas éstas fueron tratadas de igual manera los resultados no debiesen ser tan dispersos uno de otro.

6 CONCLUSIONES

La potencial naturaleza agresiva de los medios acuáticos, en especial del medio marino, ha quedado expuesta mediante la aproximación desarrollada. Es necesario entender que la acción es tanto química como física.

En este caso la acción química es determinada por el efecto provocado por la acción de sulfatos, entre otros, los que penetran afectando la estabilidad superficial del hormigón. Ahora bien, no se debe olvidar la existencia de agentes físicos, que corresponden a las cargas estructurales (oleaje, cargas vivas, viento, etc.) entendiéndose finalmente como un análisis físico-químico que se debe seguir estudiando y comprendiendo.

En la naturaleza de las obras de ingeniería marítima, los impactos salinos que afectan a las obras de hormigón aún no están analizados en profundidad, debido a que éstos son consecuencia del acero de refuerzo más que del mismo hormigón, principalmente porque el acero añade importantes características frente a esfuerzos de tensión, corte y flexión.

Esta acción físico-química muestra que, con los resultados parciales, el hormigón tradicional resiste correctamente a la acción, debido a cargas de compresión; por otra parte, el hormigón con resistencia a sulfatos que se concibió como aquel altamente adecuado para la investigación, no logra similar ni adecuada resistencia a las cargas físicas resultantes de la acción química durante el periodo de 14 días propuesto.

Sobre la base de los resultados obtenidos en esta investigación, se puede concluir que es ampliamente recomendable utilizar cemento corriente para la elaboración del hormigón en masa que será utilizado en estructuras de defensa costera (como tetrápodos y dolos que en ocasiones son fabricados en cercanías del punto de colocación), ya que alcanza la resistencia solicitada. Esto debido a que el hormigón corriente no es mayormente sensible a los efectos de sulfatos.

De igual modo, es recomendable que, en el caso del uso de hormigón con cemento de alta resistencia a sulfatos, se privilegie elementos prefabricados; lo que permitirá evitar la exposición de la estructura a sulfatos hasta que estas alcancen un grado de endurecimiento e impermeabilidad, reduciendo el riesgo de intrusión de elementos químicos al fraguado del hormigón, debido a que presenta tiempos de endurecimiento mayores. Del mismo modo, es particularmente relevante el uso de equipos, insumos básicos y aditivos limpios de sulfatos.

No se ha considerado además la posibilidad de que la corrosión sobre el hormigón y el acero afecte la adherencia entre dichos materiales, donde la armadura no garantiza la solidificación junto a la pasta en el fraguado.

En función a la investigación, se puede considerar que en las estructuras de hormigón sometidas a alto impacto químico y/o físico - como los propuestos en la actual investigación - ocurrirá una primera etapa de endurecimiento.

Una vez que se alcanza una resistencia máxima comenzará una etapa de deterioro en el cual se pierden las capacidades específicas de los materiales, comenzando desde la máxima resistencia hipotética que pueda alcanzar hasta una pérdida paulatina, lo que redundaría en un mayor riesgo de falla estructural. Esta pérdida incluso puede alcanzar una menor resistencia que la de diseño o solicitada, tal como se propone en la Figura 32.

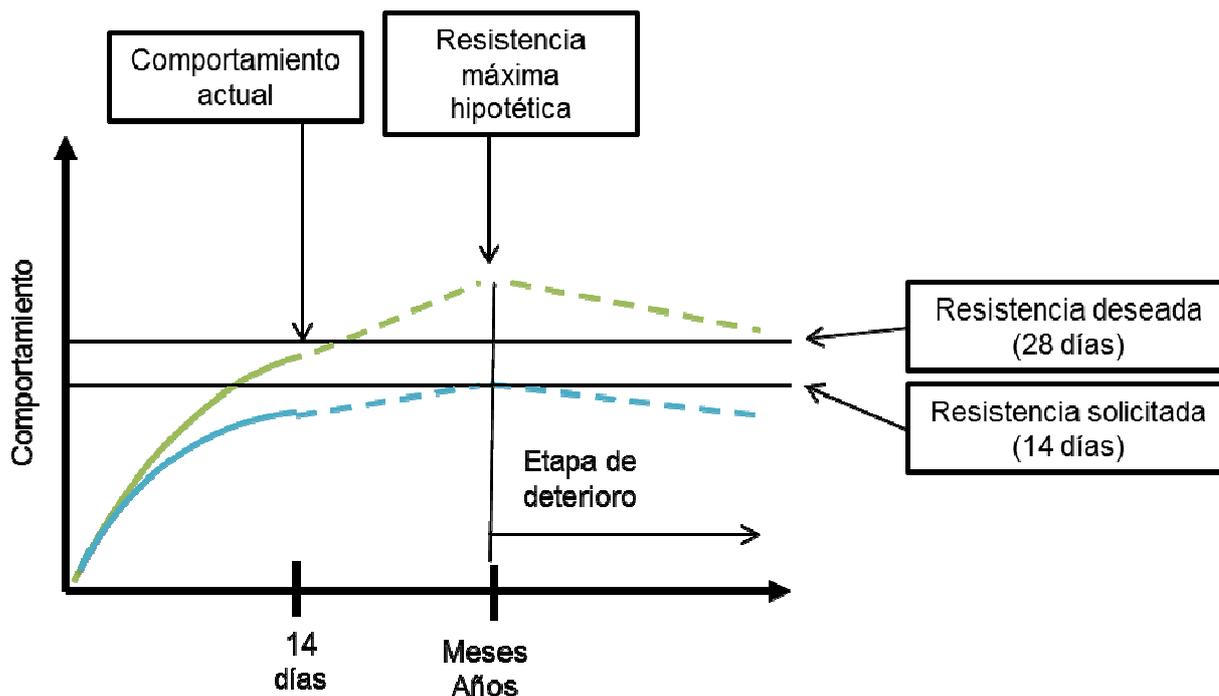


Figura 32: Estimación de Vida Residual de una estructura.
Fuente: Elaboración Propia³⁹

Sobre la base de lo anterior, se sugiere incorporar en la normativa chilena consideraciones que tienen que ver con las cualidades específicas para el hormigón que se utilice en estructuras marítimas, así como también estandarizar los diversos componentes, ya que cada distribuidor y/o tipo de cemento establece diferentes recomendaciones para su uso.

Si bien en esta experiencia se propuso un único valor de relación a/c , y en función de la investigación bibliográfica realizada, se recomienda utilizar la relación del orden inferior a 0,45 en cemento corriente y posiblemente también una menor proporción para cementos sulfatoresistentes.

Durante la presente investigación, la expansión del hormigón no permitió generar un efecto altamente dañino en las barras de acero de refuerzo en los plazos propuestos, por lo que no se cuenta con resultados altamente concluyentes respecto del uso de los diversos recubrimientos.

En consideración de que las estructuras se diseñan para escalas temporales muy amplias, es recomendable mantener las recomendaciones de las empresas comercializadoras de cemento, en orden a usar al menos 5 [cm] frente a zonas de media y 7 o más centímetros en áreas de alta concentración de agentes químicos patógenos para el hormigón.

Con los alcances presentes en la investigación, se cumplieron los objetivos propuestos, mediante la acción de sulfatos en cilindros de hormigón en masa y acero de refuerzo en cajones de hormigón armado.

Del mismo modo, se propone continuar con la investigación por medio de ensayos en escala de carga química, proponiendo muestreos periódicos y una mayor duración en la investigación. Esto permitirá alcanzar exposiciones desde días hasta años, incluyendo

³⁹ Entiéndase “Comportamiento” como la capacidad del elemento a variados tipos de esfuerzo: compresión, tracción, flexión, etc.

una mayor variedad de tipos de cemento y diversas exposiciones a sulfatos y a agua de mar en forma directa.

Sobre lo anterior es importante destacar que el cemento resistente a sulfatos adquiere en forma tardía la resistencia de diseño debido a su mayor contenido de C_2S , por lo que para realizar una comparación entre el cemento tradicional y el resistente a sulfatos se debería dar un mayor tiempo de endurecimiento (incluso de varios meses según apoya la Figura 1) debiendo recomendarse para estudios posteriores la aplicación de este ensayo una vez que se garantice que en comportamiento, al menos a compresión, entre hormigones tradicionales y sulfato resistentes sea similar.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón, Y. et al. (1999) “Ensayos de permeabilidad en materiales de baja permeabilidad compactados”, Perú: XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
- Blanco F., (2006), “Materiales de Construcción”, Universidad de Oviedo: España.
- Chorley, R., et al, (1984), “Geomorphology”, Inglaterra: Methuen.
- Fookes et al (1988), “Marine Concrete performance in different climatic environments”, Inglaterra: The concrete Society
- García, E, et al, “Comportamiento de barras de acero en hormigones en aguas de Río Paraná”, Argentina: Universidad Nacional del Nordeste.
- GEOCISA S.A. “Manual de evaluación de estructuras afectadas por la corrosión”, España: Instituto Eduardo Torroja.
- HRW (2001), Atlas Oceánico Mundial (2001), HRW: internet.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, “Manual de Referencia”, España: IECA.
- Kumar P. (2003), “Concrete in the marine environment”, Estados Unidos: Elsevier Science.
- Molina, F. et al, 2009), Evaluación del daño por corrosión en el refuerzo del concreto, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Nilson, A. (2001). “Diseño de Estructuras de Concreto”. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Osorio, J. (2013), Tecnología del Concreto, 360° en Concreto. Argos: Colombia.
- Polanco y Setién, (2013) “Dosificación de Hormigones”, Universidad de Cantabria: España
- Reveco, J, et al, “Curso de Corrosión en estructuras de hormigón armado”, Chile.
- Skalny, J, et al, (2003) “Sulfate Attack on Concrete”, Estados Unidos e Inglaterra: Spons Press.
- Webber H. & Thurman H. (1991), “Marine Biology”, Estados Unidos: Harper Collins.
- Zabaleta, H., (1988) “Compendio de Tecnología del Hormigón”, Chile: Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón.

Normativas Utilizadas:

- NCh 148, Of 68: Cemento.
- NCh 1328, Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la desintegración – Método de los sulfatos.
- NCh 1498, Of 82. Hormigón – Agua de amasado – Requisitos
- NCh 163, Of 79: Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales.
- M-MMP-2-02-004/04 “Resistencia a la compresión del Cemento Portland
- M-MMP-4-04-008/03: “Intemperismo Acelerado de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas
- ACI 318-2005: “Requisitos de reglamento para concreto estructura”, 2005.
- ASTM C-150-07: Especificación Normalizada para cemento Portland