

Estudio de Hormigones sometidos a Ambientes Agresivos en la II Región

Christian Vásquez Fernández (*)

Walter Roldán Latorre (*)

Robinson Araya González (**)

RESUMEN

Se realiza un estudio a testigos de hormigón endurecido, obtenidos de hormigones sometidos a ambientes ácidos y marinos, sobre los cuales se practican análisis químicos para determinar la concentración de sales a distintas profundidades. Además se estudian algunas de las muestras mediante la técnica de Difracción de Rayos X, y se logra una cuantificación de los compuestos cristalinos entre los cuales se reconocen la Portlandita, Yeso y Ettringita, a partir de cuya presencia es posible entender mejor el efecto de tales ambientes agresivos sobre el hormigón. Se proponen perfiles de difusión de sales y de deterioro superficial del hormigón bajo las condiciones de estudio. Se estima además la proporción de material amorfo y cristalino y de las especies cristalinas más importantes en el hormigón.

ABSTRACT

This study was realized on hardened concrete specimen, obtained from concrete, under acid and sea environment; they were chemically analyzed to determination of salts contains to different depths. Beside apply the X Ray Powder Diffraction technique to samples and make quantification of crystalline species like Portlandite, Gypsum and Ettringite, which presence permits a better understanding of effects from aggressive environment to concrete. This work propose salts diffusion and superficial deteriorate profile, under study conditions. Also estimates crystalline and amorphous material proportion and more important crystalline species in concrete.

(*) Departamento de Ingeniería Civil, U. Católica del Norte

(**) Constructor Civil, Red Técnica Cementos POLPAICO

1. INTRODUCCIÓN

Los hormigones se encuentran sometidos a condiciones de uso particularmente agresivos en la zona norte del país, ligada especialmente a una intensa actividad industrial, donde destacan los ataques por soluciones de ácido sulfúrico empleadas en los procesos de obtención de minerales, situación posible de observar en casi todas las empresas mineras de la región.

En la costa, el agua de mar somete a los hormigones a condiciones muy particulares, que han captado el interés de muchos investigadores a lo largo de la historia del cemento.

Se realiza, basado en este panorama regional, un estudio de los hormigones sometidos a tales ambientes de agresión, para lo cual se extraen muestras de hormigón endurecido de una empresa minera de la gran minería del cobre, de una fundición de metales y del molo del puerto de Antofagasta, con el propósito de evaluar cual ha sido su comportamiento durante su vida útil.

El estudio se concentra en las muestras extraídas, donde se obtienen polvos de hormigón desde la cara expuesta del mismo a distintas profundidades, a las que se les practicaron análisis mediante métodos tradicionales para la determinación de cloruros y sulfatos, pero además se incursionó con el análisis por “difracción de rayos x”, buscando específicamente la presencia de Portlandita, y Ettringita. Dada la alta dispersión que arroja este último ensaye, se desarrolla una cuantificación empleando el software “TOPAS”, que basado en el método Rietveld y en el reconocimiento de las especies del difractograma, hace una mejor aproximación de los valores de difracción, para obtener las concentraciones de las especies detectadas en las muestras analizadas.

Finalmente, la presencia o ausencia de los compuestos buscados, se relacionan directamente con el estado de dichos hormigones, lo cual aporta una nueva perspectiva en el estudio de la durabilidad de los hormigones sometidos a ambientes agresivos y particularmente los encontrados en la segunda región.

2. OBRAS INDUSTRIALES DE LA II REGIÓN

2.1 COMPAÑÍA MINERA

2.1.1 ANTECEDENTES DE LA OBRA

La construcción de las instalaciones de la mina, comenzó en 1993 y los hormigones de las losas del área de estanque y extracción por solventes fueron elaborados en 1994 por lo que a la fecha de extracción de los testigos su edad es de 9 años. Las especificaciones de diseño de los hormigones fue H-25-20-08 y no se usaron aditivos. colocados mediante una planta de hormigón premezclado, con cemento Inacesa Alta Resistencia, que corresponde a un cemento Portland puzolánico.

2.1.2 AMBIENTE DE EXPOSICIÓN

En la actividad minera es utilizado el ácido sulfúrico para extraer el mineral de cobre del material chancado mediante procesos de lixiviación, a la solución resultante de este proceso se le denomina electrolito.

Las zonas de acumulación y distribución de electrolito, se ven afectadas permanentemente por los derrames de sus contenedores o filtraciones accidentales de los sistemas de conducción, sea cual sea la fuente, la solución desciende hasta en suelo donde las estructuras de hormigón son alcanzadas.

Las estructuras más afectadas por estos derrames son sin duda algunas losas de piso, en especial, de acuerdo a las áreas a las que se tubo acceso, las correspondientes a la trinchera de decantadores hacia área de estanques, en extracción por solventes (SX) y en el área de estanques (Tank Farm), en ésta

2.2 FUNDICIÓN DE COBRE

2.2.1 ANTECEDENTES DE LA OBRA

La planta de ácido N°2 de edad de 8 años a la fecha, se elaboró usando hormigones premezclados H-30, cemento Inacesa grado corriente, y sin aditivos. En cuanto a la planta de ácido N°1, a sus 11 años de antigüedad no hay información disponible de su construcción, sin embargo se estima que obedece a las mismas especificaciones de los hormigones de la segunda planta, es decir, hormigones premezclados H-30 sin aditivos. El cemento Inacesa grado corriente corresponde a un cemento puzolánico.

2.2.2 AMBIENTE DE EXPOSICIÓN

En el proceso de fundición de cobre para su refinamiento, se genera una gran cantidad de gases sulfurosos principalmente, éstos son atrapados y conducidos a las plantas de ácido donde se genera a partir de los mismos, ácido sulfúrico.

En ambas plantas se pueden ver derrames de ácidos con una composición química variable, en las zonas de estudio y donde se extrajeron testigos de hormigón, la solución corresponde a un ácido débil cuya concentración de H_2SO_4 se encuentran en los rangos de de 40.000 a 60.000 ppm, Cloruros 3.500 ppm y con un PH de 1 a 1,5. En las zonas mas avanzadas del proceso se encuentra una solución de ácido fuerte de concentración entre 93 y 98% de H_2SO_4 , casi 20 veces superior a la concentración de ácido débil.

Los derrames en las plantas de ácido son bastante frecuentes, tanto así que en promedio, cada semana se debe atender alguna necesidad al respecto que implica el vaciado de una cantidad de ácido sobre el hormigón del piso.

2.2.3 EXTRACCIÓN DE TESTIGOS

Se extrajeron 3 testigos de hormigón endurecido de las dos plantas de ácido, en lugares bajo daño evidente, que resultaron estar bajo exposición de derrames de ácido débil.

En la planta de ácido N°1, se extrajo un testigo, al que se le designa como FA, en la base de una columna de hormigón de la estructura de soporte de un precipitador electroestático húmedo.

Un segundo testigo de hormigón, al que se le denomina FB, fue tomado de un sobrecimiento de la estructura de un precipitador electroestático húmedo, de la planta de ácido N°1, el cual fue sacado considerando además la zona de mayor deterioro por la lixiviación evidente del material cementicio.

En la planta de ácido N°2, se extrajo un testigo de hormigón de la base de columna de la estructura de una torre de humectación, a este se le denomina FC.

Los testigos fueron obtenidos en la dirección de avance del agente agresivo, a nivel de terreno de las columnas se aprecian los mayores efectos, constatando pérdida de material de varios centímetros. El sobrecimiento se perforo verticalmente, pues la solución goteaba sobre él.

Los testigos obtenidos se esquematizan en la figura 2, la zona punteada corresponde al material perdido por la acción de las sustancias agresivas, se indica además la ubicación de las muestras destinadas a los análisis posteriores, la fracción indicada como eliminada corresponde a la sección de simetría escogida para los análisis adicionales.

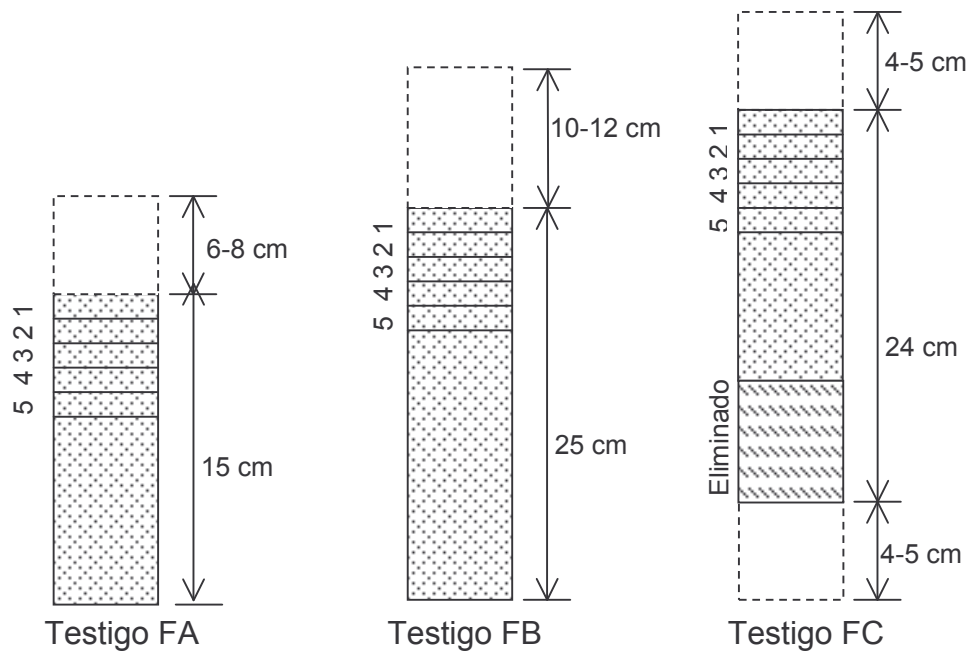


Figura 2: Testigos obtenidos en la Fundición de Cobre

2.3 MOLO DEL PUERTO DE ANTOFAGASTA

2.3.1 ANTECEDENTES DE LA OBRA

Son muy pocos los antecedentes que se pueden recopilar acerca de la construcción del molo del puerto; existe un registro fotográfico de las obras, que constituye la mejor fuente de información que se pueda consultar.¹

Según esta fuente, se pueden distinguir los siguientes hitos de la construcción del molo:

- 1919, Inicio de las obras preliminares.
- 1922, inicio de la construcción del brazo de arranque del molo.
- 1923, Elaboración y colocación de los bloques de hormigón.
- 1926, término de la construcción del molo.

¹ Sala Emilio Vaise, Biblioteca de la Universidad Católica del Norte, Antofagasta.

El puerto de Antofagasta está formado por dos estructuras principalmente, el molo principal, compuesto a su vez por el brazo de arranque, que es la parte conectada a tierra de 590 metros de longitud por lado exterior y el brazo principal orientado de sur a norte, de 760 metros por el lado exterior, la segunda estructura de importancia secundaria es denominado molo norte de 160 metro de longitud.

La estructura del molo de abrigo del puerto de Antofagasta, llamada también rompeolas, es de tipo mixto, es decir, está conformado por una escollera de enrocados de piedras clasificadas según su peso que constituyen un prisma y un muro de paramentos verticales de bloques de hormigón en su parte superior, la configuración de esta estructura cambia con la profundidad.

En el primer tramo del brazo de arranque del molo, la escollera de enrocados se encuentra protegida por bloques de hormigón del mismo tipo a los empleados en la elaboración del muro, éstos bloques se disponen en una distribución denominada pelê-melê, que en francés quiere decir *desordenado*.

Los bloques utilizados en la construcción del rompeolas tienen un peso aproximado de 60 y en la elaboración de éstos, se adoptó una dosificación de los hormigones que buscaba la máxima compacidad que permitieran los áridos con que se disponía, restando importancia a la resistencia que éstos pudieran alcanzar, pues que solo tendrían que soportar su peso propio, lo que significa una mínima fracción de su resistencia, la cual nunca llegaría a ser sobrepasada, ya que la resistencia del enrocado es la que en definitiva controlaría los esfuerzos.

El diseño de la mezcla obedece al criterio de impedir la penetración del agua por su estructura de poros, originando hormigones llenos o impermeables, es decir, “que el mortero llene completamente los huecos dejados por las piedras entre sí y que el cemento llene los huecos de la arena”, para ello se empleó una proporción del orden 1:2:4 (cemento:arena:grava).

El profesor Jorge Lira [Ref.2] explica la composición obtenida para los hormigones de bloques en la Tabla 1, las dosis de aguas utilizadas fueron las mínimas posibles, lo que originó molestias en su fabricación según el autor. Consta además

en el registro fotográfico, el empleo de betoneras para la mezcla mecanizada de los materiales en la elaboración del hormigón.

Compuesto	Ubicación del Bloque	
	No Sumergido	Sumergido
Cemento	160 kg	212 kg
Arena	460 lt	470 lt
Piedra Chancada	920 lt	940 lt

Tabla 1: Dosificación por metro cúbico de hormigón de bloques, Lira 1963.

El tipo de cemento empleado es una incógnita, aunque se estima que pudiera tratarse de cemento de origen Inglés y definitivamente de tipo Portland sin adiciones.

La cantera de explotación de material para el enrocado del molo y para los áridos de bloques se ubicaba al costado sur de las Ruinas de Huanchaca detrás de la actual población militar, según lo que se puede observar en el registro fotográfico, las arenas eran extraídas del mismo sector de las ruinas.

2.3.2 AMBIENTE DE EXPOSICIÓN

La composición del agua de mar es de alrededor de 35.000 ppm de sales la cual no varía de un lugar a otro, en el VI Congreso de Estudiantes de Ingeniería Civil celebrado de la U Católica del Norte en 2001, Hernán Zabaleta mencionó en su exposición que para la zona de Valparaíso el contenido de sales totales está compuesto por sulfatos en un 11% y cloruros en 89%, lo que significa que el agua de mar contiene cerca de 3.850 ppm de sulfatos y 31.150 ppm de cloruros.

En el Puerto de Antofagasta, se ha realizado un monitoreo de las aguas para controlar su calidad, en este se midieron la temperatura, oxígeno disuelto, PH y sales totales, en distintos puntos de la poza y fuera de ella. Se estableció un punto

de control para la comparación de los parámetros medidos, el que se encuentra alejado de cualquier influencia de las condiciones que se verifican en el puerto, en éste la concentración de sales medida se es de 34.280 ppm de sales. En el punto de control el PH es 8, que representa un agua levemente alcalina. [Ref.3]

2.3.3 EXTRACCIÓN DE TESTIGOS

Se extrajeron 3 testigos, el primero, al cual se le denomina PA, se extrajo de un bloque ubicado en la explanada protegida por el brazo de arranque del molo, a la altura de los bloques pelê-melê de protección de la escollera, este sector aunque está bien protegido ocasionalmente ha sido alcanzado por olas que sobrepasan el muro. El bloque se encuentra en buen estado de conservación, aunque se aprecia un leve deterioro superficial con pérdida de material producto de la cristalización de sales en los poros superficiales.

El segundo testigo, PB, se obtuvo de los bloques de protección de la escollera de enrocados, correspondiente a la zona sobre el nivel de mareas. Éste bloque se encuentra en buen estado de conservación, en la superficie superior se encuentra el árido a la vista, debido presuntamente a que su orientación permite alojar aguas que ocasionalmente son depositadas, hasta que son evaporadas y/o absorbidas propiciando el ataque conocido.

Para la extracción de un tercer testigo, que representara las condiciones de los bloques en la zona de intermareas, se utilizó un trozo de los bloques que serían totalmente reemplazados, a éste se le denomina PC.

Los testigos finalmente obtenidos se esquematizan en la figura 5.10, la zona punteada corresponde al material perdido por las acciones agresivas, se indica además la ubicación de las muestras destinadas a los análisis posteriores.

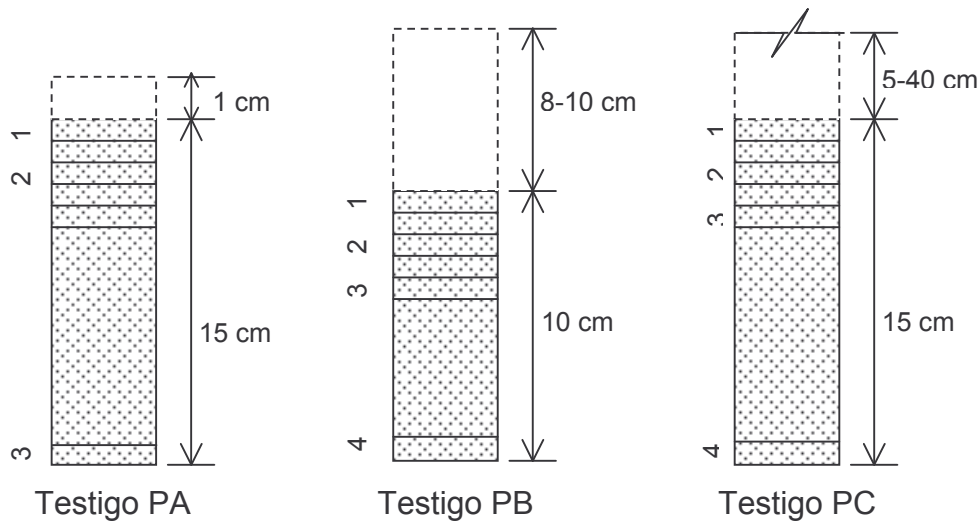


Figura 3: Testigos obtenidos en el Puerto de Antofagasta.

3. ANÁLISIS PRACTICADOS

3.1 PROCEDIMIENTO

Se extrajeron testigos de hormigón de las obras en cuestión, en el sentido de avance de la agresión, tales testigos fueron seccionados para extraer muestras a distintas distancias desde la cara superficial del testigo (cara expuesta a la agresión), dejando finalmente un testigo de longitud adecuada para su ensayo a compresión, el que se supone homogéneo en cuanto a su estado en toda su extensión.

En relación con la profundidad de las muestras, se tomó 5 porciones del testigo cada un centímetro partiendo desde la cara expuesta, esto apoyado en las recomendaciones del Código de Diseño de Hormigón Armado basado en el ACI 318 que propone un recubrimiento mínimo para las armaduras, que nunca supera los 5 centímetros.

Se evaluó en todas las muestras la presencia de sales (cloruros y sulfatos) y el PH, para buscar alguna relación entre su concentración y el estado de dicho hormigón.

Además se analizan las muestras mediante la técnica de Difracción de Rayos X, la cual permitiría evaluar la presencia de Ettringita y Yeso producida por la acción de los sulfatos y además ante la vulnerabilidad de su estabilidad, se buscó la presencia de Portlandita en cada muestra.

3.2 IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE ESPECIES CRISTALINAS

La Difracción de Rayos X permite obtener solo un reconocimiento de especies minerales cristalinas y semi cristalinas de la muestra estudiada, no reporta la presencia de especies amorfas, como tampoco permite estimar la concentración en que se encuentra cada una en la muestra.

Esta falencia últimamente ha venido a ser suplida por el método de Rietveld que aplicado por el software TOPAS, cuantifica a partir del reconocimiento de especies de la difracción la proporción que ocupan de la fase cristalina de la muestra. Esta cuantificación ya es bastante mas útil que la información cualitativa que se obtiene del difractograma, sin embargo no permite aún una adecuada cuantificación en relación al total del material analizado, compuesto por una fase cristalina y una amorfa, cuyas proporciones son absolutamente desconocidas.

Con el fin de establecer la proporción Cristalino-Amorfo en los hormigones de cada testigo se desarrolló un procedimiento que permite obtener la mayoría de las veces ésta proporción, basado en una adición en cantidad conocida, de un material cristalino puro a la muestra, a la cual se le practica una segunda Difracción. La diferencia entre las cuantificaciones de la primera y segunda Difracción, para la misma especie, está relacionada directamente con la proporción de la fase cristalina en la misma muestra.

De este modo es posible establecer la proporción Cristalino-Amorfo del material de la muestra y calcular la concentración en que cada especie se encuentra en la muestra. La siguiente tabla presenta las proporciones obtenidas para cada testigo

utilizando este procedimiento. Para el testigo PA no fue posible realizar el cálculo, pues la segunda difracción sufrió muchas distorsiones respecto a la primera.

Las densidades de cada testigo se determinaron siguiendo el procedimiento que establece la norma NCh 1171 of 2001, donde 1 kg/dm^3 equivale a 1 ton/m^3 .

Testigo	Peso Saturado [g]	Peso Sumergido [g]	Densidad [kg/dm^3]	Cristal [%]	Amorfo [%]	Cristal [kg/m^3]	Amorfo [kg/m^3]
ZA	908	534	2,43	31,62	68,38	767,6	1.660,2
ZB	919	541	2,43	36,60	63,40	889,7	1.541,5
FA	736	427	2,38	44,40	55,60	1.057,5	1.324,4
FB	1.312	765	2,40	36,34	63,66	871,5	1.527,0
FC	1.314	764	2,39	31,83	68,17	760,5	1.628,6
PA	849	494	2,39	X	X	X	X
PB	800	469	2,42	17,78	82,22	429,8	1.987,1
PC	767	441	2,35	30,47	69,53	716,9	1.635,9

Tabla 2: Proporción de Fases Amorfa y Cristalina en los hormigones estudiados

Las especies cristalinas más importantes, identificables por esta técnica, presentes en el hormigón y originadas de la hidratación del cemento y su interacción con el medio, son la Portlandita, Yeso, Ettringita, Brucita, Calcita (carbonato cálcico). La incertidumbre gira en torno a la Tobermorita, la más importante de todas, pues es una especie amorfa.

3.3 IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Las muestras corresponden a los especímenes obtenidos a partir de los testigos de hormigón extraídos, correspondiente a las 3 faenas industriales estudiadas, cada muestra fue cortada en seco para evitar lixiviaciones y se pulverizó de acuerdo a los requerimientos de los análisis.

Muestra		ZA-1	ZA-2	ZA-3	ZA-4	ZA-5
Profundidad [cm]	0	1	2	3	4	5

Muestra		ZB-1	ZB-2	ZB-3	ZB-4	ZB-5
Profundidad [cm]	0	1	2	3	4	5

Tabla 3: Muestras obtenidas de testigos de faena minera.

Muestra		FA-1	FA-2	FA-3	FA-4	FA-5
Profundidad [cm]	0	1	2	3	4	5

Muestra		FB-1	FB-2	FB-3	FB-4	FB-5
Profundidad [cm]	0	1	2	3	4	5

Muestra		FC-1	FC-2	FC-3	FC-4	FC-5
Profundidad [cm]	0	1	2	3	4	5

Tabla 4: Muestras obtenidas de testigos de fundición de cobre.

Muestra		PA-1		PA-2												PA-3
Profundidad [cm]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Muestra		PB-1		PB-2		PB-3					PB-4
Profundidad [cm]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Muestra		PC-1		PC-2		PC-3										PC-4
Profundidad [cm]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Tabla 5: Muestras obtenidas de testigos del molo del puerto de Antofagasta.

3.4 COMPAÑÍA MINERA

3.4.1 CONCENTRACIÓN DE SALES

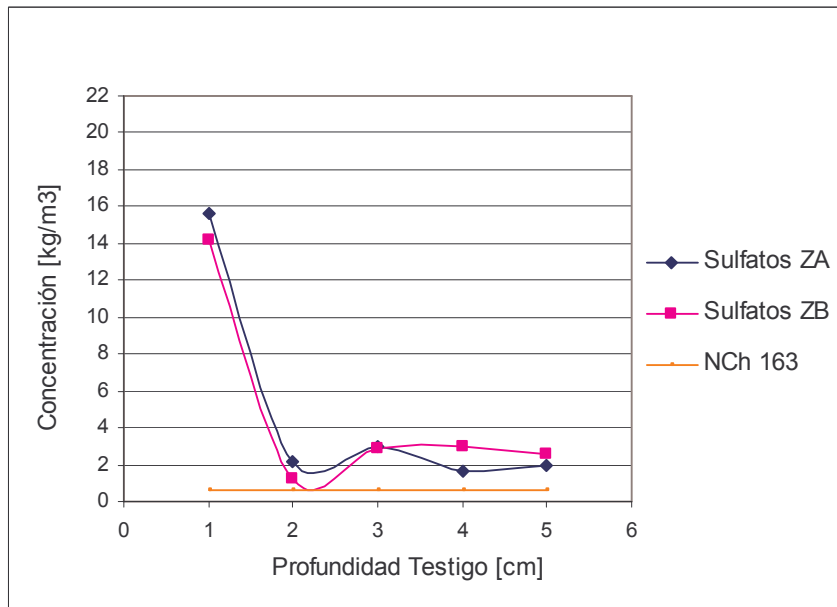


Figura 4: Difusión de sulfatos en losas de hormigón en una compañía minera.

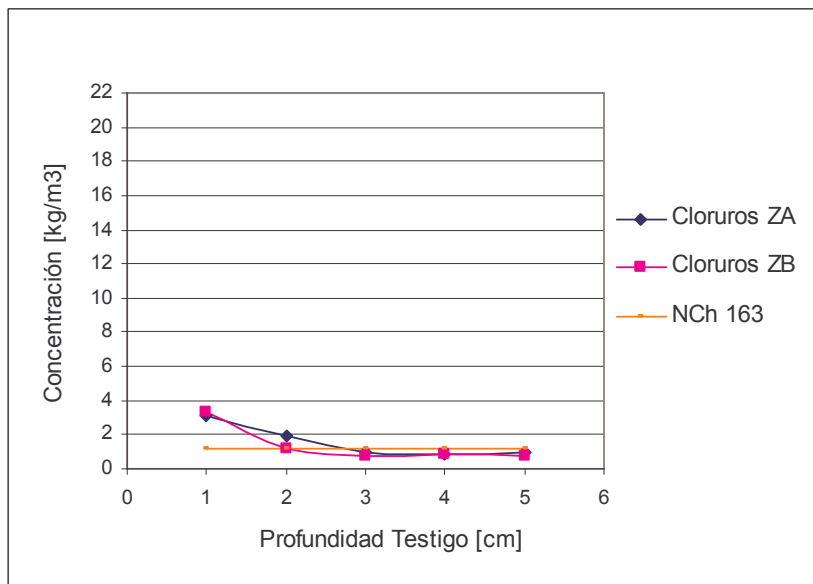


Figura 5: Difusión de cloruros en losas de hormigón en una compañía minera.

Los contenidos de sulfatos sobrepasan en todas las muestras el límite fijado por la norma NCh 163 para el hormigón armado, mientras que las muestras mas profundas de ambos testigos poseen menor contenido de cloruros que los 1,2

kg/m³ de hormigón exigidos por la misma. Se induce que los áridos empleados en la confección de los hormigones aportan las cantidades de sales detectadas en las muestras más profundas de cada testigo, los que han de tener elevados contenidos de sulfatos que hacen que el hormigón no cumpla con tal exigencia.

3.4.2 DETERMINACIÓN DE PH

Los valores de PH no son muy reveladores en los testigos puesto que sólo en la muestra superficial se tiene un valor de PH bajo, comparado con las muestras interiores, aunque apenas inferior a 12. Hacia el interior bordean el valor 12,3 normal para un hormigón.

Desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras, para tales valores de PH no existe riesgo de despasivación, si fuera el único efecto de la solución ácida.

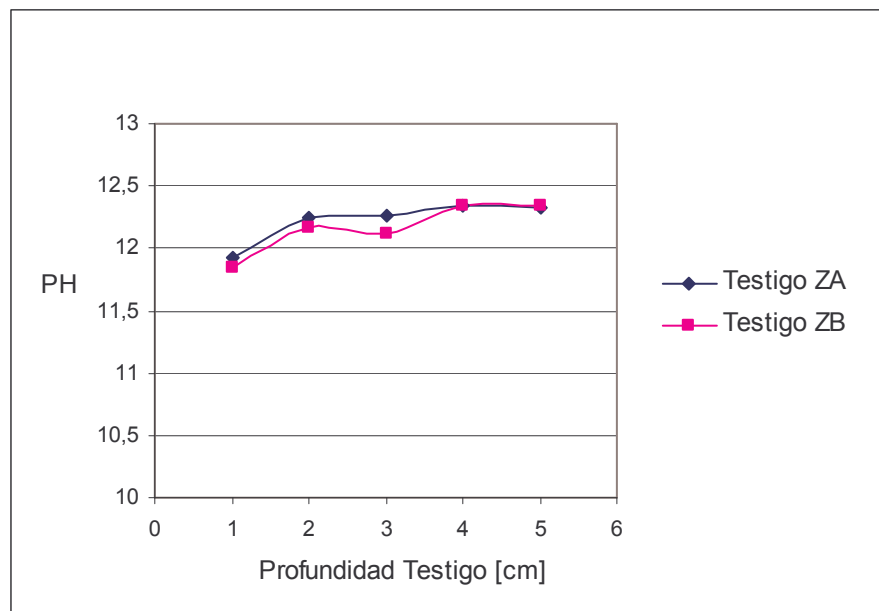


Figura 6: Efecto sobre el PH en hormigones de losas de una compañía minera.

3.4.3 CUANTIFICACIÓN DE ESPECIES

Las siguientes tablas presentan las especies cristalinas identificadas por Difracción, la cuantificación por TOPAS como porcentaje de la fase cristalina, el contenido de cada especie por metro cúbico de hormigón y el porcentaje de hormigón al que equivale.

ZA-1				ZA-3				ZA-5			
Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm
Calcita	51,08	392,1	16,15	Calcita	49,53	380,2	15,66	Calcita	67,13	515,3	21,23
Cuarzo	7,86	60,3	2,49	Cuarzo	10,13	77,8	3,20	Cuarzo	9,93	76,2	3,14
Yeso	6,84	52,5	2,16	Albita	18,15	139,3	5,74	Albita	14,05	107,9	4,44
Albita	14,34	110,1	4,53	Portlandita	2,31	17,7	0,73	Ortoclasa	3,93	30,2	1,24
Portlandita	0,41	3,1	0,13	Ortoclasa	2,95	22,6	0,93	Portlandita	2,71	20,8	0,86
Ettringita	0,36	2,8	0,11	Anfibol	14,40	110,5	4,55	Anfibol	1,69	13,0	0,53
Ortoclasa	3,75	28,8	1,19	Gismondita	2,23	17,1	0,71	Cal	0,19	1,5	0,06
Anfibol	15,30	117,4	4,84	Ettringita	0,31	2,4	0,10	Oxicarbonato	0,00	0,0	0,00
Saponita	0,00	0,0	0,00	Oxicarbonato	0,00	0,0	0,00	Ettringita	0,38	2,9	0,12
<i>Suma</i>	<i>99,94</i>	<i>767,2</i>	<i>31,60</i>	<i>Suma</i>	<i>100,01</i>	<i>767,7</i>	<i>31,62</i>	<i>Suma</i>	<i>100,01</i>	<i>767,7</i>	<i>31,62</i>

ZB-1				ZB-5			
Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm
Calcita	65,14	579,6	23,84	Calcita	58,54	520,8	21,42
Yeso	14,06	125,1	5,15	Cuarzo	11,95	106,3	4,37
Cuarzo	4,25	37,8	1,56	Albita	16,24	144,5	5,94
Marialita	6,15	54,7	2,25	Portlandita	3,73	33,2	1,37
Portlandita	1,90	16,9	0,70	Anfibol	0,58	5,2	0,21
Albita	8,19	72,9	3,00	Ortoclasa	8,45	75,2	3,09
Ettringita	0,27	2,4	0,10	Yeso	0,00	0,0	0,00
Montmorillonita	0,00	0,0	0,00	Oxicarbonato	0,00	0,0	0,00
Saponita	0,00	0,0	0,00	Caolinita	0,25	2,2	0,09
<i>Suma</i>	<i>99,96</i>	<i>889,4</i>	<i>36,58</i>	Nontronita	0,00	0,0	0,00
				Ettringita	0,26	2,3	0,10
				<i>Suma</i>	<i>100</i>	<i>889,7</i>	<i>36,60</i>

Tabla 6: Cuantificación de especies en hormigones de compañía minera.

Para una mejor comprensión se grafican los valores cuantificados mediante TOPAS como porcentajes de la fase cristalina del hormigón, de las especies más

importantes, Portlandita, Ettringita y Yeso de cada testigo. Las tendencias de los gráficos no varían en comparación con los valores obtenidos en kg/m^3 de hormigón.

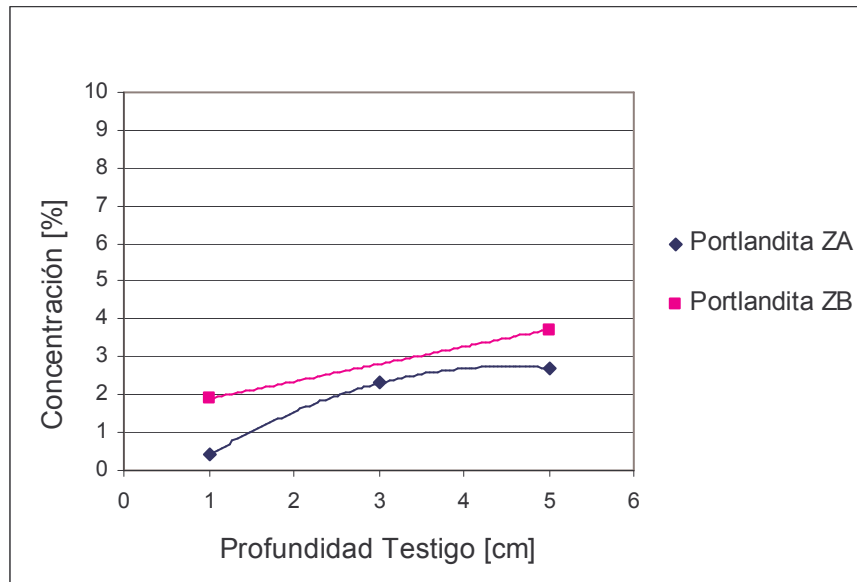


Figura 7: Lixiviación de Portlandita en losas de hormigón en faena minera.

Se puede ver en la figura 7, que en los dos testigos se aprecia una disminución en los contenidos de Portlandita de las muestras correspondientes a la superficie, en relación con las muestras de los puntos interiores.

Las variaciones de los contenidos de Portlandita, se deben atribuir a la fuerte acción lixivante que tiene sobre los compuestos del cemento a nivel superficial, la solución ácida en cuestión y a la formación de Yeso a sus expensas.

Las cantidades de Ettringita (figura 8) son en general mucho más bajas que las de Portlandita, y bastante uniformes entre muestras, lo cual demuestra que no se ha desarrollado una producción de compuestos de tipo Ettringita a raíz de la interacción del hormigón con la solución ácida y sulfática, a pesar que ha tenido lugar una difusión de sulfatos hacia el interior de la masa y tampoco a habido lixiviación de la misma. Se puede inducir a la luz del gráfico que los contenidos de

Ettringita cuantificados son los desarrollados durante el fraguado y endurecimiento del hormigón.

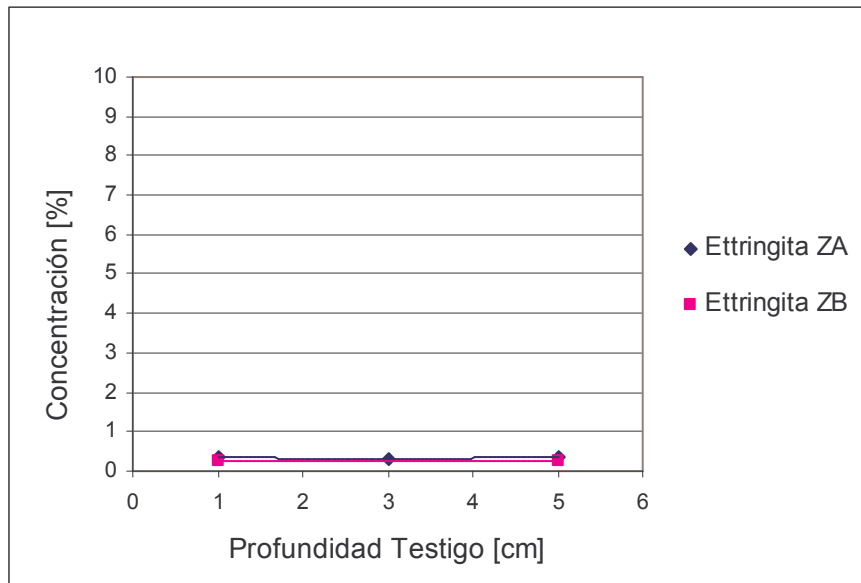


Figura 8: Formación de Ettringita en losas de hormigón en una Compañía Minera.

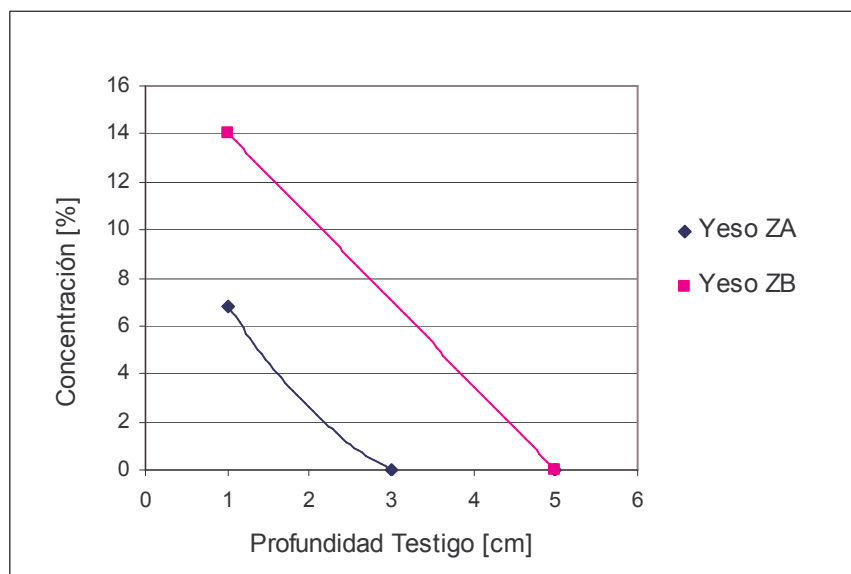


Figura 9: Formación de Yeso en losas de hormigón en una Compañía Minera.

La figura 9 demuestra claramente que existe una importante producción de Yeso en la superficie expuesta del hormigón, generada de la interacción del sulfato del ácido y la Portlandita; hacia el interior no hay o se encuentra en concentraciones demasiado bajas para el nivel de detección de la difracción.

3.5 FUNDICIÓN DE COBRE

3.5.1 CONCENTRACIÓN DE SALES

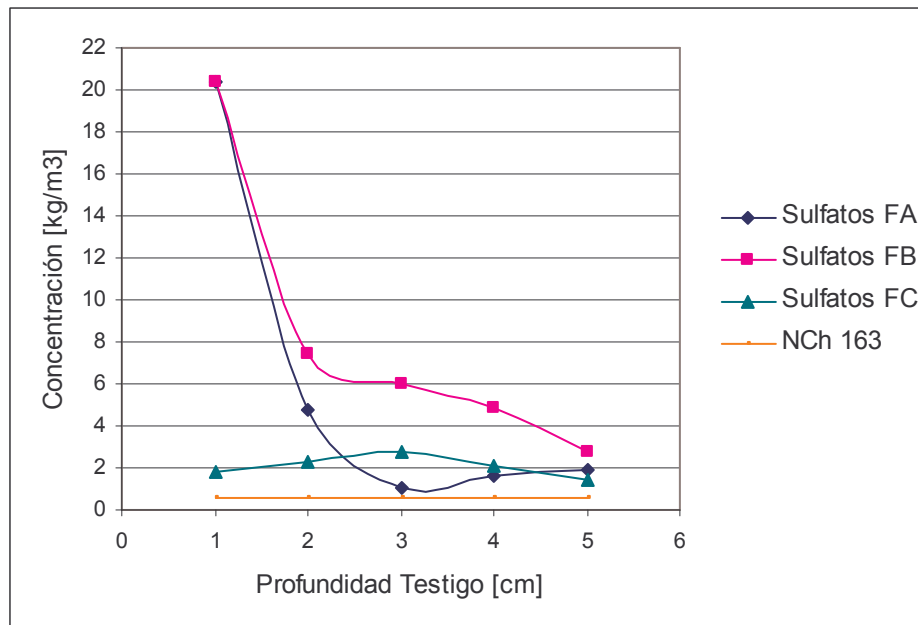


Figura 10: Difusión de sulfatos en elementos de hormigón en la fundición.

Respecto a las exigencias de la norma chilena, los contenidos de sulfatos son superiores en todas las muestras analizadas, mientras que los contenidos de cloruros de los testigos FA y FC respetan la exigencia a partir de los 3 centímetros de profundidad. Nuevamente se induce que los áridos empleados en la elaboración de los hormigones son la principal fuente de las sales aportadas,

reflejadas en los últimos 2 centímetros de profundidad de los testigos, exceptuando el testigo FB.

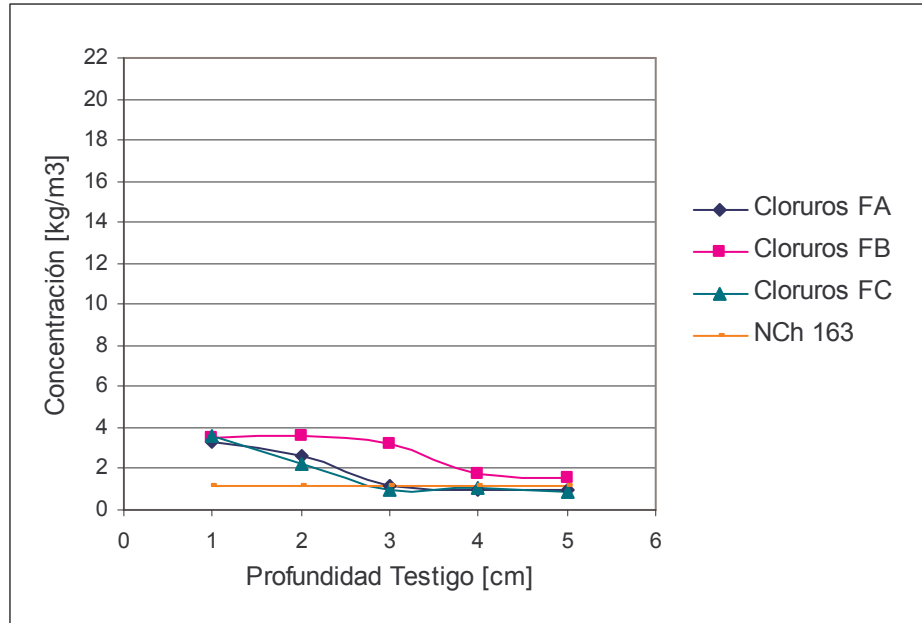


Figura 11: Difusión de cloruros en elementos de hormigón en la fundición.

3.5.2 DETERMINACIÓN DE PH

Los valores de PH contrastados en la figura 12 demuestran un nivel de alcalinidad normal para el hormigón y adecuado para las armaduras, a partir de los 2 centímetros de profundidad.

Lo que ocurre en las muestras superficiales, refleja el efecto de la solución de ácido sulfúrico. Los testigos FA y FB muestran indicios de haber estado en contacto con la solución ácida, mientras que en el testigo FC, aparentemente ha transcurrido un mayor tiempo sin contacto con ácido, o bien éste ha sido neutralizado, por lo cual su acidez ha desaparecido y también su efecto sobre el hormigón, lo que se refleja en valores normales del PH en las muestras a nivel superficial.

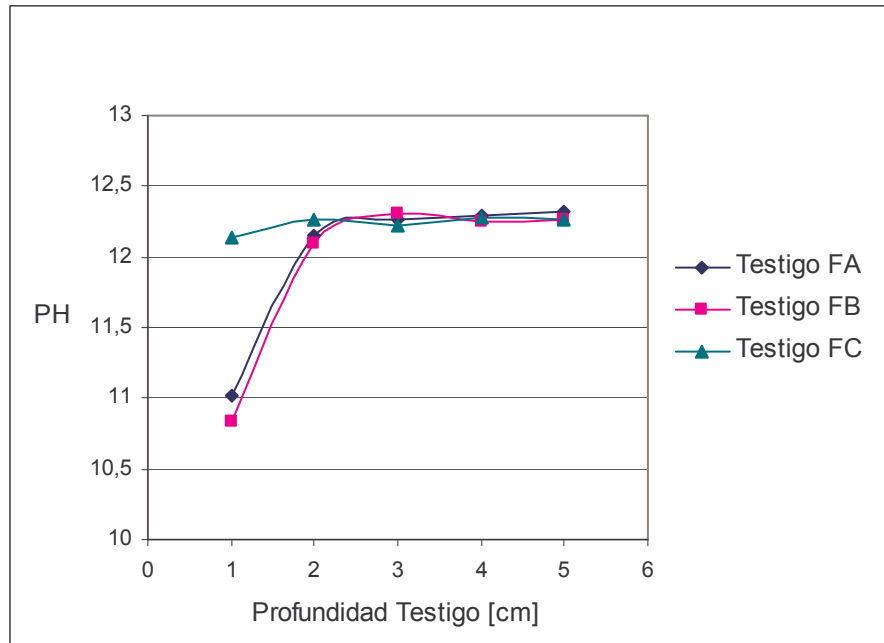


Figura 12: Efectos sobre el PH en elementos de hormigón en la fundición.

3.5.3 CUANTIFICACIÓN DE ESPECIES

Las siguientes tablas presentan las especies cristalinas identificadas por Difracción, la cuantificación por TOPAS como porcentaje de la fase cristalina, el contenido de cada especie por metro cúbico de hormigón y el porcentaje de hormigón al que equivale.

Para una mejor comprensión se grafican los valores cuantificados mediante TOPAS como porcentajes de la fase cristalina del hormigón, de las especies más importantes, Portlandita, Ettringita y Yeso de cada testigo. Las tendencias de los gráficos no varían en comparación con los valores obtenidos en kg/m³ de hormigón.

FA-1				FA-3				FA-5			
Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm
Yeso	28,31	299,4	12,57	Calcita	65,19	689,4	28,94	Calcita	45,29	479,0	20,11
Calcita	24,24	256,3	10,76	Cuarzo	6,34	67,0	2,81	Cuarzo	12,78	135,2	5,67
Cuarzo	9,15	96,8	4,06	Albita	15,49	163,8	6,88	Albita	30,55	323,1	13,56
Albita	14,78	156,3	6,56	Portlandita	3,31	35,0	1,47	Portlandita	2,48	26,2	1,10
Wuestita	0,26	2,7	0,12	Oxicarbonato	0,00	0,0	0,00	Hematita	1,31	13,9	0,58
Ettringita	1,76	18,6	0,78	Anfibol	1,65	17,4	0,73	Actinolita	3,45	36,5	1,53
Tetrasodio	17,70	187,2	7,86	Ettringita	1,90	20,1	0,84	Oxicarbonato	0,00	0,0	0,00
Caolinita	3,60	38,1	1,60	Microclina	4,28	45,3	1,90	Hauyna	0,70	7,4	0,31
Oxicarbonato	0,00	0,0	0,00	Yeso	0,94	9,9	0,42	Yeso	0,30	3,2	0,13
Portlandita	0,19	2,0	0,08	Caolinita	0,93	9,8	0,41	Ettringita	3,15	33,3	1,40
<i>Suma</i>	<i>99,99</i>	<i>1057,4</i>	<i>44,39</i>	<i>Suma</i>	<i>100,03</i>	<i>1057,8</i>	<i>44,41</i>	Ortoclasea	0,00	0,0	0,00
								Caolinita	0,00	0,0	0,00
								<i>Suma</i>	<i>100,01</i>	<i>1057,6</i>	<i>44,40</i>

FB-1				FB-3				FB-5			
Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm
Calcita	66,93	583,3	24,32	Calcita	41,83	364,6	15,20	Calcita	51,56	449,4	18,74
Anortoclasea	3,92	34,2	1,42	Cuarzo	7,93	69,1	2,88	Cuarzo	26,42	230,3	9,60
Yeso	21,08	183,7	7,66	Albita	13,84	120,6	5,03	Albita	17,35	151,2	6,30
Cuarzo	3,17	27,6	1,15	Portlandita	1,68	14,6	0,61	Portlandita	1,32	11,5	0,48
Corindon	1,77	15,4	0,64	Ettringita	2,03	17,7	0,74	Anfibol	1,73	15,1	0,63
Straelingita	0,07	0,6	0,03	Anfibol	8,58	74,8	3,12	Ettringita	1,70	14,8	0,62
Ettringita	3,05	26,6	1,11	Yeso	0,56	4,9	0,20	<i>Suma</i>	<i>100,08</i>	<i>872,2</i>	<i>36,37</i>
<i>Suma</i>	<i>99,99</i>	<i>871,5</i>	<i>36,33</i>	Tenardita	23,50	204,8	8,54				
				Ortoclasea	0,06	0,5	0,02				
				<i>Suma</i>	<i>100,01</i>	<i>871,6</i>	<i>36,34</i>				

FC-1				FC-3				FC-5			
Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm
Cuarzo	24,22	184,2	7,71	Cuarzo	44,35	337,3	14,12	Cuarzo	32,50	247,2	10,35
Albita	42,96	326,7	13,68	Albita	23,86	181,5	7,60	Albita	17,79	135,3	5,66
Calcita	12,92	98,3	4,11	Calcita	9,72	73,9	3,09	Ortoclasea	24,66	187,5	7,85
Anfibol	4,40	33,5	1,40	Anfibol	6,48	49,3	2,06	Calcita	13,68	104,0	4,35
Portlandita	1,91	14,5	0,61	Portlandita	2,58	19,6	0,82	Anfibol	7,79	59,2	2,48
Ettringita	0,50	3,8	0,16	Caolinita	0,73	5,6	0,23	Portlandita	2,70	20,5	0,86
Caolinita	0,98	7,5	0,31	Ettringita	0,72	5,5	0,23	Caolinita	0,26	2,0	0,08
Ortoclasea	12,12	92,2	3,86	Ortoclasea	11,56	87,9	3,68	Ettringita	0,62	4,7	0,20
<i>Suma</i>	<i>100,01</i>	<i>761</i>	<i>31,84</i>	<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	<i>760,5</i>	<i>31,83</i>	<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	<i>760,5</i>	<i>31,83</i>

Tabla 7: Cuantificación de especies en hormigones de fundición de cobre.

En general se aprecia una escasa o nula presencia de Portlandita a nivel superficial, a diferencia de lo que ocurre con el testigo FC, que al parecer no ha

sido tan atacado, lo que debe traducir como un contacto temporal con la solución ácida muy breve, suficiente para provocar el daño superficial constatado en terreno.

Respecto los contenidos de Portlandita originales, se podría asumir que los valores de los testigos FA y FC a profundidades de 3 y 5 centímetros, corresponde a la producida en la etapa de hidratación del cemento y endurecimiento posterior del hormigón.

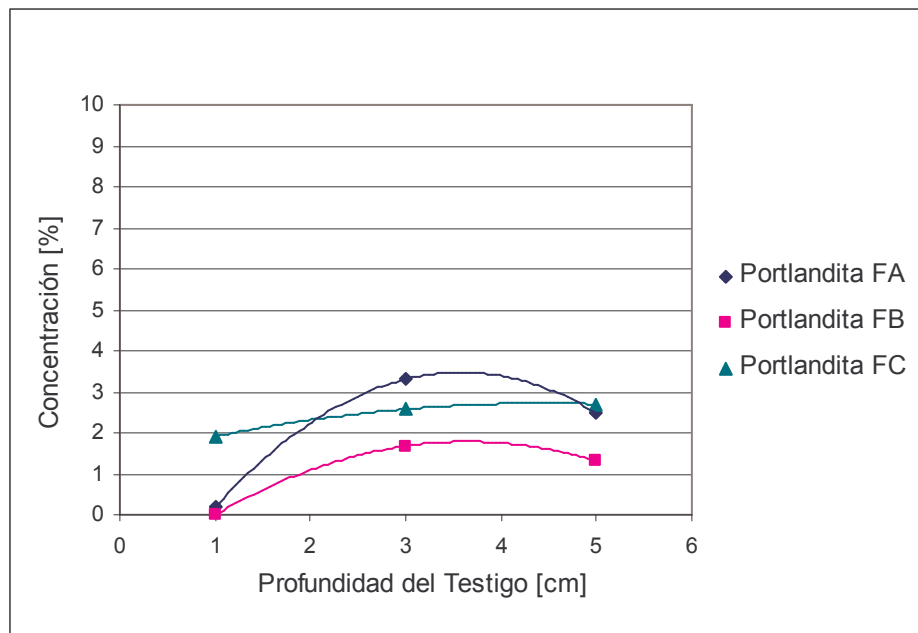


Figura 13: Lixiviación de Portlandita en elementos de hormigón de la fundición.

Por su parte las tendencias de la abundancia de Ettringita son poco exegéticas, puesto que se esperaría un comportamiento como el presentado en las muestras obtenidas de la minera, donde se aprecia claramente una distribución inalterada del compuesto a lo largo de los testigos lo que induce a pensar en que no existe una producción debido a la difusión de sulfatos.

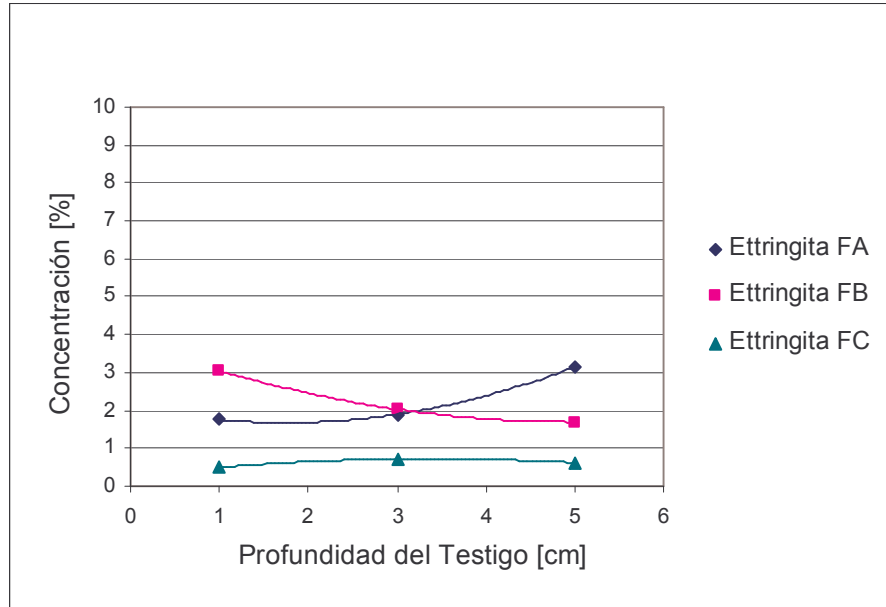


Figura 14: Formación de Ettringita en elementos de hormigón de una fundición.

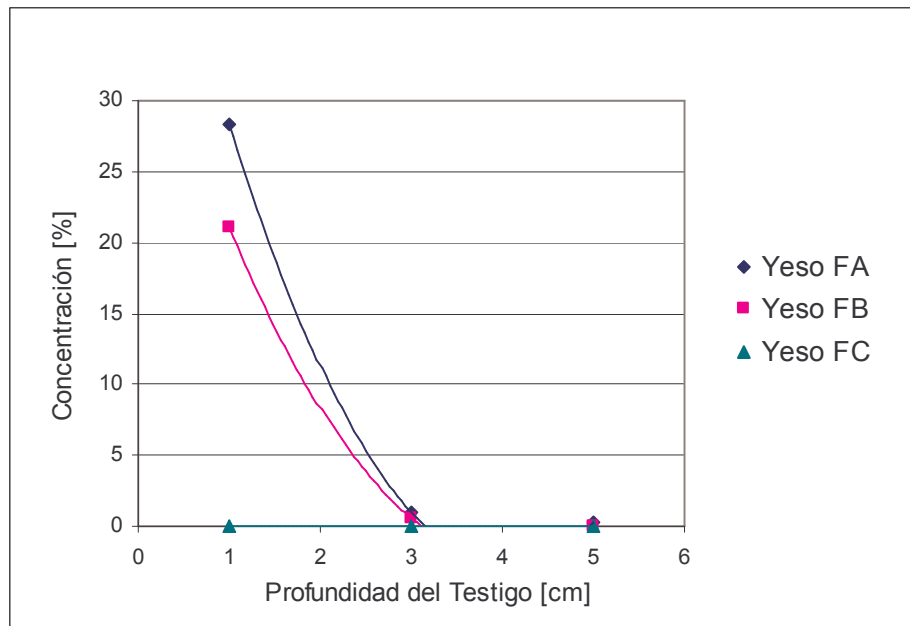


Figura 15: Formación de Yeso en elementos de hormigón de una fundición.

La producción de Yeso a nivel superficial acusa la interacción del ácido sulfúrico y la Portlandita especialmente, los elevados niveles detectados justifican la idea que parte de la acción destructora del ácido sulfúrico se basa en la producción de yeso

y su cristalización con aumento volumétrico, en cantidades que producen el rápido colapso de las superficie que los aloja. Esta puede ser además la causa por la que no se presenta Yeso a mayores profundidades en los testigos sometidos a este agente agresivo.

3.6 PUERTO DE ANTOFAGASTA

3.6.1 CONCENTRACIÓN DE SALES

La difusión de sulfatos y cloruros provenientes del agua de mar, depende principalmente de la ubicación en que la estructura expuesta se encuentre. En la figura 16 se demuestra este hecho, se puede ver la diferencia en general entre los testigos extraídos de bloques no expuestos al contacto permanente con agua de mar (PA y PB) y el testigo de la zona de intermarea PC.

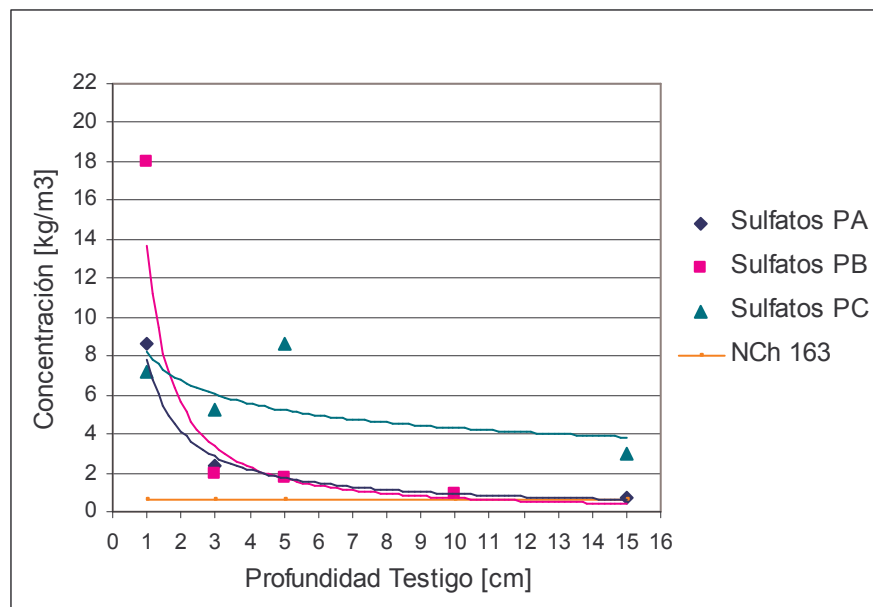


Figura 16: Difusión de sulfatos en bloques de hormigón del molo de Puerto de Antofagasta, expuestos a ambiente marino en distintas condiciones.

En ambos casos PA y PB, observando los gráficos se demuestra que la solución ha logrado penetrar a mayores profundidades prácticamente libre de los sulfatos que han quedado en los primeros centímetros.

Para el testigo PC, esta mayor difusión de cloruros no permite ver ni siquiera una tendencia clara que ayude a estimar cual es el límite de difusión de cloruros a nivel de intermarea. Lo que si es claro es que la acción de lavado del agua de mar impide una mayor acumulación de la superficie, manteniendo a todo el largo del testigo obtenido de este bloque, una concentración entre 5 y 10 kg/m³.

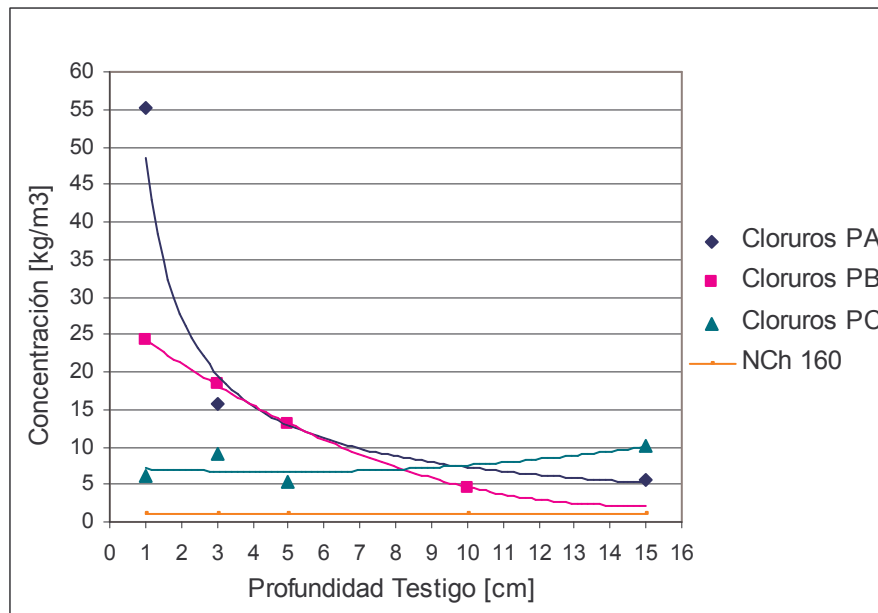


Figura 17: Difusión de cloruros en bloques de hormigón del molo de Puerto de Antofagasta, expuestos a ambiente marino en distintas condiciones.

3.6.2 DETERMINACIÓN DE PH

Resulta extraño como el PH de las muestras superficiales de cada testigo resulta ser tan bajo, comparativamente. La razón de esto puede hallarse en la suma de

varias causas, como la lixiviación de los compuestos cementicios especialmente de la Portlandita la cual se encuentra ausente en la superficie.

Sin embargo aún tales valores de PH no pondrían en riesgo la pasivación de las armaduras si fuera el caso, antes la corrosión se desarrollaría por la difusión de cloruros hacia las armaduras.

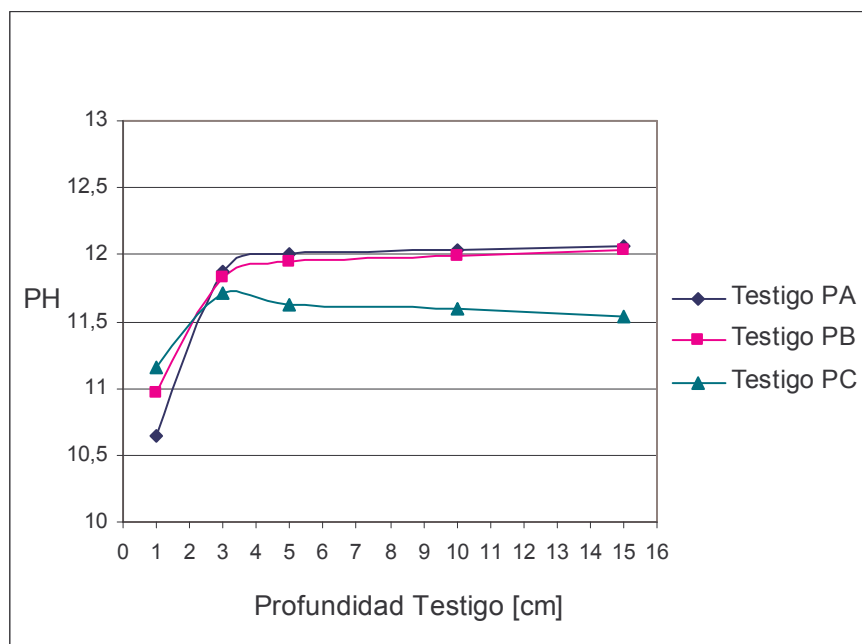


Figura 18: Efectos sobre el PH en bloques de hormigón del molo de Puerto de Antofagasta, sometidos a ambiente marino en distintas condiciones.

3.6.3 CUANTIFICACIÓN DE ESPECIES

Las siguientes tablas presentan las especies cristalinas identificadas por Difracción, la cuantificación por TOPAS como porcentaje de la fase cristalina, el contenido de cada especie por metro cúbico de hormigón y el porcentaje de hormigón al que equivale.

PA-1				PA-3			
Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm
Calcita	42,78	X	X	Cuarzo	48,54	X	X
Halita	17,68	X	X	Albita	12,80	X	X
Cuarzo	23,89	X	X	Portlandita	8,86	X	X
Albita	8,53	X	X	Calcita	12,36	X	X
Vaterita	5,26	X	X	Hidrocalumita	6,42	X	X
Oxido de calcio y hierro	0,00	X	X	Ortoclase	4,78	X	X
Ettringita	1,86	X	X	Hematita	3,54	X	X
<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	X	X	Ettringita	2,12	X	X
				Caolinita	0,58	X	X
				<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	X	X

PB-1				PB-3				PB-4			
Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm
Cuarzo	30,35	130,5	5,40	Cuarzo	22,82	98,1	4,06	Cuarzo	32,78	140,9	5,83
Yeso	18,42	79,2	3,28	Calcita	42,53	182,8	7,56	Albita	16,48	70,8	2,93
Calcita	13,27	57,0	2,36	Albita	16,72	71,9	2,97	Hidrocalumita	22,36	96,1	3,98
Albita	9,24	39,7	1,64	Hidrocalumita	11,45	49,2	2,04	Calcita	11,95	51,4	2,13
Oxido hierro	7,15	30,7	1,27	Ettringita	2,83	12,2	0,50	Microclina	3,60	15,5	0,64
Halita	5,38	23,1	0,96	Microclina	2,50	10,7	0,44	Ettringita	3,52	15,1	0,63
Dolomita	6,73	28,9	1,20	Hematita	1,15	4,9	0,20	Portlandita	1,86	8,0	0,33
Hidrocalumita	4,65	20,0	0,83	<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	<i>429,8</i>	<i>17,78</i>	Caolinita	2,72	11,7	0,48
Ettringita	3,80	16,3	0,68					Dolomita	1,05	4,5	0,19
Paraspurrita	0,00	0,0	0,00					Sulfato calcio hidratado	0,00	0,0	0,00
Ortoclase	1,01	4,3	0,18					Cal	3,68	15,8	0,65
<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	<i>429,8</i>	<i>17,78</i>					<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	<i>429,8</i>	<i>17,78</i>

PC-1				PC-3				PC-4			
Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm	Especie	% Cristal	[kg/m ³]	% Horm
Cuarzo	35,22	252,5	10,73	Cuarzo	35,43	254,0	10,80	Cuarzo	39,20	281,0	11,94
Ettringita	9,78	70,1	2,98	Calcita	13,12	94,1	4,00	Albita	24,58	176,2	7,49
Calcita	12,63	90,5	3,85	Albita	9,75	69,9	2,97	Ettringita	6,30	45,2	1,92
Albita	8,93	64,0	2,72	Ettringita	11,10	79,6	3,38	Calcita	11,52	82,6	3,51
Microclina	15,25	109,3	4,65	Microclina	8,63	61,9	2,63	Hidrocalumita	8,25	59,1	2,51
Hidrocalumita	5,75	41,2	1,75	Brucita	5,27	37,8	1,61	Microclina	6,40	45,9	1,95
Caolinita	6,25	44,8	1,90	Caolinita	4,20	30,1	1,28	Caolinita	3,75	26,9	1,14
Yeso	4,48	32,1	1,37	Hidrocalumita	3,66	26,2	1,12	<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	<i>716,87</i>	<i>30,47</i>
Hematita	1,17	8,4	0,36	Actinolita	5,70	40,9	1,74	<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	<i>760,5</i>	<i>31,83</i>
<i>Suma</i>	<i>99,46</i>	<i>713,0</i>	<i>30,30</i>	Ortoclase	3,14	22,5	0,96				
				<i>Suma</i>	<i>100,00</i>	<i>716,9</i>	<i>30,47</i>				

Tabla 8: Cuantificación de especies en bloques del puerto de Antofagasta.

Para una mejor comprensión se grafican los valores cuantificados mediante TOPAS como porcentajes de la fase cristalina del hormigón, de las especies más importantes, Portlandita, Ettringita, Yeso y Brucita, de cada testigo. Las tendencias de los gráficos no varían en comparación con los valores obtenidos en kg/m³ de hormigón.

La figura 19 muestra los contenidos de Portlandita de los testigos extraídos de bloques de hormigón en distintas ubicaciones, donde se demuestra que la cantidad de hidróxido cálcico remanente en el hormigón, tiene directa relación con la ubicación en que se encuentra respecto al mar.

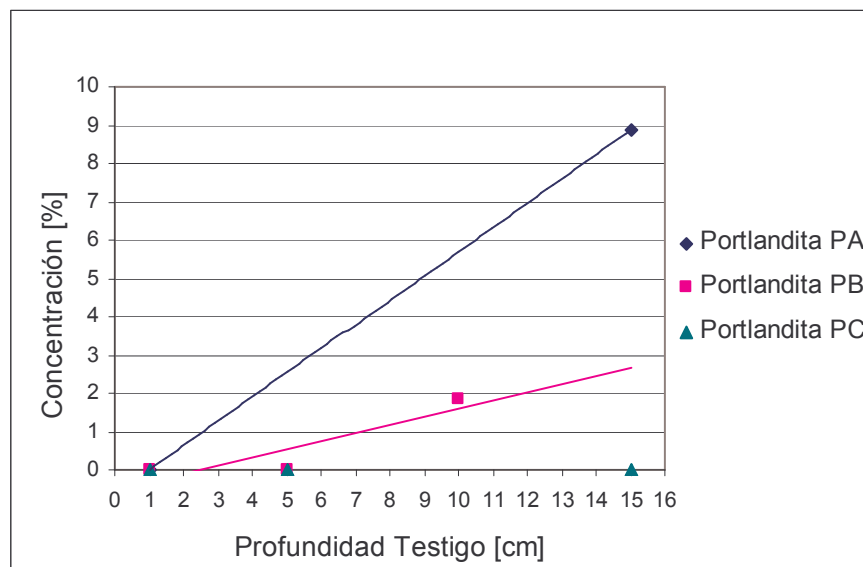


Figura 19: Lixiviación de Portlandita en bloques de hormigón del molo de Puerto de Antofagasta, expuestos a ambiente marino en distintas condiciones.

Para el bloque de la zona de intermarea la acción del agua de mar ha eliminado toda la Portlandita a lo largo de 15 centímetros al menos, esto concuerda con el perfil de difusión de cloruros.

Es posible, a la luz de estos antecedentes, asociar la difusión de la solución hacia el interior de la masa con la lixiviación de la Portlandita, reconociendo tal avance por el rastro de cloruros que va dejando a medida que penetra en el hormigón.

Respecto a los contenidos de Ettringita, es posible por medio de la observación de las concentraciones en los testigos de hormigón obtenidos, presentadas en la figura 20, reconocer una relación entre las condiciones de exposición del bloque y la generación de la sal de Candlot. Conocidas las profundidades de difusión de agua de mar para estos hormigones, se debe recordar además que los cloruros impiden en cierto grado la generación de cristales de sulfoaluminatos.

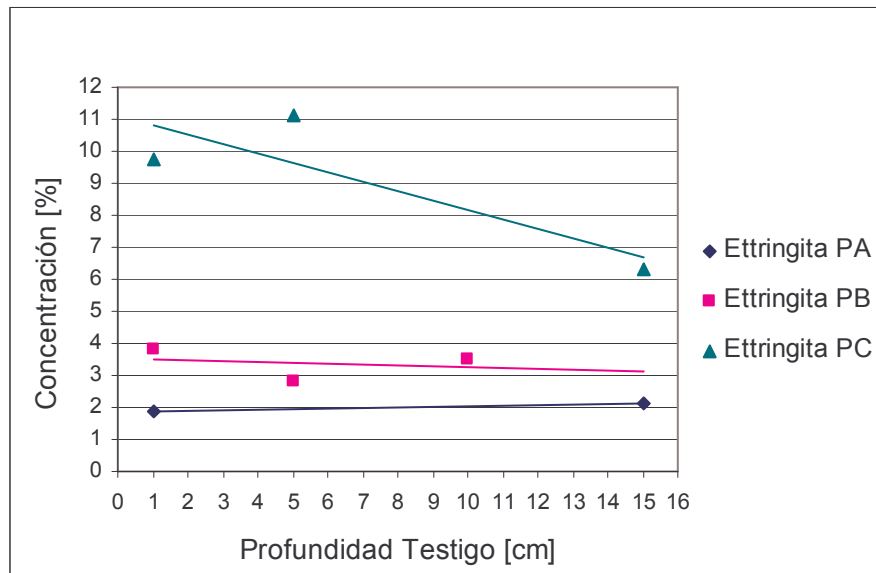


Figura 20: Formación de Ettringita en bloques de hormigón del molo de Puerto de Antofagasta, expuestos a ambiente marino en distintas condiciones.

Por su parte el testigo PC, muestra una clara influencia de los contenidos de sulfatos aportados por la penetración de agua de mar en la masa de hormigón.

Referente a los contenidos de sulfato cálcico, de la figura 21, es posible observar que ésta sólo se ha desarrollado en la superficie de los hormigones expuestos a lo menos a salpicaduras de agua de mar (PB y PC), en el bloque no expuesto a la acción directa del agua de mar no se detectó formación de Yeso.

Sobre el testigo PB persiste una mayor concentración de Yeso que sobre PC, debido principalmente al la acción erosiva del agua de mar sobre este último, correspondiente a la zona de intermarea. Se debe además tomar en cuenta el

aumento en la solubilidad del Yeso que provoca el cloruro sódico especialmente, que termina impidiendo una mayor cristalización del mismo.

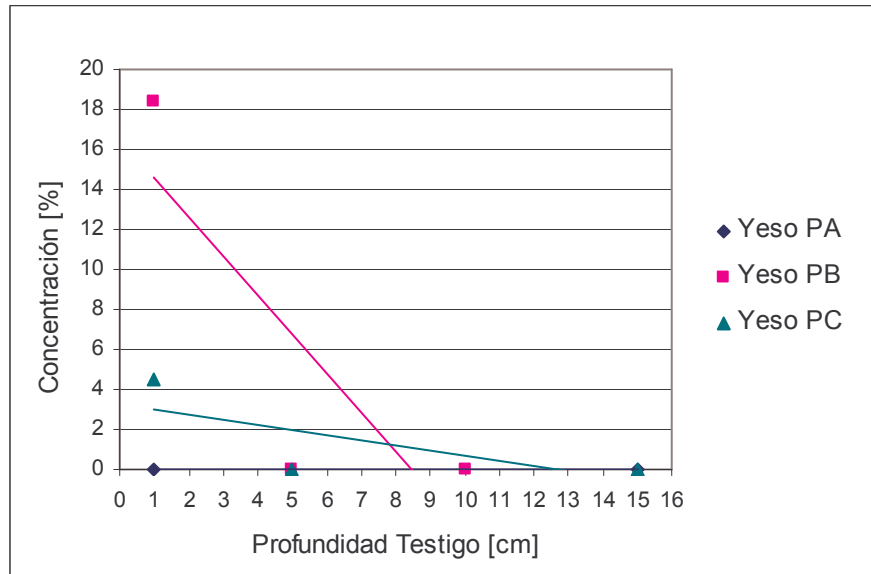


Figura 21: Formación de Yeso en bloques de hormigón del molo de Puerto de Antofagasta, expuestos a ambiente marino en distintas condiciones.

La figura 22 muestra las proporciones de Brucita encontradas en las muestras del puerto, como puede verse las condiciones de exposición de los testigos PA y PB no son suficientes para la generación de Brucita, la cual requiere de una difusión de sales magnésicas del agua de mar, además su generación debe oponerse al aumento en la solubilidad que le imponen los cloruros al igual que al Yeso.

De observar los perfiles de difusión de cloruros y sulfatos para el testigo PC, se puede vislumbrar la relación entre ambas sales a los 5 centímetros de profundidad, la única muestra donde se detectó Brucita, donde se contrasta la menor cantidad de cloruros (aproximadamente 5 kg/m^3) y la mayor cantidad de sulfatos ($8,6 \text{ kg/m}^3$) entre los que se cuentan sulfatos magnésicos por supuesto.

Claramente ésta no constituye barrera suficiente para evitar la difusión del agua de mar a mayores profundidades.

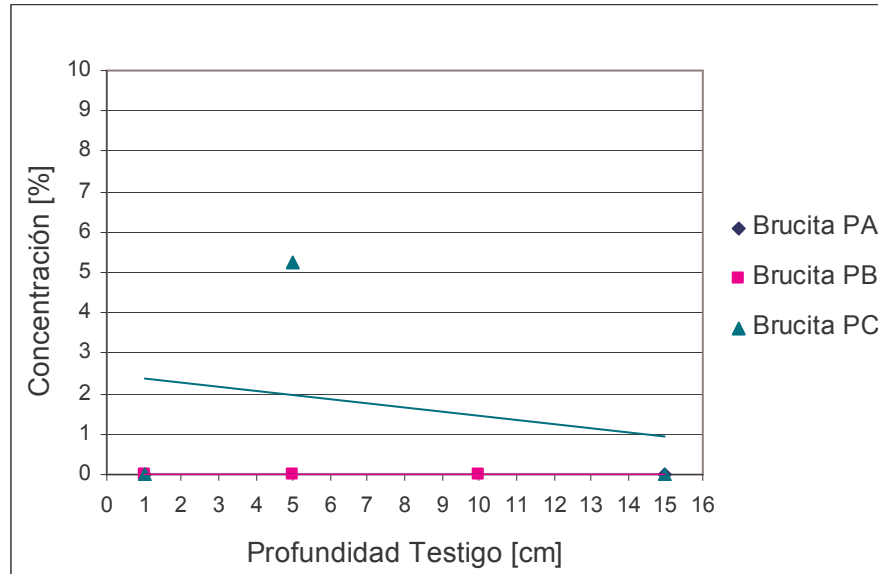


Figura 22: Formación de Brucita en bloques de hormigón del molo de Puerto de Antofagasta, expuestos a ambiente marino en distintas condiciones.

4. CONCLUSIONES

Las condiciones de exposición de los elementos de hormigón revisados en la presente investigación se dividen en dos, ambiente ácido (por la acción de ácido sulfúrico) y ambiente marino, los cuales permiten concluir lo siguiente.

4.1 AMBIENTE AGRESIVO DE CARÁCTER ÁCIDO

Sobre elementos de hormigón sometidos a derrames de ácido sulfúrico como las ocurridas en la faena minera y de fundición, se debe esperar un deterioro superficial en las zonas de contacto con ácido, especialmente en bases de elementos verticales (muros, pilares, etc.) y en losas de piso por donde escurre la solución.

De los análisis químicos practicados a los testigos de hormigón extraídos, se propone un perfil (figura 23), asumiendo una tendencia lineal (por simplicidad), que refleja la distribución general de difusión de sales (sulfatos y cloruros) para soluciones de ácido sulfúrico 40 y 150 [g/lit] y bajos contenidos de cloruros, correspondientes a las concentraciones estudiadas.

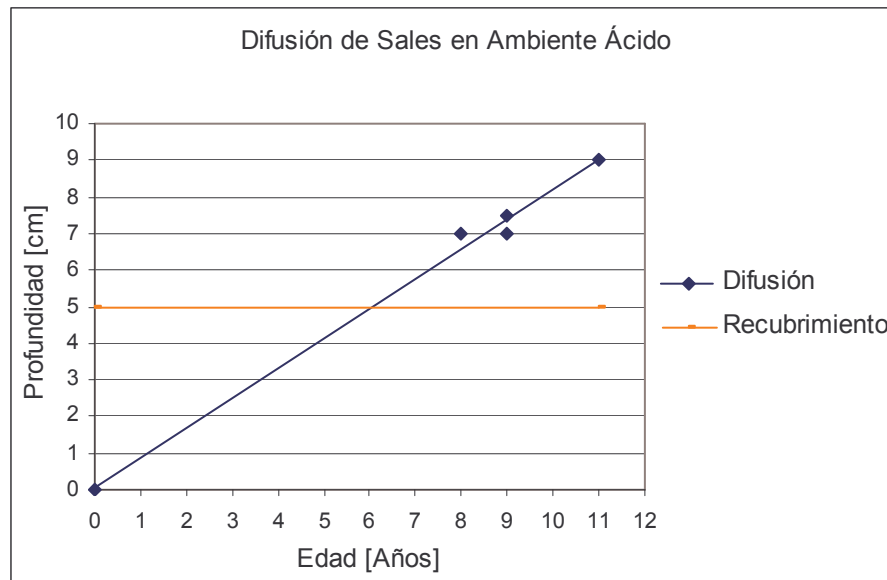


Figura 23: Perfil de difusión de sales en hormigones sometidos a contacto con ácido sulfúrico.

Según ella se puede estimar que en 6 años aproximadamente la armadura de refuerzo será alcanzada por el frente de cloruros, además de la penetración de sulfatos que se suponen simultáneas, bajo condiciones de exposición similares a las de estudio, es decir derrames frecuentes. Se excluyen las condiciones de exposición semejantes a las del sobrecimiento de un precipitador electrostático húmedo en Fundición Altonorte (testigo FB), pues sobre éste el derrame no solo es frecuente, sino mas bien constante e incesante, lo que provoca mayores daños tras una mayor difusión además.

A continuación se propone un perfil de deterioro superficial de un elemento de hormigón, con una tendencia lineal (por simplicidad), expuesto a la acción de

ácido sulfúrico, en las mismas condiciones mencionadas. Según esta propuesta un elemento pierde 5 centímetros superficiales a los 10 años de exposición aproximadamente, a esta edad si la armadura no tiene mas recubrimiento, es muy probable que se encuentra en proceso de corrosión o totalmente descompuesta.

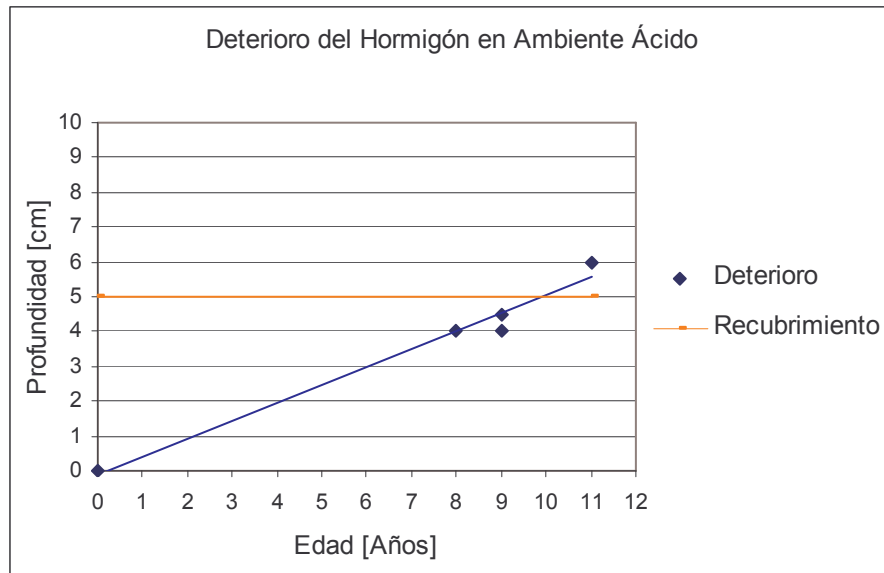


Figura 24: Perfil de deterioro superficial de hormigones sometidos a contacto con ácido sulfúrico.

El estudio de los hormigones mediante la técnica de Difracción de Rayos X y el método de Rietveld, arroja luz respecto a los efectos del ácido sulfúrico sobre la composición química y específicamente sobre la fase cristalina del hormigón de cemento. Los efectos más significativos detectados por el método se mencionan a continuación.

Aparentemente no existe una producción adicional de Ettringita a la formada durante la etapa de fraguado y endurecimiento posterior del hormigón, aunque no es posible ser tan categórico en esto por la poca cantidad de análisis realizados.

La Portlandita o hidróxido cálcico, es altamente atacada en un ambiente ácido, éste mediante un mecanismo de lixiviación es eliminado de la estructura del hormigón, sin embargo además, a sus expensas, el ácido sulfúrico reacciona con

éste formando Yeso, el cual se produce solamente a nivel superficial, no coincidiendo necesariamente su formación con la difusión de sales ni con el perfil de lixiviación de Portlandita.

Las elevadas y dispares cantidades de calcita (carbonato cálcico) detectadas en todas las muestras hacen suponer que su origen está principalmente en los áridos empleados, pudiendo provenir además del cemento mismo. Sin embargo no se pueden relacionar las cantidades detectadas con posibles fenómenos de carbonatación que puedan tener lugar en tales hormigones.

Finalmente, la corrosión del hormigón producto del ataque de ácido sulfúrico, consiste en la destrucción de la Portlandita en el espesor de difusión y en la formación de Yeso en la superficie. Pueden haber efectos sobre compuestos amorfos del aglomerante, pero no son detectables por esta técnica.

4.2 AMBIENTE MARINO

Se distingue claramente una influencia que varía con la ubicación de los elementos de hormigón con respecto al mar. Debido a esto, se confirma la existencia de 3 zonas en las cuales la acción del agua de mar ejerce una acción corrosiva en diferentes grados.

Respecto a la zona sumergida no es posible emitir conclusiones, sin embargo de las observaciones hechas durante los estudios consultados [Ref.3] se puede decir en términos generales que los hormigones que permanecen sumergidos, se encuentran en mejores condiciones que los hormigones de la zona de intermareas y en peores condiciones que las zonas superiores, expuestas a la humedad salina y salpicaduras.

Las complejas reacciones del medio marino sobre el hormigón se relacionan con su penetración a través de su estructura de poros, la difusión de sales que deja a su paso es un buen índice de tal penetración, por lo que se propone un perfil de difusión de sales (figura 25) a fin de estimar la velocidad de avance de la solución

al interior de la masa de hormigón. El perfil propuesto supone una tendencia lineal, y se distinguen las condiciones de exposición del hormigón, entendiéndose como protegido aquel que no se encuentra al alcance directo del agua de mar, por el lado interior del molo, el hormigón expuesto es aquel que se encuentra sobre el nivel de mareas, propenso a la acción de salpicaduras de agua de mar y al spray salado, el hormigón en la zona de intermarea se encuentra bajo la acción de agua de mar y su variación de mareas.

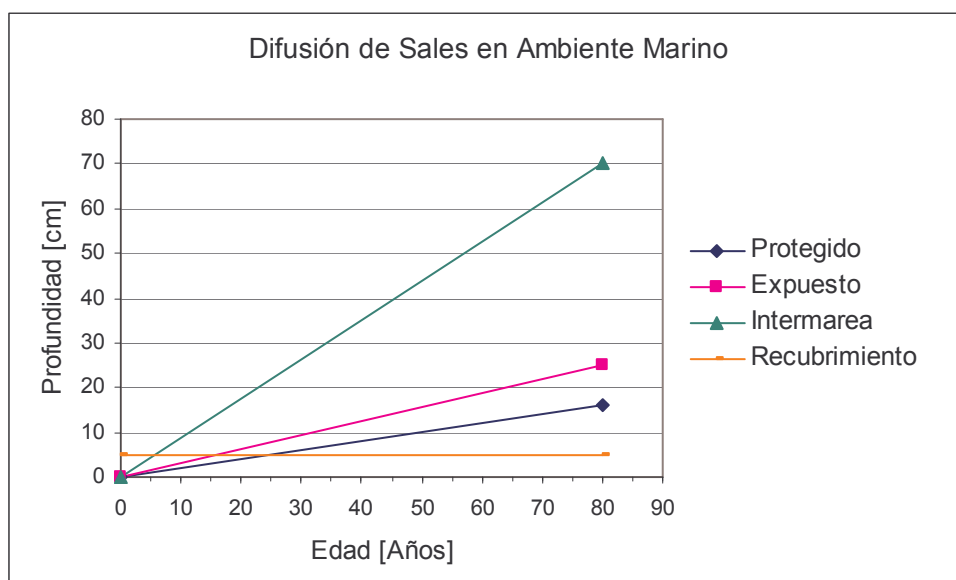


Figura 25: Perfil de difusión de sales en hormigones sometidos a la acción del agua de mar en distintas condiciones de exposición.

Tal difusión es válida para el hormigón utilizado en la elaboración de los bloques del molo del puerto de Antofagasta, sin embargo estas estimaciones se pueden considerar como una cota superior, si se desea extender su aplicación para hormigones utilizados en la actualidad, en que se emplean cementos con adiciones y mejores sistemas de diseño, elaboración y colocación.

La difusión esperada para un hormigón sumergido, debiera encontrarse entre la de los hormigones Expuesto e Intermarea, inclinado más hacia éste último.

Según ésta, la armadura de refuerzo de un hormigón con recubrimiento de 5 cm de espesor, es alcanzada por los cloruros a los 5, 15 y 25 años respectivamente.

El mayor deterioro es ocasionado en el nivel de variación de mareas. Se propone, en la figura 26 un perfil de este deterioro que asume una tendencia lineal (por simplicidad), basado en los daños observados en terreno y que puede ser tomado como una referencia que acota superiormente el daño en un hormigón.

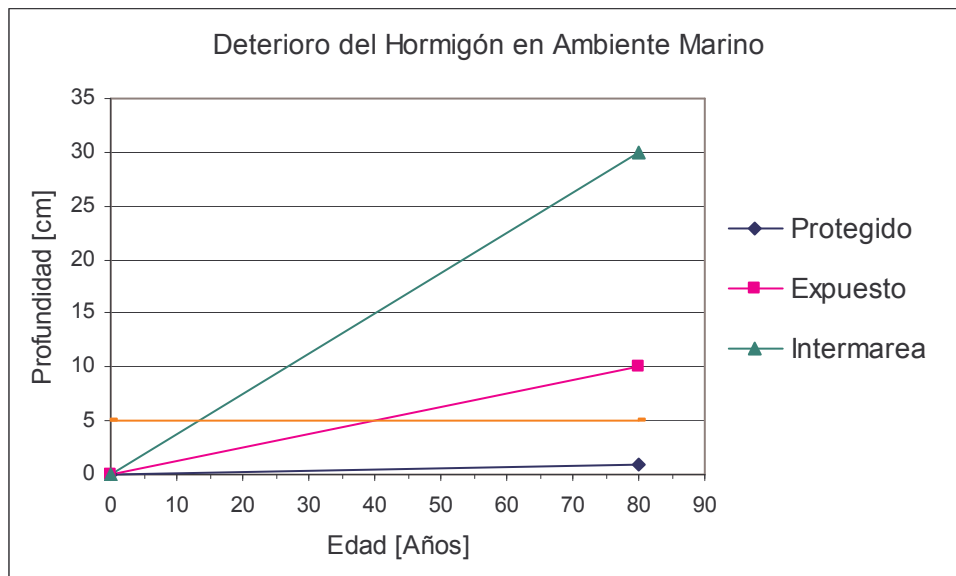


Figura 26: Perfil de deterioro superficial de hormigones sometidos a la acción del agua de mar en distintas condiciones de exposición.

El estudio de las especies minerales detectadas en las muestras de los hormigones estudiados, permiten decir lo siguiente.

La Portlandita es fuertemente atacada por los mecanismos de lixiviación e intercambio iónico, provocando su desaparición a nivel superficial luego de 80 años de exposición a un ambiente marino en cualquier condición. Además en la zona de intermarea ha sido removida en una profundidad mayor a 15 centímetros.

Existe una producción de Ettringita relacionada con la difusión de la solución agresiva y dependiente de la ubicación del hormigón respecto al mar. La zona de

intermarea registra la mayor cantidad de Ettringita expansiva. Los elevados contenidos en general, son causa del cemento sin adiciones empleado.

La producción de Yeso toma importancia solo a nivel superficial.

No es posible atribuirle a la Brucita propiedades protectoras importantes pues su escasa pero importante formación no impide la difusión de la solución hacia el interior ni mucho menos su acción corrosiva.

Los contenidos de Calcita (carbonato cálcico) no permiten su asociación al desarrollo de la carbonatación en el hormigón, sin embargo su alto contenido debe estar relacionado a los áridos empleados y al cemento.

Finalmente, la corrosión del hormigón producto del agua de mar, se debe principalmente a la destrucción de la Portlandita y a la formación de Ettringita que ocasiona daños a partir de las aristas, ayudado por la acción del oleaje. La influencia del agua de mar depende de la ubicación del hormigón respecto a éste, siendo la mas perjudicial la zona de Intermareas. No se descartan acciones contra especies amorfas del conglomerante.

4.3 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DEL HORMIGÓN DE CEMENTO

Aunque escapa al objetivo de la investigación, es posible a partir del análisis cuantitativo, dar una idea de las proporciones en que estos compuestos cristalinos se encuentran presentes en el hormigón.

Se puede inferir que en general, un hormigón estructural (grado H-25 y H-30) está compuesto de un 35% de material cristalino, detectable por Difracción de Rayos X y un 65% de material amorfo, aproximadamente.

La proporción amorfa contiene la Tobermorita además de las especies aportadas por los áridos, responsable de la resistencia del cemento, por lo que mediante esta técnica no es posible descubrir su comportamiento frente a los agentes agresivos a que el hormigón se encuentra expuesto.

La Portlandita supera pocas veces el 3% de la fase cristalina, en las muestras de hormigón más profundas donde la lixiviación es mínima o nula, si se asume que el hormigón tiene una dosificación de 300 kg de cemento por metro cúbico, entonces aproximadamente el 10% del cemento se transformó en Portlandita.

El contenido de Ettringita en las muestras más profundas promedia 1,3% de la fase cristalina, si se asume una dosis de cemento de 300 kg para el hormigón, entonces menos del 5% del peso de cemento equivale a Ettringita, siendo la proporción de cemento mucho menor pues el C_3A compone un 35% del cristal, siendo entonces 1,75% del cemento el que se transforma aproximadamente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Biczok, Irme. "Corrosión y Protección del Hormigón". Ediciones Urmo (1972).
2. Lira O., Jorge. "Obras Marítimas". Editorial Universitaria S. A. (1963).
3. "Diagnóstico del enrocado de las escolleras, Puerto de Antofagasta". POMINA, (Abril 2001 y Diciembre 2002).
4. Gomez De La Torre, M^a Ángeles. "The superstructure of C_3S from synchrotron and neutron powder diffraction and its role in quantitative phase analysis". Cement and Concrete Research 32 (2002).
5. Gomez De La Torre, M^a Ángeles. "Rietveld quantitative amorphous content analysis". Journal of applied crystallography 34 (2001).