



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTENIDO INTERNO TOTAL DE SULFATOS EN  
HORMIGONES CON DIFERENTES GRADOS DE RESISTENCIA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DAMIÁN ESTEBAN CORNEJO TORO

PROFESOR GUÍA:  
JACQUES BORNAND ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FEDERICO DELFÍN ARISTÍA  
MIGUEL GONZÁLEZ TALEP

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil  
POR: Damián Cornejo Toro  
FECHA: 17/05/2017  
PROFESOR GUÍA: Jacques Bornand Araya

## DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTENIDO INTERNO TOTAL DE SULFATOS EN HORMIGONES CON DIFERENTES GRADOS DE RESISTENCIA

El ataque interno en el hormigón debido a la acción de sulfatos presentes en su matriz, genera reacciones químicas expansivas que pueden originar micro fisuras y una degradación progresiva del material. Los sulfatos pueden provenir de diversas fuentes, en particular pueden provenir de los materiales con los que se confecciona el hormigón. En ese ámbito, los áridos pueden ser una fuente importante de incorporación de este tipo de sales, sobre todo en zonas, como el litoral costero del norte de Chile, en las cuales por sus características climáticas es recurrente encontrar áridos con altos contenidos de sulfatos, mayores a los que la norma NCh163 Of.2013 acepta.

La normativa actual principalmente limita el contenido de sulfatos al interior del hormigón, ya sea con requisitos a los materiales constituyentes y/o al contenido total de sulfatos con que resulta el hormigón. En este contexto es recurrente la discusión sobre la factibilidad de uso de áridos con contenidos de sulfatos por sobre los límites normativos, considerando el desempeño del hormigón y el potencial real de daño que puede ocasionar la reacción de los sulfatos con respecto, principalmente, al grado de resistencia del hormigón y los materiales, en particular los cementos, que se utilizan en el país.

En este trabajo se estudian hormigones con resistencias a compresión, a los 28 días en cubos de 20 cm, que van desde los 15 MPa a los 82 MPa, mientras que los contenidos de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), en los áridos, abarcan desde el 0,30% al 1,44%. La evaluación del desempeño de cada hormigón se realizó midiendo la expansión de probetas en el tiempo, hasta los 180 días, lo cual representa un indicativo del grado de fisuración interior por efecto de las reacciones químicas expansivas de los sulfatos. Los hormigones estudiados fueron confeccionados con materiales disponibles comercialmente en el país. En particular, se utilizó un cemento portland puzolánico de origen nacional y áridos provenientes del río Maipo. Además, la incorporación del sulfato se realizó artificialmente, a través de la incorporación de yeso, en cantidades controladas, en la matriz del hormigón.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que la forma en que la NCh 170 Of.2016 limita el contenido interno de sulfatos en el hormigón, sí representa el comportamiento real de los hormigones ante el ataque interno por sulfatos, es más, el límite podría relajarse de 2,0% a 2,6%. De igual manera, se observa que el expresar el contenido interno total de sulfatos (expresado como  $\text{SO}_4^{-2}$ , referidos al peso del cemento y considerando el aporte de todos los materiales constituyentes), también representa el comportamiento real de los hormigones atacados internamente por sulfato, donde el límite de contenido interno total de sulfatos podría ser fijado en 6,5% para los distintos hormigones estudiados.

*Para mis padres, hermana y familia*

# Agradecimientos

A mis padres, Oriana y Juan, quienes son los grandes responsables de haber llegado donde estoy, apoyarme siempre y creer en mí más que yo mismo. A mi hermana Sandra, quien ha sido mi compañera en esta travesía terremoteada por Santiago.

A mi profesor guía, Jacques, por su disponibilidad y ayuda brindada en el largo recorrido que tuvo la memoria. A don Miguel Ángel y don Federico, por el interés demostrado desde el comienzo del trabajo y la ayuda prestada cada vez que la necesité.

A mis amigos de la U: Jonás, Malla, Ichi, Rodrigo y Seba (desaparecido), por haber sido parte de grandes momentos vividos juntos, que espero sean solo los primeros (See). Mención honrosa a los tres que desaparecieron.

A mis amigos de Civil: Natu, David, Vale, Sofi, Kati y Francisco, por haber hecho la pasada por el departamento mucho más agradable. En especial a la Natu y el David, con quienes dimos dura lucha en los ramos, miles de pautas pasaron y aquí estamos. Por supuesto, no puedo dejar de nombrar a mi TI, que apañó en cada control.

Al grupo de WSP, Sed Eterna, por ser el medio para generar una parte fundamental en la pasada por la U, el compartir un par de chelas (see). Gracias por tantos, buenos y memorables momentos vividos, que estoy seguro no serán los últimos (sáquense uno pronto!).

Al Tío Fernando, la Mónica y el Lalo, quienes generosamente me abrieron las puertas de su hogar cuando lo necesité.

A IDIEM, por facilitarme sus laboratorios, maquinaria y parte de los materiales necesarios para la realización del trabajo. A Rodrigo Lavín, Luis Pulgar y Matías Figueroa, por incluirme dentro de la programación del laboratorio para hacer los hormigones. Y en particular a quienes me ayudaron en la preparación de los hormigones, Pablo Villar, Iván Vélchez y Pedro Cárdenas, en la medición de las probetas, Cristian Bustamante y Miguel Llorens. Gracias también a Braulio Burgos por la ayuda prestada en la realización de ensayos específicos y en especial por aquella prestada en un momento difícil del trabajo.

A mis compañeros de trabajo, la Unidad Hormigones Ingeniería de IDIEM: LRC, PSB, CTh, FTP y DLS, por tantas experiencias compartidas, gratos momentos vividos, conocimientos adquiridos y por enseñarme a agregarle merkén a la memoria (oh sí).

A aquellos que sin saberlo me dieron su apoyo desde su trabajo: la gloriosa Universidad de Chile, el Pongámonos Serios, con toda la bagualidad incluida (Tucutú!), y a Guachupé, junto a su hinchada, La 22. Quienes desde su vereda y en momentos distintos de la vida universitaria fueron un gran apoyo.

A todos quienes de alguna u otra forma formaron parte de mi crecimiento como estudiante, desde las escuelas, pasando por el colegio y finalmente llegando a la U. Todos de cierta forma han sido parte de este trabajo que cierra un ciclo.

Y por supuesto que no puedo olvidar a todos aquellos que no creyeron a mí, a ellos solo puedo decir: “...lo que no me mata, me tendrá que hacer feliz, lo único que quiero es olvidar y sonreír...” (Todo Va Lento, Guachupé).

Gracias Totales!!!

# TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
I.1 Presentación del tema .....	10
I.2 Objetivo General .....	11
I.3 Objetivos Específicos.....	11
I.4 Alcance.....	11
<b>CAPÍTULO II : ANTECEDENTES.....</b>	<b>12</b>
II.1 Introducción.....	12
II.2 Procedencia del sulfato.....	13
II.3 Química del ataque por sulfato .....	15
II.4 Manifestaciones del ataque por sulfato.....	16
II.4.1 Disolución o eliminación de la pasta de cemento del hidróxido de calcio. ....	16
II.4.2 Cambios continuos en la composición iónica de la fase líquida de los poros. ....	16
II.4.3 Adsorción o quimisorción de componentes iónicos presentes en la fase líquida de poro sobre la superficie de los sólidos hidratados presentes en el sistema de cementación. ....	17
II.4.4 Descomposición de componentes de clinker aún no hidratado. ....	17
II.4.5 Descomposición de productos de hidratación previamente formados.....	17
II.4.6 Formación de yeso .....	17
II.4.7 Formación de etringita .....	17
II.4.8 Formación de taumasita.....	18
II.4.9 Formación de brucita y silicato de magnesio hidratado. ....	18
II.5 Tipos de reacciones expansivas .....	18
II.5.1 Incremento del volumen sólido .....	18
II.5.2 Expansión en una reacción topoquímica.....	19
II.5.3 Crecimiento de cristal orientado .....	20
II.5.4 Expansión causada por la presión de cristalización.....	20
II.6 Consecuencias.....	21
II.6.1 Apariencia externa y estabilidad volumétrica del hormigón.....	21
II.6.2 Microestructura del hormigón.....	23
II.6.3 Propiedades mecánicas del hormigón.....	23
II.7 Efecto de la puzolana en la resistencia al ataque por sulfato .....	24
II.8 Límite permisible para la expansión longitudinal .....	26
II.9 Normativa Internacional .....	29

<b>CAPÍTULO III : ESTUDIO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>30</b>
III.1 Introducción .....	30
III.2 Desarrollo del trabajo experimental.....	30
III.2.1 Caracterización de los Materiales .....	30
III.2.2 Moldes.....	34
III.2.3 Dosificación del hormigón .....	36
III.2.4 Contenido total de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) respecto al peso del cemento .....	36
III.2.5 Contenido de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) según la NCh170 Of.2016.....	37
III.2.6 Contenido total de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) expresados como $\text{kg/m}^3$ .....	37
III.2.7 Identificación de los hormigones.....	38
III.2.8 Confección de los hormigones .....	38
III.2.9 Llenado de moldes.....	38
III.2.10 Desmolde y Curado.....	39
III.2.11 Medición inicial de las probetas .....	39
III.2.12 Medición de las expansiones.....	40
III.2.13 Resistencia a compresión .....	40
III.3 Resultados.....	40
III.3.1 Propiedades de los hormigones confeccionados.....	40
III.3.2 Comportamiento de los hormigones en estudio .....	43
<b>CAPÍTULO IV : ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
IV.1 Propiedades de los hormigones .....	48
IV.1.1 Composición química de los hormigones, contenido de $\text{SO}_4^{-2}$ .....	48
IV.1.2 Propiedades en estado endurecido .....	48
IV.1.3 Comportamiento de los hormigones estudiados en el ensayo de expansión .....	51
IV.1.4 Influencia del curado permanente bajo agua .....	59
<b>CAPÍTULO V : CONCLUSIONES</b> .....	<b>60</b>
<b>CAPÍTULO VI : BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>62</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-1: Valores de contenidos de sulfato en forma de $SO_4^{-2}$ en yacimientos de áridos de la II Región.....	14
Tabla II-2: Límites máximos admisibles de $SO_4^{-2}$ dados por estándares internacionales.....	29
Tabla III-1: Propiedades físicas y químicas del cemento puzolánico. ....	31
Tabla III-2: Ensayos físico-mecánicos y químicos para un cemento Melón Extra. ....	31
Tabla III-3: Distribución de los cementos en los hormigones confeccionados.....	31
Tabla III-4: Contenido de $SO_4^{-2}$ de los yesos utilizados.....	31
Tabla III-5: Distribución de los yesos en los hormigones confeccionados.....	32
Tabla III-6: Granulometría de los áridos.....	32
Tabla III-7: Propiedades físicas de los áridos. ....	33
Tabla III-8: Propiedades químicas de los áridos.....	33
Tabla III-9: Contenido de $SO_4^{-2}$ en el agua. ....	33
Tabla III-10: Contenido de $SO_4^{-2}$ en el aditivo.....	34
Tabla III-11: Porcentaje de aditivo utilizado en los hormigones. ....	34
Tabla III-12: Dosificación de los hormigones de prueba.....	36
Tabla III-13: Dosificación del yeso para cada hormigón de prueba.....	36
Tabla III-14: Contenido total de $SO_4^{-2}$ para cada hormigón de prueba, referido al peso del cemento. ....	37
Tabla III-15: Contenido de $SO_4^{-2}$ en el hormigón según requisito de la NCh170 Of.2016. ....	37
Tabla III-16: Contenido de $SO_4^{-2}$ total en el hormigón, expresado en $kg/m^3$ . ....	37
Tabla III-17: Identificación de cada hormigón de prueba confeccionado. ....	38
Tabla III-18: Propiedades del hormigón fresco. ....	40
Tabla III-19: Resistencias a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,35. 41	
Tabla III-20: Resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,50 ..	41
Tabla III-21: Resistencias a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,65	42

Tabla III-22: Resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,80 ..	43
Tabla III-23: Expansiones para los hormigones de A/C = 0,35 hasta los 180 días.....	44
Tabla III-24: Expansiones para los hormigones de A/C = 0,50 hasta los 180 días.....	45
Tabla III-25: Expansiones para los hormigones de A/C = 0,65 hasta los 180 días.....	46
Tabla III-26: Expansiones para los hormigones de A/C = 0,80 hasta los 180 días.....	47
Tabla IV-1: Contenido de $SO_4^{2-}$ en el hormigón según requisito de NCh 170.....	48
Tabla IV-2: Pérdida de resistencia a la compresión entre el hormigón con mayor y menor contenido de $SO_4^{2-}$ para una misma relación agua/cemento [%].....	48
Tabla IV-3: Cumplimiento del límite de expansiones de 0,04% según el contenido interno total de $SO_4$ .....	51
Tabla IV-4: Cumplimiento del límite de expansiones de 0,04% según la NCh170 Of.2016.....	51
Tabla IV-5: Cumplimiento del límite de expansiones de 0,04% según la cantidad total de $SO_4^{2-}$ en el hormigón. ....	51
Tabla IV-6: Tabla resumen del cumplimiento o no del límite de expansión de 0,04%. ....	56
Tabla IV-7: Tabla resumen del cumplimiento o no del límite de expansión de 0,03%. ....	57
Tabla IV-8: Tabla resumen del cumplimiento o no del límite de expansión de 0,02%. ....	58
Tabla IV-9: Tabla resumen del cumplimiento o no del límite de expansión de 0,01%. ....	58



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1: Expansiones en prismas de mortero, a partir de yeso añadido a la mezcla. (Fuente: Skalny, Marchand y Odler, 2003) .....	22
Figura II-2: Expansiones en prismas de mortero sometidos a DEF. Fuente: Skalny, Marchand y Odler, 2003 .....	22
Figura II-3: Resistencia y expansiones de morteros bajo ataque por sulfato inducido por exceso de yeso.....	23
Figura II-4: Influencia del reemplazo de cemento (desde 0 a 50%) por puzolana natural, en expansiones y fisurado de prismas de mortero sumergidos en agua de mar.....	25
Figura II-5: Influencia del reemplazo de cemento (desde 0 a 50%) por diatomeas calcinadas, en expansiones y fisurado de probetas de mortero sumergidas en agua de mar. ....	26
Figura II-6: Probeta cilíndrica y prismática para el LPC test method n°66.....	27
Figura II-7: Etapas del curado de las probetas en el LPC test method n° 66. ....	27
Figura II-8: Ciclo de humedecimiento y secado de las probetas en el LPC test method n° 66. ....	28
Figura III-1: Granulometría de los áridos.....	33
Figura III-2: Vista en planta del diseño del molde. ....	35
Figura III-3: Vista lateral del molde de la viga de hormigón.....	35
Figura III-4: Vista superior del molde de la viga de hormigón.....	35
Figura III-5: Moldes llenos de hormigón antes del vibrado. ....	39
Figura III-6: Moldes platachados posterior al vibrado.....	39
Figura III-7: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,35.....	41
Figura III-8: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,50.....	42
Figura III-9: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,65.....	42
Figura III-10: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,80.....	43
Figura III-11: Gráfico de las expansiones para los hormigones de A/C = 0,35 hasta los 180 días. ....	44

Figura III-12: Gráfico de las expansiones para los hormigones de A/C = 0,50 hasta los 180 días. .....	45
Figura III-13: Gráfico de las expansiones para los hormigones de A/C = 0,65 hasta los 180 días. .....	46
Figura III-14: Gráfico de las expansiones para los hormigones de A/C = 0,80 hasta los 180 días. .....	47
Figura IV-1: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,35.....	49
Figura IV-2: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,50.....	49
Figura IV-3: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,65.....	50
Figura IV-4: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,80.....	50
Figura IV-5: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de $SO_4^{-2}$ entre [5% - 6,5%] .....	52
Figura IV-6: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de $SO_4^{-2}$ entre [6,5% - 8%] .....	53
Figura IV-7: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de $SO_4^{-2}$ entre [8% - 9,5%] .....	53
Figura IV-8: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de $SO_4^{-2}$ entre [9,5% - 11%].....	54
Figura IV-9: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de $SO_4^{-2}$ entre [11% - 12.5%] .....	55
Figura IV-10: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de $SO_4^{-2}$ entre [12.5% - 17%].....	55
Figura IV-11: Curvas de nivel de la Figura IV-11.....	57
Figura IV-12: Fotografías de la penetración del agua de curado en las probetas cúbicas de 15 cm. .....	59

# CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN

## I.1 Presentación del tema

En la actualidad, el hormigón es el material más utilizado en la construcción, por lo que el estudio de sus componentes se hace indispensable para mejorar u optimizar su uso. Uno de sus principales elementos constituyentes corresponde a los áridos, los cuales ocupan alrededor del 75% del volumen total del hormigón y conforman un esqueleto resultante del mismo, el cual busca ser el componente más estable en el hormigón, tanto física como químicamente.

En el caso de Chile, se tiene que en la zona norte del país quedan muy pocas fuentes cercanas de aprovisionamiento de áridos aptos normativamente para la fabricación de hormigones, ya que los extraídos de pozos o canteras poseen contenidos considerables de sales, en particular sulfatos, los cuales, en presencia de algunos de los compuestos de la hidratación del cemento, generan reacciones químicas expansivas, las que podrían alterar las propiedades del hormigón, especialmente la durabilidad. Si bien, para poder ser utilizados estos áridos, podrían recibir algún tratamiento, esto implicaría incrementar considerablemente su costo.

En la actualidad existen normativas internacionales que:

- a) limitan el contenido de sulfatos en los áridos.
- b) limitan el contenido de sulfatos con respecto al hormigón.
- c) limitan el contenido de sulfatos en el hormigón referido al contenido de cemento.
- d) no consideran requisitos en relación al contenido de sulfatos en el hormigón.

En particular, en Chile, la norma NCh163 Of.2013 [14] limita el contenido de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) en los áridos (0,30% respecto a su peso seco), obtenido mediante la NCh1444 Of.2010, y la NCh170 Of.2016 [16] limita el contenido de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) en un 2,0% (respecto al cemento) considerando el aporte de todos los materiales constituyentes a excepción del cemento. Si bien, se acepta la posibilidad de que los áridos no cumplan la NCh163 si se cumple lo que establece la NCh170, el alto contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  en gran parte aportado por los áridos, hace poco factible probable cumplir incluso con ésta última. Es más, la NCh170 no da espacio para demostrar empíricamente mediante ensayos de comportamiento que el uso de hormigones con altos contenidos de sulfato, mayores al permitido, independientemente del grado de resistencia del hormigón.

Finalmente, este trabajo busca analizar la normativa vigente respecto a la forma de limitar los sulfatos en el hormigón y proponer una nueva forma de limitar el contenido de sulfatos en el mismo, basado en el comportamiento de hormigones confeccionados con altos contenidos de sulfato respecto al desarrollo de expansiones y resistencias a la compresión durante un período de evaluación determinado.

## **I.2 Objetivo General**

Estudiar el comportamiento de hormigones en presencia del sulfato aportado por sus componentes, principalmente los áridos, a la mezcla.

## **I.3 Objetivos Específicos**

- Estudiar el comportamiento de hormigones con altos contenidos de sulfatos en su matriz interna. En particular, con contenidos de sulfatos por sobre los límites normativos nacionales.
- Analizar la forma en que la normativa especifica los límites de sulfatos para los áridos y/o el hormigón.
- Estudiar posibles ajustes a la limitación normativa actual, específicamente en lo relativo al contenido total de sulfatos, estableciendo criterios de aceptación basados en desempeño del hormigón en términos de expansiones y desarrollo de resistencia a la compresión.

## **I.4 Alcance**

Este estudio se realiza experimentalmente con hormigones confeccionados con un cemento portland puzolánico de origen nacional y áridos del río Maipo, a los que se les agregó yeso natural, para simular una procedencia natural de sulfatos en ellos, por lo cual, los resultados obtenidos podrían no representar, necesariamente, el comportamiento real de hormigones confeccionados con áridos contaminados naturalmente con sulfatos.

Además, el estudio se aboca en la evaluación de hormigones ordinarios, tanto en dosificación como en tratamientos de curado, por lo tanto, los resultados obtenidos podrían no aplicar para hormigones especiales, como por ejemplo para hormigones masivos u hormigones con tratamientos térmicos especiales de curado.

# CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

## II.1 Introducción

Un número significativo de problemas relacionados con el deterioro del hormigón se detectaron en todo el mundo debido al desarrollo de reacciones expansivas internas (IER). Su efecto negativo tiene importantes implicaciones económicas porque son la principal causa de degradación de grandes estructuras de hormigón. Además, el trabajo necesario para remediar el problema implica grandes áreas de reconstrucción, complejas y costosas técnicas, y materiales de rehabilitación. Además, las IER disminuyen la vida útil de la estructura afectada, puede implicar la interrupción de su función y, en última instancia, puede conducir a su desmantelamiento y demolición. (Custódio y Ribeiro, 2015)

El ataque por sulfato es un nombre genérico para un conjunto de complejos y simultáneos procesos químicos y físicos, causados por reacciones de componentes numerosos del cemento, con sulfatos originados por fuentes internas o externas.

Existe cierta confusión en la literatura y en la comunidad técnica con respecto a la definición del ataque por sulfato. Para algunos, el término significa sólo el proceso de la posible expansión causada por la formación de etringita de una fuente externa de sulfato, con el  $C_3A$  presente en el cemento utilizado. Otros no consideran el daño causado por la formación y la recristalización de thenardita ( $NaSO_4$ ) o de mirabelita ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ) para ser ataque del sulfato, y lo llaman ataque físico o cristalización de la sal. En la opinión de algunos autores, el ataque por sulfato es un conjunto de procesos complejos que no pueden ser fácilmente divididos en físicos versus químicos, o calcio versus ataque de magnesio y versus sulfato de sodio. Dependiendo de la naturaleza de los componentes del hormigón, de las condiciones de procesamiento del hormigón, de los macro y microambientes locales, de la forma, concentración y naturaleza de los sulfatos en contacto con el hormigón, más de uno de estos complicados fenómenos químicos y físicos puede ocurrir simultáneamente.

El anión sulfato que reacciona con componentes del cemento para causar daño está presente originalmente en algún material constituyente, en su mayor parte, en forma de sales alcalinas altamente solubles ( $Na_2SO_4$ ,  $K_2SO_4$ ) o de tierras alcalinas ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ,  $MgSO_4$ ) o, menos frecuentemente, se origina de la oxidación de la pirita en el árido, de los fertilizantes o de diversas formas de desechos industriales. Dado que el cemento y el hormigón son compuestos altamente complejos tanto química como microestructuralmente, y los sulfatos ionizados a menudo están asociados con más de uno o incluso varios cationes diferentes, los procesos químicos que conducen al eventual deterioro de las propiedades del hormigón son altamente complejos, interdependientes y superpuestas. Además de las razones químicas anteriores, estas reacciones dependen de la exposición ambiental de la estructura de hormigón en particular, incluyendo el acceso de la humedad, la velocidad de evaporación del agua y los cambios de temperatura.

El deterioro del hormigón por ataque por sulfatos ha sido históricamente evaluado de numerosas maneras, ninguna de las cuales da resultados adecuados - reproducible y preciso - en todas las condiciones. Tales técnicas de evaluación incluyen evaluación visual, grado de desgaste, pérdida

de masa, dureza, resistencia a la compresión o resistencia a la tracción, módulo de elasticidad dinámico e inestabilidad volumétrica, y son usualmente recomendados por códigos y normas.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## **II.2 Procedencia del sulfato**

El ataque por sulfato interno se refiere a situaciones en las que la fuente de sulfato es interna al hormigón. La fuente de sulfato puede ser el cemento, materiales suplementarios tales como ceniza volante o escoria, el árido, las adiciones químicas, o el agua.

La microestructura del árido es de interés particular desde el punto de vista de la durabilidad del hormigón. La calidad superficial, la densidad, la porosidad, la absorción de agua y la reactividad química del árido con la pasta y su solución de poros son de importancia particularmente en el ataque químico interno al hormigón y son de importancia creciente con el aumento de la permeabilidad del hormigón. Más a menudo, el árido utilizado tiene un efecto limitado sobre los ataques químicos al hormigón; es generalmente la calidad de la pasta la que controla la resistencia química del hormigón. Sin embargo, hay casos en los que la calidad de los áridos puede afectar a los procesos químicos de deterioro, como por ejemplo el efecto de la composición del árido sobre el ataque interno por sulfato tipo DEF (expansiones por formación de etringita tardía).

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

La incorporación de sales solubles en los hormigones de cemento, por efecto de la alta contaminación salina en los áridos de la Zona Norte del país, es una situación ampliamente conocida y considerada por los fabricantes de este material en esa zona. Debido al tipo de yacimiento de extracción de áridos, en general del tipo sedimentario aluvial o antiguos fondos marinos, los agregados pétreos obtenidos de ellos presentan variados contenidos de sales solubles, que supera ampliamente los niveles admisibles para la utilización en el hormigón.

El problema básicamente se ha dividido territorialmente, en ciudades en que predominan las sales solubles en base a cloruros, como Antofagasta, Iquique, Arica, Tocopilla, etc., que son ciudades costeras y aquellas en que predomina las contaminaciones por sulfato solubles como María Elena, Calama, Chuquicamata, etc., que son ciudades del interior de la II región.

Debemos recordar que en general esta zona, salvo en la ciudad de Chuquicamata, no existían plantas productoras de áridos que garantizaran una homogeneidad en su calidad. La provisión generalmente la realizaban las empresas contratistas en cada obra o eran suministradas por proveedores artesanales.

Los sulfatos presentes en los áridos disponibles en la zona Norte, son predominantemente los sulfatos de sodio y magnesio, y se encuentra en algunos casos, sulfatos de calcio (yeso) en suelos de Calama y Mejillones, y sulfato de cobre en Chuquicamata. Debemos considerar además que siempre en las sales solubles con contenidos importantes de sulfatos se encuentran presentes cloruros y otras sales solubles no identificadas que pueden ejercer una acción inhibitoria a la reacción química expansiva del sulfato dentro del hormigón.

Se indica en la tabla siguiente algunos valores promedios de contenidos de sales solubles (sulfatos) de los principales yacimientos de obtención de áridos de la II región, Antofagasta.

Los valores entregados corresponden a una recopilación de certificados de control de calidad de áridos efectuados en el laboratorio de investigación y ensayo de materiales de la Universidad Católica del Norte en los últimos 5 años (1985 - 1990).

Los valores representan promedios de las sales solubles expresados como [%] en peso y determinadas según NCh1444/1 Of.80 (Áridos para morteros y hormigones – Determinación de sales – Parte 1: Determinación de cloruros y sulfatos) y se agrupan por ciudades y yacimientos.

**Tabla II-1: Valores de contenidos de sulfato en forma de  $SO_4^{2-}$  en yacimientos de áridos de la II Región.**

Ciudad	Material	Yacimiento	Sulfato Soluble [%]	
			Mín/Máx	Promedio
Antofagasta	Arena	Sector La Chimba (trocadero)	0,63/ -	4,07
		La Negra (entrada Sur de Antofagasta)	0,37/7,23	2,37
		La Portada (tipo marino)	1,22/5,94	3,69
	Ripio	Sector Quebrada La Chimba	0,11/4,30	2,74
		Sector La Negra (quebrada acceso sur de Antofagasta)	0,48/1,97	0,98
		Árido Calizo (fábrica cemento Inacesa)	0,45/3,24	1,41
Calama	Arena	Sector cerro La Chimba	1,48/ -	40,76
		Sector Vegas y Río Loa	5,29/29,40	17,02
	Ripio	Sector Cerro La Cruz	0,69/9,39	4,71
Chuquicamata	Arena	Chuquicamata	9,30/25	13,50
	Ripio	Chuquicamata	1,03/17,22	4,20
Salitreras: María Elena, Pedro de Valdivia y Crucero	Arena	Sector Las Bombas Río Loa (a 20 km de María Elena)	6,20/30,2	24,40
		Sierra Gorda (a más de 100 km, en camino Antofagasta - Chuquicamata)	0,40/8,70	4,71
	Ripio	Quebrada Caracoles (a más de 100 km de María Elena)	0,21/0,39	0,34
		Sector Crucero Río Loa (a 20 km)	5,48/18,06	12,03
Tocopilla	Arena	Sector Michilla Planta Minera	1,50/2,23	1,75
		Sector Cuesta Barriles	19,50/25	23,00
		Playa Gatico (50 km al sur de Tocopilla)	0,76/9,85	7,35
	Ripio	Sector Cuesta Barriles	0,21/0,47	0,34
		Playa Gatico (50 km al sur de Tocopilla)	0,93/1,72	1,26
		Sector Michilla Planta Minera	0,17/2,24	0,50
Mejillones	Arena	Cerro Mejillones	7,10/21	4,60
	Ripio	Cerro Mejillones	2,96/8,78	6,18

(Ríos y Zétola, 1990)

Cabe destacar que, de los porcentajes promedio antes vistos, ningún yacimiento cumple con el límite actual según la NCh 163 de 0,30%. Es más, según el mínimo para cada yacimiento, la gran mayoría (salvo 3 yacimientos) no cumplen con dicho límite normativo.

En Chuquicamata desde los inicios de la explotación del yacimiento en el año 1915 se han ejecutado importantes obras de hormigón en todo tipo de estructuras industriales, civiles y habitacionales, el promedio de ejecución de hormigón en los últimos 6 años (1984 - 1990) alcanzan a un volumen de aproximadamente 50.000 m<sup>3</sup>.

De los antecedentes disponibles en la Universidad Católica del Norte desde el año 1967 a la fecha (1990) y la información entregada por Subgerencia de Ingeniería y Construcción de Codelco Chile División Chuquicamata no ha existido en este período, y no hay antecedentes de períodos anteriores, de algún caso de patología de hormigones en ambientes naturales no agresivos de Chuquicamata, de reacción sulfato con los cementos empleados, es decir “la calidad de los agregados pétreos desde sus orígenes a la fecha con relación a su contenido de sulfatos solubles, ha sido sancionada por la práctica”.

Con relación a esta materia, debe mencionarse, además, los siguientes actores que seguramente han incidido en este resultado, y en la decisión original de aceptación de estos valores de sulfatos.

- El sulfato contaminante corresponde a sulfato de cobre, el cual que de acuerdo a la bibliografía, no presenta reacciones tan activas o intensas como la del sodio o magnesio.
- En general los hormigones empleados en Chuquicamata se confeccionan con altas dosis de cemento, las cuales, si bien corresponde a hormigones de altas resistencias, presentan una capacidad mayor a lo usual.
- El ambiente natural de Chuquicamata presenta baja humedad relativa.

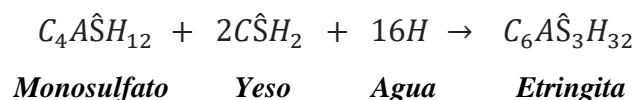
(Ríos y Zétola, 1990)

## II.3 Química del ataque por sulfato

El ataque por sulfato es el término utilizado para describir una serie de reacciones químicas entre los iones sulfato y los componentes del hormigón endurecido, principalmente la pasta de cemento, causada por la exposición del hormigón a los sulfatos y la humedad. Como ocurre con otros productos químicos agresivos, los sulfatos son potencialmente más perjudiciales para el hormigón cuando se presentan en forma gaseosa o líquida, siendo esta última situación la más común; el ataque de químicos sólidos que contienen sulfato es raro.

En primer lugar, queremos hacer hincapié en que la química del ataque de sulfato es independiente de la fuente de sulfato, los procesos se rigen por los mismos principios fisicoquímicos. Las diferencias en las consecuencias de cualquier ataque de sulfato son causadas por las condiciones ambientales y físicas bajo las cuales estas reacciones proceden.

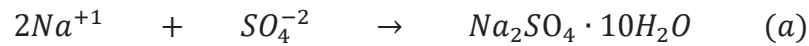
En numerosas fuentes de la literatura, el ataque por sulfato se clasifica en químico versus físico y en interno versus externo. Se considera que el ataque químico por sulfato es el resultado de reacciones químicas que implican al anión sulfato, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. Ejemplo de tal reacción es la formación de etringita a partir de monosulfato y yeso, de acuerdo con la siguiente reacción estequiométrica:



Donde C es CaO, A es Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\hat{S}$  es SO<sub>3</sub> y H es H<sub>2</sub>O. Se sabe que la reacción da como resultado un aumento del volumen sólido del sistema y puede o no conducir a la expansión del hormigón.



El ataque físico por sulfato, a menudo llamado también cristalización de sal de sulfato o agotamiento de hidratación de sal, se refiere generalmente a (a) formación a partir de la solución de sulfato de sodio decahidratado,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , seguido de (b) su recrystalización repetida en anhidrita de sulfato de sodio,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , y viceversa:



(Solución)      (Evaporación)      (Sólido)



*Mirabilita (Recrystalización repetida) Thenardita*

Este proceso dependiente de la temperatura conduce a un aumento repetido del volumen, de este modo, si el proceso ocurre dentro de la matriz de hormigón, conducirá a la fatiga de la pasta de cemento y a su pérdida consiguiente de cohesión. La repetición de la expansión-contracción es el origen del término físico en la descripción de esta forma de ataque de sulfato. El término físico no parece correcto al caracterizar esta reacción, ya que la hidratación y la deshidratación del sulfato de sodio, al igual que la portlandita o etringita o la formación de yeso, son procesos químicos - procesos químicos con consecuencias físicas.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## II.4 Manifestaciones del ataque por sulfato

Algunos de los daños visibles incluyen el desprendimiento, la delaminación, el macrofisurado y, posiblemente, la pérdida de cohesión. Todos estos fenómenos son consecuencias de los procesos químicos invisibles a simple vista, incluyendo fenómenos de adsorción-desorción, disolución-precipitación de fases coloidales y cristalinas, recrystalización, etc. Algunos o todos los siguientes procesos fisicoquímicos complejos pueden estar implicados en un ataque por sulfato típico.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

### II.4.1 Disolución o eliminación de la pasta de cemento del hidróxido de calcio.

La consecuencia de tal disolución o eliminación es la lixiviación de iones de calcio e hidroxilo fuera del sistema, por lo tanto, una posible disminución de la alcalinidad (pH) de la pasta, o sulfonación de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  para formar compuestos potencialmente expansivos tales como etringita o yeso.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

### II.4.2 Cambios continuos en la composición iónica de la fase líquida de los poros.

La composición del líquido cambia continuamente incluso en los procesos normales de hidratación, especialmente en edades tempranas; sin embargo, bajo ataque químico y/o cambios en las condiciones ambientales, estos cambios pueden conducir a la formación de condiciones que permitan el deterioro de la matriz de pasta. Un ejemplo de este cambio es la penetración en la estructura de poro superficial del  $\text{CO}_2$ : la carbonatación conduce a la eliminación de la fase líquida de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$ , disminución del pH e inestabilidad posterior de la etringita en la zona carbonatada.



(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

### **II.4.3 Adsorción o quimisorción de componentes iónicos presentes en la fase líquida de poro sobre la superficie de los sólidos hidratados presentes en el sistema de cementación.**

Específicamente, como ejemplo, los iones sulfato y aluminato pueden ser absorbidos por el C-S-H bajo ciertas condiciones, y luego liberados cuando cambian las condiciones. Este mecanismo es de importancia crucial en la formación de etringita tardía.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

### **II.4.4 Descomposición de componentes de clinker aún no hidratado.**

Hay alguna evidencia que demuestra que la penetración temprana de sulfatos en el sistema puede conducir a la descomposición o, mejor, a la descalcificación de los silicatos de calcio anhidros presentes en el clinker. Las consecuencias de este proceso son el aumento de la porosidad y la formación de compuestos hidratados de sílice o Mg-silicato hidratado que no poseen propiedades cementantes o ambos. En algunas condiciones, la fase de ferrita que generalmente no se considera implicada en las reacciones de ataque por sulfato, puede volverse más reactiva, dando lugar así a la liberación de iones aluminato y ferrita que posteriormente pueden participar en la formación de etringita.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

### **II.4.5 Descomposición de productos de hidratación previamente formados.**

Un ejemplo es la descalcificación de hidróxido de calcio,  $Ca(OH)_2$  e incluso la descomposición de C-S-H, hidrato de silicato de calcio, el principal aglutinante en el sistema cementante. Tal destrucción parcial o incluso completa, en última instancia, conduce a la pérdida de propiedades de cementación (cohesión de pasta, interfase pasta - agregado, resistencia y durabilidad).

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

### **II.4.6 Formación de yeso**

Se cree que su formación se asocia a un aumento limitado del volumen y se convierte en un problema a concentraciones de sulfato por encima de aproximadamente 3.000 ppm. Sin embargo, su formación utiliza las fuentes de calcio disponibles, por lo que la formación de yeso puede tener consecuencias secundarias al promover otros fenómenos relacionados con el sulfato.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

### **II.4.7 Formación de etringita**

Debido a su baja solubilidad, la etringita puede formarse a concentraciones relativamente bajas de sulfato; esta es la razón por la que la expansión activada por etringita es más frecuente que la expansión generada por yeso.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## **II.4.8 Formación de taumasita**

Se cree que la taumasita se forma principalmente a temperaturas inferiores a aproximadamente 5-10 ° C; Sin embargo, hay evidencia de que puede formarse incluso a temperaturas elevadas. El daño causado por la taumasita es posiblemente más perjudicial que el debido a la etringita, ya que se forma a partir de C-S-H.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## **II.4.9 Formación de brucita y silicato de magnesio hidratado.**

En presencia de cationes de  $Mg^{2+}$ , las reacciones de ataque de sulfato son más dañinas que en presencia de cationes de calcio o de sodio, ya que el propio magnesio conduce a procesos deletéreos que complementan los causados por la formación de sulfoaluminatos. Ambas reacciones ocurren simultáneamente y el daño al hormigón se vuelve multifacético. El reemplazo de Ca en C-S-H por Mg conduce a la pérdida de propiedades cementantes. La formación de silicatos de brucita o magnesio es una indicación de ataque severo por sulfato de magnesio.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## **II.5 Tipos de reacciones expansivas**

### **II.5.1 Incremento del volumen sólido**

Esta teoría supone que una expansión de la pasta de cemento puede ser causada por un aumento del volumen de sólidos presentes, incluso si el volumen total de las especies implicadas se reduce. Tal situación es típica en las reacciones de hidratación.

Obviamente, un aumento del volumen sólido no provocará una expansión en una pasta de cemento fresco con suficiente plasticidad que, en cambio, reducirá su volumen externo en línea con la contracción química asociada con la reacción. En una pasta endurecida, en condiciones de una nucleación aleatoria del líquido poroso, los núcleos de la fase sólida recién formada crecerán libremente y no ejercerán presión sobre el entorno, siempre que esté disponible el espacio libre para el crecimiento del cristal. Una presión en las paredes circundantes puede ser ejercida solamente si los cristales se hacen demasiado grandes y/o demasiado numerosos para caber en el espacio. Sin embargo, en pastas de cemento con relaciones de agua/cemento "normales", el espacio de poros disponible es suficientemente grande para permitir una hidratación completa del aglutinante, dejando al mismo tiempo un espacio de poros no suficientemente lleno. Esto explica por qué el proceso de hidratación que tiene lugar en dichas pastas no provoca un aumento del volumen externo.

Una expansión distinta de la pasta sería concebible solamente a relaciones agua-cemento extremadamente bajas, ya que aquí el espacio poroso disponible no sería lo suficientemente grande para acomodar la cantidad total de hidratos formados en una hidratación completa del aglutinante. Sin embargo, en lugar de continuar y causar una expansión, el proceso de hidratación tiende a detenerse en estas condiciones antes de que se obtenga una hidratación completa. Esto se debe a las restricciones mecánicas causadas por la cohesión del material que habría que superar si el proceso de hidratación continuara.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## II.5.2 Expansión en una reacción topoquímica

Las reacciones topoquímicas se definen muy ampliamente como reacciones químicas en las que la fase sólida producida en el proceso se forma en el espacio ocupado originalmente por uno de los materiales sólidos de partida. Las transiciones de fase sólida, tales como la conversión de silicato  $\beta$ -dicálcico en silicato  $\gamma$ -dicálcico, cumplen claramente esta definición.

Según una definición más estricta de las reacciones topoquímicas, el producto de la reacción debe formar un verdadero crecimiento cristalino sobre el reactivo con d-espacios correspondientes, además de formarse en el espacio ocupado por el reactivo. Sin embargo, esta definición tan estricta se está utilizando raramente en la química del cemento.

En la química del cemento, una reacción de hidratación puede denominarse topoquímica incluso si el material de partida se disuelve en primer lugar, siempre y cuando el producto de reacción precipite sólo dentro del espacio que quedó disponible por el proceso de disolución o en su vecindad inmediata. En contraste con una reacción topoquímica, en un proceso denominado comúnmente una reacción a través de la solución, el producto de reacción precipita aleatoriamente de la fase líquida, después de que se disolvieron cantidades suficientes del material de partida y se alcanzó un grado suficientemente alto de sobresaturación. Además, una precipitación de un producto de reacción sólido de la fase líquida sobre la superficie de otra fase sólida no constituye un proceso topoquímico. Las reacciones de hidratación topoquímica son favorecidas si la capacidad del producto de reacción para cristalizar es notablemente mayor que la velocidad de disolución del material anhidro de partida. Bajo tales condiciones, los iones disueltos no tienen tiempo para migrar en la fase líquida, sino que, en su lugar, el producto de reacción precipita inmediatamente en o cerca de la superficie de la fase anhidra. A medida que avanza la reacción, el producto químico tópico formado de esta manera tiende a bloquear parcialmente el acceso a la fase anhidra subyacente, pero, sin embargo, la fase líquida circundante continúa migrando a través de los poros de la capa de hidrato ya formada hacia el material de partida residual. De este modo, se forman cantidades adicionales de la fase de hidrato en la interfase anhidrita-hidrato, usualmente a una velocidad parabólica decreciente, hasta que el material de partida se reemplaza completamente por el producto de reacción.

Debido a su mayor masa y a su menor densidad, el hidrato formado in situ ocupa un volumen sustancialmente mayor que la fase sólida anhidra "padre" y por lo tanto excede necesariamente los límites originales de este último. De este modo, el sólido recién formado puede dar lugar a una expansión local. Si esta expansión se produce en el espacio restringido de un sólido poroso, tal como en una pasta de cemento endurecida, pueden generarse tensiones locales distribuidas aleatoriamente dentro del material endurecido. Estos a su vez pueden provocar un aumento del volumen externo del material, o incluso la formación de grietas. Un ejemplo de hidratación topoquímica es la conversión de periclase  $[\text{MgO}]$  en brucita  $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$  que tiene lugar en la hidratación de cementos con un alto contenido de  $\text{MgO}$ .

Tenga en cuenta que la misma reacción química puede o no proceder de forma tópica, dependiendo de la reactividad del material de partida.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

### II.5.3 Crecimiento de cristal orientado

Puede desarrollarse un crecimiento de cristal anisotrópico orientado si se forma un producto de reacción cristalino en una reacción topoquímica en la interfase entre la fase madre anhidra y el hidrato. Bajo estas condiciones, las cantidades recién formadas de la fase hidratada ejercen presión sobre aquellas ya existentes y formadas anteriormente. Esto puede causar una situación en la cual los cristales del producto de reacción crecen y pueden ejercer presión en una dirección perpendicular a la interfaz sólido-líquido original. Esta forma de crecimiento de cristales está asociada con un aumento de la porosidad y, por lo tanto, con un aumento del volumen externo, o incluso formación de fisuras dentro de la pasta de cemento fijada. La expansión puede ser particularmente significativa si el producto de reacción posee una morfología acicular y crece en su dirección longitudinal. Evidentemente, una expansión de la pasta de cemento se pone en marcha sólo cuando los cristales en expansión entran en contacto con, y ejercen presión unos sobre otros. Una expansión externa puede tener lugar sin una absorción de agua del medio ambiente.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

### II.5.4 Expansión causada por la presión de cristalización

Los cristales formados en una cristalización a partir de una solución de poros sobresaturada en un cuerpo poroso pueden generar presión sobre las paredes de los poros después de alcanzar un tamaño apropiado (Chatterji y Thaulow 1997, Ping y Beaudoin 1992, Scherer 1999 y otros). La presión máxima ejercida por un solo cristal puede expresarse mediante la ecuación (Brown y Taylor 1999; Scherer 1999):

$$p = \frac{RT}{V} \cdot \ln \frac{C}{C_0}$$

Donde:

$p$  = presión [MPa]

$R$  = constante de los gases  $8.3 \text{ [J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}]$

$T$  = temperatura [K]

$V$  = volumen molar [ $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ]

$C$  = concentración del soluto

$C_0$  = solubilidad de equilibrio

De la ecuación es obvio que el grado de sobre-saturación del soluto es el factor más importante que determina la magnitud de la presión ejercida sobre la pared del poro, sin embargo, también están involucrados otros factores (Ping y Beaudoin 1992, Scherer 1999 y otros). La presión que puede ser ejercida por un cristal que crece en un poro depende también del ángulo de contacto entre el cristal y la pared de poro, determinado por la curvatura de la interfaz cristal-líquido. Si el ángulo de contacto es pequeño, la tensión se reducirá, mientras que la presión máxima se mostrará si el cristal no se moja completamente.

La presión de cristalización depende también del tamaño del poro y se hace más pequeña a medida que aumenta el tamaño del poro.

Si el cristal en crecimiento se enfrenta a una restricción incompleta, (tal como por una pared de poro) crece preferentemente en su cara no restringida (es decir, hacia la fase líquida). Por lo tanto, una expansión externa sólo puede tener lugar si el producto sólido se forma y crece en un espacio confinado.

Cuando un cristal acicular crece a través de un poro, se pueden ejercer tensiones en cada uno de sus extremos. Dos factores, sin embargo, pueden interferir: El cristal puede ceder bajo el estrés generado: Si esto sucede, el cristal crecerá lateralmente en el poro, en lugar de cruzar su sección transversal. Alternativamente, el cristal puede abrocharse bajo la carga generada por su propio crecimiento.

En condiciones reales, una expansión y un deterioro notable de una pasta de cemento no pueden generarse por la cristalización de un solo cristal en un solo poro, porque la tensión generada, aunque sea grande, actúa sobre un volumen demasiado pequeño. Para producir la expansión y finalmente el agrietamiento, el crecimiento del cristal debe tener lugar en un volumen suficientemente grande del espacio poroso, de manera que también se incluyen las fallas más grandes presentes en la pasta que finalmente determinan la cohesión del material.

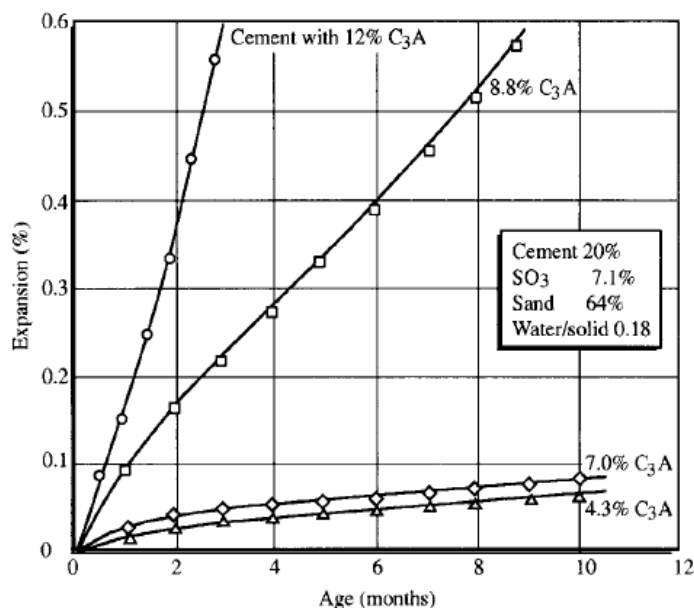
(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## **II.6 Consecuencias**

### **II.6.1 Apariencia externa y estabilidad volumétrica del hormigón**

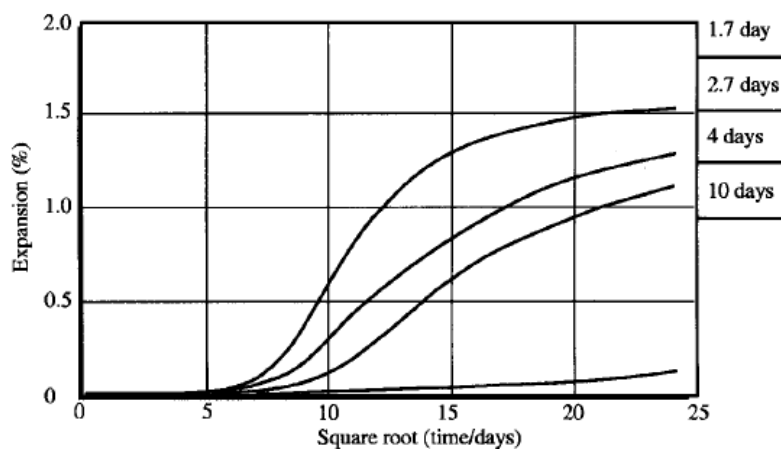
Puede producirse una expansión perjudicial en el hormigón cuando está presente en el cemento cantidades excesivas de yeso o anhídrita, en cantidades muy por encima de los niveles normales. El exceso de sulfato en el hormigón también puede provenir de agregados contaminados (Figg 1999, St John et al., 1958). Como señaló Harboe (1982), los límites admisibles para el contenido de sulfato agregado pueden variar de una fuente a otra, y se recomiendan ensayos de laboratorio para evaluar el rendimiento de agregados potencialmente reactivos. Las curvas típicas de dilatación para muestras de laboratorio sometidas a un ataque de sulfato interno se muestran en la Figura II-1 (Ouyang et al., 1988). Estos resultados se obtuvieron ensayando una serie de prismas de mortero de acuerdo con las prescripciones de ASTM C452. Debe destacarse que, en este caso, la expansión se produjo a partir del exceso de yeso inicialmente añadido a las diversas mezclas durante su producción. A este respecto, las curvas que aparecen en la Figura II-1 son ejemplos de lo que se ha denominado el ataque interno por sulfato inducido por la composición interna. Como se puede ver en la Figura II-1, la expansión se desarrolla muy rápidamente. Además, la velocidad de expansión se vuelve lineal después de sólo unos pocos días de prueba. Ouyang et al. (1988) informaron que se pudo observar una fisuración significativa y una pérdida de resistencia cuando las muestras habían experimentado una expansión aproximadamente del 0,3%.

En la literatura, se han propuesto otros límites de expansión para muestras de hormigón sometidas a ataque interno de sulfato inducido por la composición. Por ejemplo, Samarai (1976) recomendó una expansión del 0,1% como un margen seguro para determinar el porcentaje máximo de sulfato que se puede añadir a una mezcla dada sin causar ninguna degradación significativa. Crammond (1984) utilizó una expansión del 0,1% después de seis meses como límite por encima del cual el hinchamiento se vuelve significativamente perjudicial. Como señaló Ouyang et al. (1988), este límite también es sugerido por ASTM C227 como un criterio de aceptación para la reactividad de álcali-agregado.



**Figura II-1: Expansiones en prismas de mortero, a partir de yeso añadido a la mezcla. (Fuente: Skalny, Marchand y Odler, 2003)**

Según St John et al. (1958), las observaciones de campo del ataque de sulfato interno inducido por la composición indica que la degradación puede ser, en muchos casos, espectacular. La expansión ocurre generalmente dentro de semanas o meses debido a la relativamente alta reactividad del yeso. La eflorescencia, el decapado, el desprendimiento y el agrietamiento son generalizados y requieren la remoción del hormigón contaminado. En la Figura II-2 se presenta una curva de dilatación típica para una muestra de mortero sometido a un ataque interno de sulfato (o DEF) inducido por calor. Como se puede ver, la cinética de expansión puede ser muy diferente de lo que se observa normalmente para el ataque interno de sulfato interno inducido por la composición (ver Figura II-1). La expansión de las muestras curadas por calor tiende a comenzar después de un período inicial de "incubación" durante el cual se observa muy poco hinchamiento, si es que existe alguno. Además, las curvas de expansión son generalmente no lineales. Como puede verse en la Figura II-2, las curvas de dilatación se caracterizan por su forma en S.



**Figura II-2: Expansiones en prismas de mortero sometidos a DEF. Fuente: Skalny, Marchand y Odler, 2003**

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## II.6.2 Microestructura del hormigón

Los diversos tipos de degradación por sulfato a menudo resultan en formas similares de fatiga, tales como el desarrollo de huecos alrededor de algunas partículas de árido y el inicio de microfisuración. Sin embargo, las observaciones microscópicas sistemáticas de muestras de hormigón que sufren de ataque por sulfato inducido por la composición, DEF y degradación externa de sulfato indican que la evolución del daño microestructural puede variar de un tipo de degradación a otro. Los informes sobre la degradación del hormigón por ataque de sulfato interno inducido por la composición y por la temperatura (DEF) tienden a indicar que la degradación suele ser bastante homogénea en todo el volumen de hormigón (Johansen et al., 1993, St John Et al, 1958). Este es, por ejemplo, el caso de muestras de laboratorio expuestas a condiciones bien controladas. Como se mencionó anteriormente, se ha informado que el agrietamiento de estructuras de hormigón en terreno afectadas por DEF han evolucionado desde las superficies externas hasta el núcleo del elemento. Sin embargo, las observaciones sistemáticas de muestras degradadas generalmente indican la formación de etringita perjudicial en todo el volumen de hormigón. Además, las grietas a menudo tienden a propagarse relativamente rápido desde la superficie externa a través del núcleo del elemento.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## II.6.3 Propiedades mecánicas del hormigón

Las investigaciones sobre las consecuencias del ataque interno por sulfato inducido por la composición, indican claramente que esta forma de degradación no sólo da lugar a la formación de una red de grietas microscópicas y macroscópicas sino que también contribuye a reducir significativamente las propiedades mecánicas del hormigón.

El efecto del ataque por sulfato inducido por la composición sobre la estabilidad volumétrica y la resistencia a la compresión de una serie de morteros se presenta en la Figura II-3. Estos resultados informados por Ouyang et al. (1988) fueron obtenidos para mezclas a las que se añadió yeso en exceso.

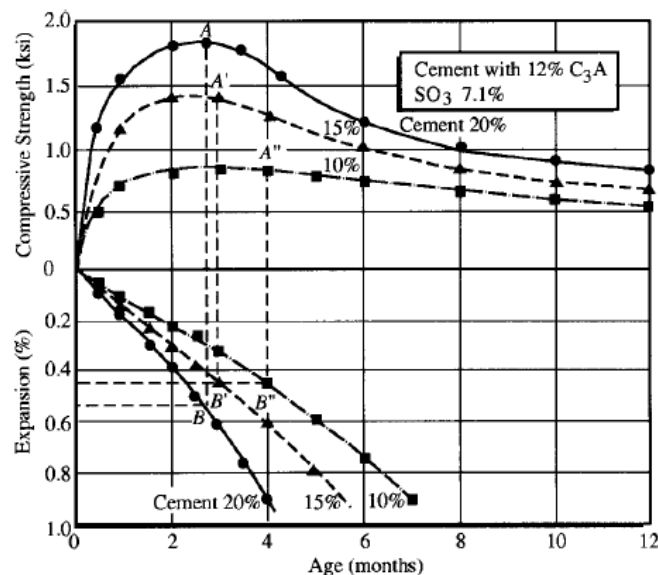


Figura II-3: Resistencia y expansiones de morteros bajo ataque por sulfato inducido por exceso de yeso.



Como puede verse, las tres curvas de resistencia a la compresión muestran exactamente el mismo comportamiento. A pesar del hecho de que todos los morteros se expandieron desde el comienzo de las pruebas, la resistencia a la compresión de todas las muestras aumentaron inicialmente. Esta ganancia inicial se debe probablemente a la hidratación continua y, finalmente, al efecto de relleno de los poros de etringita y formación de yeso. Después de unos cuantos meses de curado, los valores de resistencia a la compresión se encontraron en el peak y luego disminuyeron. Se observaron reducciones significativas para las mezclas preparadas con un contenido de cemento de 20% y 15% respectivamente.

Los autores encontraron que el contenido de cemento de la mezcla influyó en la expansión admisible más allá de la cual la resistencia a la compresión del mortero fue perjudicada. Propusieron la siguiente relación para predecir el valor de esta expansión crítica (llamada E y expresada en mm / mm):

$$E = 0,0026 + 0,01C$$

Donde:

*C* = contenido de cemento (expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla).

Los resultados reportados por Ouyang et al. (1988) están en buen acuerdo con las observaciones de hormigón en terreno afectadas por el ataque interno de sulfato inducido por la composición (Harboe 1982, St John et al., 1958). Como se mencionó anteriormente, la degradación se encuentra usualmente como resultado de agrietamiento severo y reducción significativa de la resistencia.

(Skalny, Marchand y Odler, 2003)

## II.7 Efecto de la puzolana en la resistencia al ataque por sulfato

Los materiales puzolánicos mejoran la microestructura del hormigón debido a su tamaño de partícula, y pueden alterar la composición química y las reacciones de hidratación. La puzolana contiene sílice que reacciona con el hidróxido de calcio en el hormigón para formar compuestos de silicatos de calcio hidratados extras, y así disminuir el hidróxido de calcio, reforzando al hormigón debido al aumento del compuesto C-S-H y haciéndolo más fuerte, denso y duradero durante su vida útil (Merida and Kharchi, 2015). Siguiendo la misma lógica, al transformar el CH en CSH, la puzolana necesita agua, por lo tanto, disminuye la cantidad de agua de los poros, haciendo a la vez que estos disminuyan su tamaño. Además, la formación de CSH fortalece la zona más débil del hormigón, la que corresponde a la zona de transición pasta de cemento – árido.

La puzolana reduce no sólo la permeabilidad, sino también la cantidad de C<sub>3</sub>A si son una sustitución parcial de cemento. Además, el uso de puzolanas o el uso de cementos con adición, en general, reduce la cantidad de CH debido a las reacciones puzolánicas que de otro modo reaccionarían con sulfatos para formar yeso.

(Sahmaran, Kasap, Duru y Yaman, 2007).

Parece que la alcalinidad del medio en el que se forma etringita juega un papel importante en determinar si la formación de etringita se asociará o no con la expansión.

Varios investigadores han señalado que la expansión asociada con la formación de etringita ocurre sólo cuando la etringita se forma en un ambiente saturado con hidróxido de calcio. En soluciones de alto pH, la formación de etringita por reacciones en estado sólido es una de las explicaciones de

este fenómeno. (Otra explicación en la literatura reciente es la formación de cristales submicroscópicos de etringita con carga negativa superficial en soluciones de pH alto y posterior hinchamiento de la etringita coloidal por absorción de agua). Para demostrar que es posible inhibir la expansión causada por etringita al disminuir la alcalinidad de la pasta de cemento hidratada, el autor agregó agregados puzolánicos a morteros de cemento portland hechos con arena de granito erosionado. La Figura II-4 muestra el efecto de sustituir hasta el 50% del cemento por una puzolana natural de S. AntSo, República de Cabo Verde, sobre la expansión de prismas de mortero de 40x40x160 mm inmersos en agua de mar. El mortero se dosificó en 1 parte de cemento más puzolana y 5 partes en peso de arena de granito erosionado molida; el granito se tamizó entre 0,8 y 0,4 mm. Los prismas se curaron húmedamente en una cámara húmeda durante 48 horas antes de la inmersión en agua de mar.

La letra "F" en la figura denota la aparición de grietas. La Figura II-5 muestra una prueba similar con mortero que contiene tierra de diatomeas calcinada (de Obidos, Portugal). El mortero estaba compuesto de 1 parte de cemento y 5 partes de granito erosionado molida; los procedimientos y dimensiones de las muestras de ensayo fueron las mismas que en el ensayo mostrado en la Figura II-4. El mortero que no contiene puzolana se agrietó en 6 meses, mientras que el mortero que contenía 20% de puzolana natural no se agrietó hasta 1½ años después de la inmersión en agua de mar. Tanto para puzolana natural como para tierra de diatomeas calcinada, con un contenido de puzolana del 30 al 50% no hubo desintegración después de 12 a 15 años de prueba. Los bajos niveles de expansión de los morteros que contienen 40 y 50% de puzolana son indicativos de una protección total contra el ataque de sulfato.

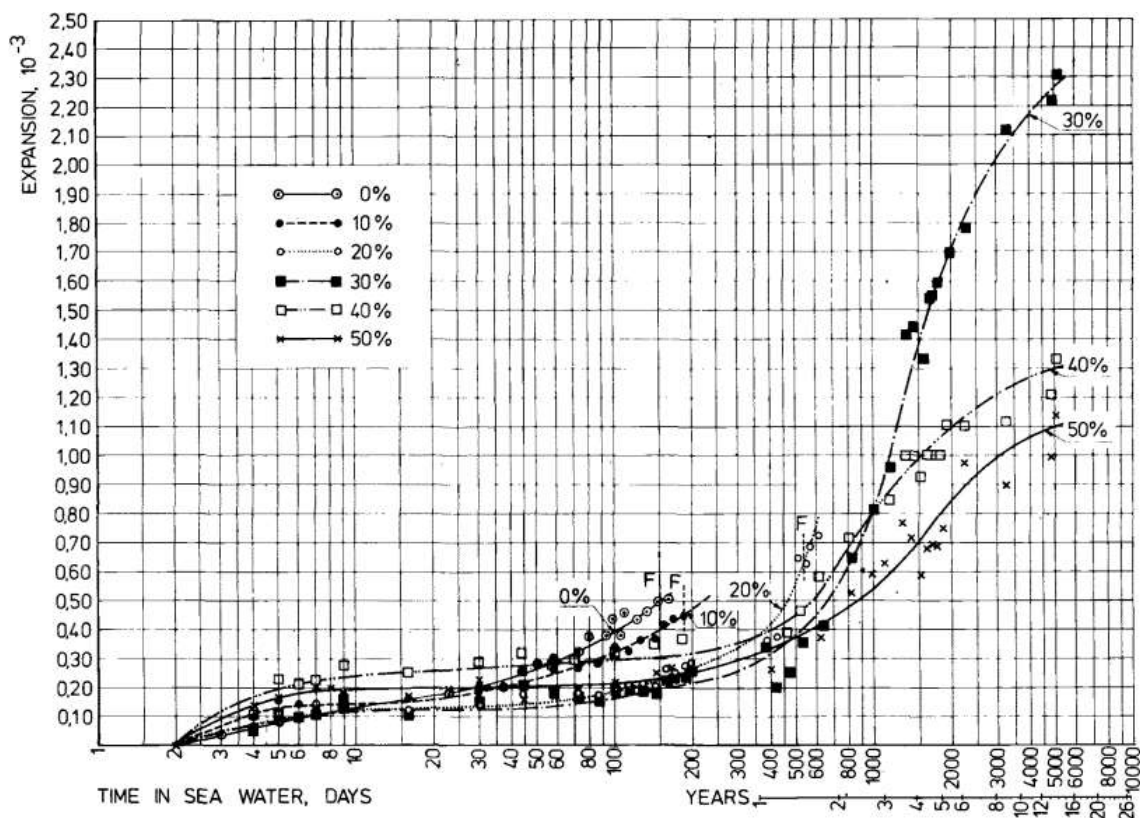
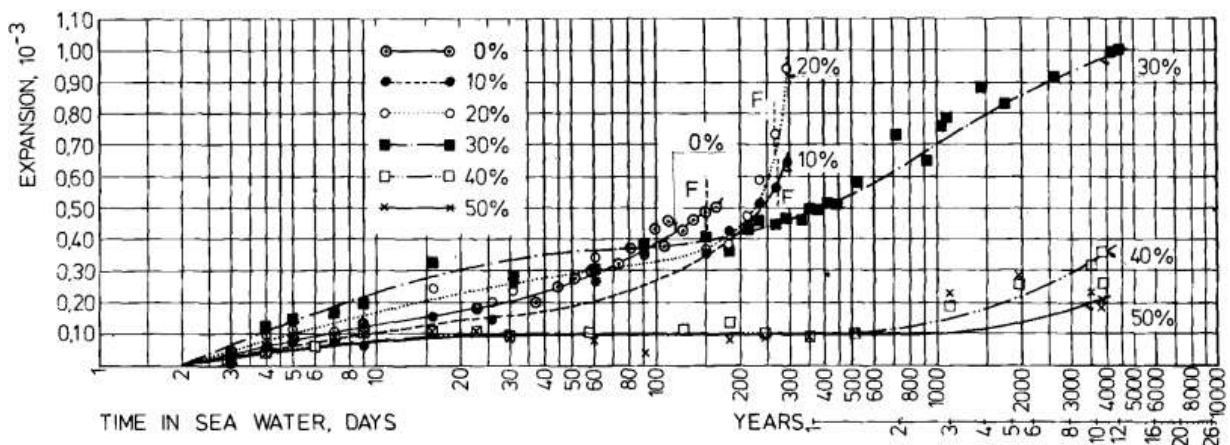


Figura II-4: Influencia del reemplazo de cemento (desde 0 a 50%) por puzolana natural, en expansiones y fisurado de prismas de mortero sumergidos en agua de mar.



**Figura II-5: Influencia del reemplazo de cemento (desde 0 a 50%) por diatomeas calcinadas, en expansiones y fisurado de probetas de mortero sumergidas en agua de mar.**

(de Sousa Coutinho, 1979)

## II.8 Límite permisible para la expansión longitudinal

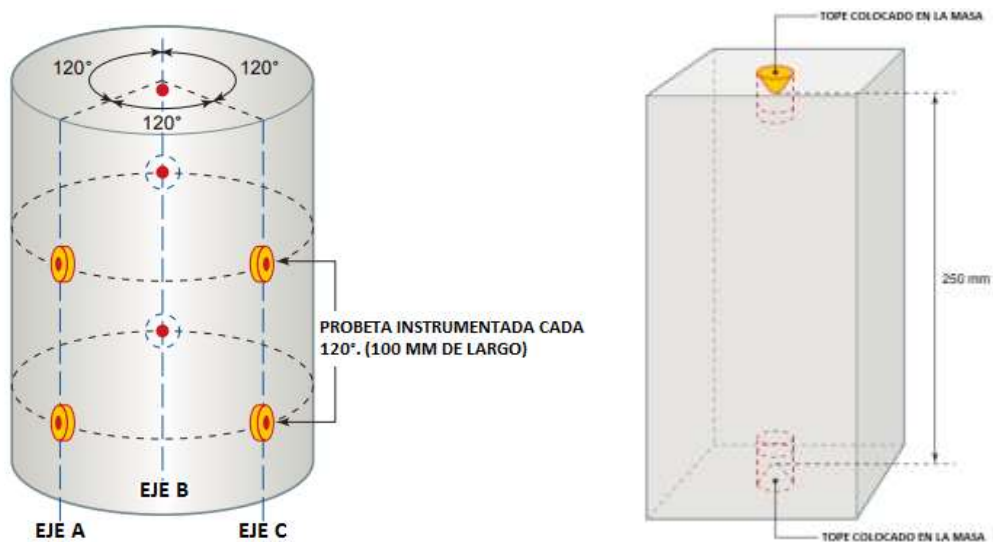
En la literatura existen algunos límites que restringen la expansión máxima que podría tener una probeta para no ver alteradas las propiedades del hormigón, en particular para este estudio el límite utilizado para la expansión longitudinal será 0,04%.

Éste proviene de un ensayo para determinar si un hormigón es susceptible a DEF, el que fue calibrado a partir de observaciones de estructuras en terreno.

La French Technical Association of the Hydraulic Binder Industry (ATILH), el Concrete Industry Study and Research Centre (CERIB) y el Laboratoire Central des Pont Chaussées (LCPC), desarrollaron el LPC Test Method n°66: Reactivity of a concrete mix design with respect to the delayed ettringite formation – Performance testing.

Este ensayo fue validado usando hormigones cuyos comportamientos in situ eran conocidos, y dentro de los cuales se había presenciado la aparición del fenómeno por formación de etringita tardía. La reproducibilidad del ensayo también fue evaluada, obteniéndose el mismo resultado para probetas hermanas acerca de la no reactividad o potencial reactividad de los hormigones evaluados en diferentes laboratorios. Debido a lo anterior, podemos decir que este es un método bastante confiable para determinar si un hormigón es susceptible a DEF.

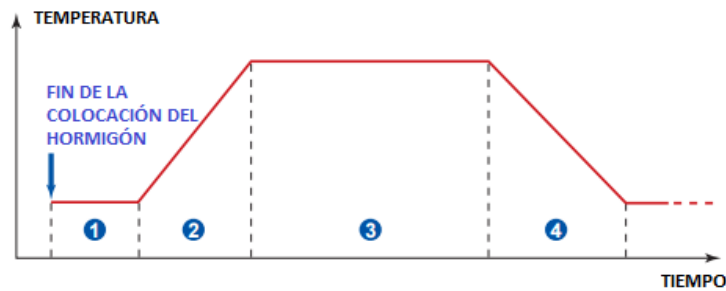
El ensayo utiliza probetas de hormigón que pueden ser confeccionadas en el laboratorio en moldes prismáticos de 70 x 70 x 282 mm o en cilindros de 110 mm de diámetro y 220 mm de largo (Figura II-6). Para cada dosificación se confeccionan 3 probetas de las mismas características.



**Figura II-6: Probeta cilíndrica y prismática para el LPC test method n° 66.**

Posterior a la confección del hormigón, se intenta simular el curado que se tendría en terreno en una cámara con control de temperatura que mantiene a las probetas en una condición de humedad cercana a la saturación. Para conocer las temperaturas que se obtendrían en terreno se recomienda realizar un cálculo numérico, o también se puede hormigonar un elemento con las dimensiones necesarias para simular la condición de masivo, y tomar las temperaturas que se desarrollan con el uso de termocuplas.

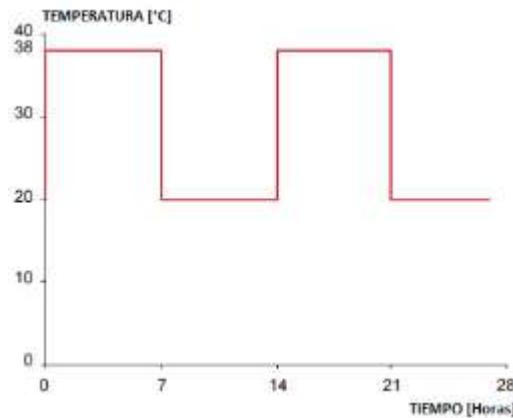
Luego las probetas se someten a ciclos de humedad y secado, como se muestra a continuación:



**Figura II-7: Etapas del curado de las probetas en el LPC test method n° 66.**

- 7 días de secado a 38°C y una humedad relativa menor al 30%.
- 7 días bajo agua a 20°C.
- 7 días de secado a 38°C y una humedad relativa menor al 30%.
- 7 días bajo agua a 20°C.

Finalmente, las probetas son colocadas en agua, y se controlan los cambios de longitud.



**Figura II-8: Ciclo de humedecimiento y secado de las probetas en el LPC test method n° 66.**

La dosificación y el curado son considerados adecuados (el hormigón no es susceptible a DEF) cuando uno de los 2 criterios siguientes se cumple:

➤ Criterio 1

- El promedio de la deformación longitudinal de 3 probetas es menor que 0,04% y no existen valores individuales que excedan los 0,06% al final de 12 meses de seguimiento.
- La variación mensual en promedio de la deformación longitudinal para 3 probetas es menor a 0,004% a partir del tercer mes.

➤ Criterio 2

- Si las probetas tienen una expansión longitudinal entre 0,04% y 0,07% a los doce meses, el periodo de medición debe ser extendido hasta los 15 meses.
- La variación mensual en promedio de la deformación longitudinal para 3 probetas a partir de los 12 meses es menor que 0,004% y la variación acumulada entre el doceavo mes y el quinceavo mes permanece bajo el 0,006%.

Para confirmar la causa de la expansión, este método recomienda realizar una microscopia de barrido electrónico siempre y cuando expansiones significativas del hormigón hayan sido detectadas.

En resumen, se utilizará el límite de 0,04% de expansión, ya que éste se ha asociado al fenómeno DEF, que también genera deterioro en las propiedades del hormigón, y fue calibrado según lo obtenido en pruebas de laboratorio como en lo visto en terreno. No se utilizarán las variaciones mensuales del método, ya que según lo visto en el punto II.6.2, la forma en que se desarrollan las expansiones son distintas para un ataque interno por sulfato, proveniente de un árido contaminado que uno generado por DEF. Además, se debe destacar que existen otras normas internacionales que utilizan el mismo límite, dentro de ellas se encuentran tanto la norma ASTM C1293 y la canadiense CSA A23.2 – 14A, ambas para estudiar la reacción álcali – sílice.

## II.9 Normativa Internacional

Tabla II-2: Límites máximos admisibles de  $\text{SO}_4^{-2}$  dados por estándares internacionales.

Norma	[%] de $\text{SO}_4^{-2}$ Admisible, según peso del árido	[%] de $\text{SO}_4^{-2}$ Admisible, según peso del cemento
<b>British Standard Institution, BS 5328</b>	0,48 (Árido fino + grueso)	4,8
<b>Deutsche Norman, DIN 4226-1</b>	1,2 (Árido fino + grueso)	Sin Limitación
<b>Indian Standard, IS 383 (parte 1)</b>	0,6 (Árido fino + grueso)	Sin Limitación
<b>Iraqi Standard, IQS 45</b>	0,6 (Árido fino, HF)	4,8 (HF)
	0,12 (Árido grueso, HF)	
	0,9 (Árido fino, HE)	5,4 (HE)
	0,12 (Árido grueso, HE)	
<b>ASTM C33*</b>	Sin Limitación	Sin Limitación
HF: Hormigón Fresco HE: Hormigón Endurecido (*): El porcentaje de $\text{SO}_4^{-2}$ solo es limitado en el Cemento Portland		

(Kheder y Assi, 2009)

# CAPÍTULO III: ESTUDIO EXPERIMENTAL

## III.1 Introducción

La investigación pretende estudiar el comportamiento de hormigones de diferentes grados de resistencia frente a un ataque interno por sulfato, específicamente, sulfato proveniente de áridos contaminados. Con el fin de demostrar empíricamente, a través de mediciones de expansiones y resistencia a la compresión que dichos áridos pueden ser utilizados en hormigones cuya resistencia sea suficiente como para no ver alteradas sus propiedades.

Para esto, se preparan 16 hormigones de prueba distintos, provenientes de una matriz de 4x4, cuatro porcentajes de  $\text{SO}_4^{-2}$  respecto al peso de los áridos (0,30; 0,72; 1,08 y 1,44%) y cuatro relaciones de agua/cemento (0,35; 0,50; 0,65 y 0,80), que generan hormigones de diferentes resistencias, tratando de abarcar un espectro amplio de ellas.

Respecto al árido contaminado utilizado, éste se fabrica añadiendo yeso natural hasta lograr el porcentaje requerido, considerando el aporte del sulfato contenido en los áridos y principalmente el aportado por el yeso.

De cada uno de los hormigones de prueba se obtienen 3 viguetas para medir expansiones y cubos de 15x15 cm para ensayos de resistencia a la compresión, las edades para ambos ensayos son de 7, 14, 28, 56, 90, 120, 150 y 180 días. Respecto al curado de las probetas, éstas se mantienen siempre bajo agua.

Además, cabe destacar que existen factores en el estudio que favorecen las reacciones expansivas, como lo son: el tamaño de las probetas que se utilizan, la presencia constante de agua al igual que el acceso libre que ella tiene alrededor de las probetas y la ausencia de las restricciones geométricas que impidan las expansiones, todas condiciones distintas a las que existen en terreno.

## III.2 Desarrollo del trabajo experimental

### III.2.1 Caracterización de los Materiales

A continuación, se mencionan y caracterizan los materiales empleados durante el estudio experimental a realizar.

#### III.2.1.1 Cemento

El cemento empleado en la confección de los hormigones, corresponde a un Melón Extra, el cual se clasifica como cemento clase portland puzolánico, grado alta resistencia, según la NCh148 (NCh148 Of.68 Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales, 1968).

En la siguiente tabla se muestran las propiedades físicas y químicas, relevantes para el estudio, de este material según NCh154 (NCh154 Of.69 Cemento – Determinación del peso específico relativo, 1969) y NCh147 (NCh147 Of.69 Cemento – Análisis Químico, 1969).

**Tabla III-1: Propiedades físicas y químicas del cemento puzolánico.**

Propiedad	Cemento 1	Cemento 2
Peso Específico [g/ml]	3,00	3,00
Contenido de SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]	3,91	3,92

Además, se tiene la siguiente tabla, donde se muestran resultados de ensayos físico-mecánicos y químicos para un cemento Melón Extra según la NCh 148.

**Tabla III-2: Ensayos físico-mecánicos y químicos para un cemento Melón Extra.**

Ensayo	Unidad	Valor	Requisito según NCh 148	
Superficie específica	cm <sup>2</sup> /g	5.100	No aplica	
Tiempo de Fraguado - Inicial	h:min	1:30	≥ 00:45	h:min
Tiempo de Fraguado - Final	h:min	2:20	≤ 10:00	h:min
Expansión en autoclave	%	0,02	≤ 1,00	%
Resistencia mecánica - Flexión a 7 días	kgf/cm <sup>2</sup>	69	≥ 45	kgf/cm <sup>2</sup>
Resistencia mecánica - Flexión a 28 días	kgf/cm <sup>2</sup>	83	≥ 55	kgf/cm <sup>2</sup>
Resistencia mecánica - Compresión a 7 días	kgf/cm <sup>2</sup>	446	≥ 250	kgf/cm <sup>2</sup>
Resistencia mecánica - Compresión a 28 días	kgf/cm <sup>2</sup>	546	≥ 350	kgf/cm <sup>2</sup>
Pérdida por calcinación	%	1,8	≤ 4,0	%
Residuo insoluble	%	11,9	≤ 30,0	%

Cabe destacar que, los hormigones de prueba con el contenido de 0,30% de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> se confeccionan con el cemento 2, a diferencia del resto, confeccionados con el cemento 1, tal como lo muestra la siguiente tabla,

**Tabla III-3: Distribución de los cementos en los hormigones confeccionados.**

Cemento utilizado en cada hormigón de prueba				
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]	A/C			
	0,35	0,50	0,65	0,80
0,30	C2	C2	C2	C2
0,72	C1	C1	C1	C1
1,08	C1	C1	C1	C1
1,44	C1	C1	C1	C1

### III.2.1.2 Yeso

El yeso a emplear proviene del yacimiento explotado por Melón ubicado en La Calera. Este material se sometió a la molienda, hasta llegar al nivel de finura que permitiese que éste pase por el tamiz #35 (0,5mm). El contenido de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en el yeso se obtiene de acuerdo con la NCh145 Of.99 (NCh145 Of.99 Yeso – Métodos de análisis químico, 1999).

**Tabla III-4: Contenido de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> de los yesos utilizados.**

Propiedad	Yeso 1, Y1	Yeso 2, Y2
Contenido de SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]	47,80	46,02



Al igual que con el cemento, se utilizaron dos yesos. En la siguiente tabla se puede ver la distribución en el uso de los yesos.

**Tabla III-5: Distribución de los yesos en los hormigones confeccionados.**

Yeso utilizado en cada hormigón de prueba				
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]	A/C			
	0,35	0,50	0,65	0,80
0,30	Y2	Y2	Y2	Y2
0,72	Y1	Y1	Y1	Y1
1,08	Y1	Y1	Y2	Y2
1,44	Y2	Y2	Y2	Y2

### III.2.1.3 Áridos

Se emplearon una gravilla y una arena gruesa para preparar los hormigones. Las que se someten a diversos ensayos para caracterizarlos, entre los que se encuentran: granulometría, densidades real y neta, absorción de agua, densidad aparente y propiedades químicas (contenido de cloruros y sulfatos).

Para la confección de los hormigones se utiliza un árido combinado que se forma a partir de un 40% de gravilla y un 60% de arena. Las propiedades físicas y propiedades químicas de la gravilla y de la arena son detalladas en la Tabla III-7 y Tabla III-8, respectivamente. Las granulometrías y curvas granulométricas para la gravilla, arena y árido combinado se muestran en la Tabla III-6 y Figura III-1.

**Tabla III-6: Granulometría de los áridos.**

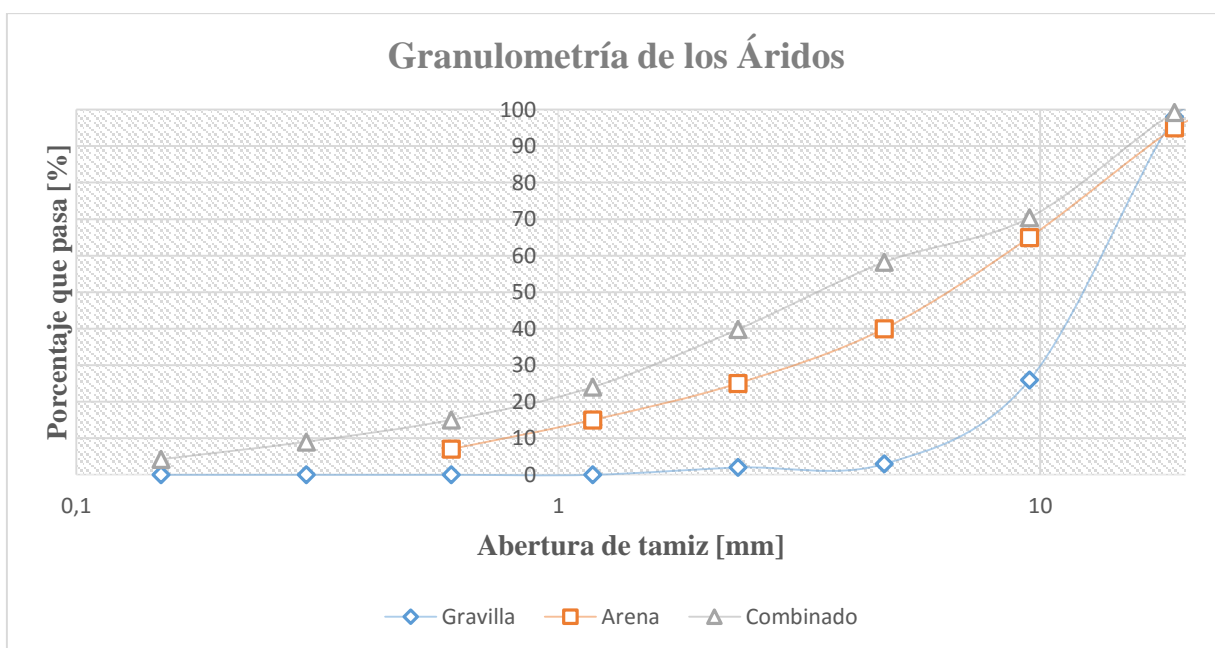
Tamiz ASTM	Tamiz [mm]	Porcentaje Que Pasa [%]		
		Gravilla	Arena	Árido Combinado
2"	50	-	-	-
1 1/2"	37,5	-	-	-
1"	25	100	-	100
3/4"	19	98	-	99,2
3/8"	9,5	26	100	70,4
4	4,75	3	95	58,2
8	2,36	2	65	39,8
16	1,18	-	40	24
30	0,60	-	25	15
50	0,30	-	15	9
100	0,15	-	7	4,2

**Tabla III-7: Propiedades físicas de los áridos.**

Propiedad	Gravilla	Arena
Tamaño máximo nominal [mm]	19	4,75
Módulo de Finura	6,71	3,40
Procedencia de los Áridos	Río Maipo	Río Maipo
Densidad Real Seca [kg/m <sup>3</sup> ]	2700	2648
Densidad Real SSS [kg/m <sup>3</sup> ]	2725	2687
Densidad Neta [kg/m <sup>3</sup> ]	2770	2755
Absorción [%]	0,9	1,47

**Tabla III-8: Propiedades químicas de los áridos.**

Propiedad	Gravilla	Arena
Cloruros, Cl <sup>-</sup> [%]	0,0018	0,0070
Sulfatos, SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]	0,0001	0,0086
Carbón y Lignito [% en masa]	< 0,1	< 0,1



**Figura III-1: Granulometría de los áridos.**

### III.2.1.4 Agua de amasado

El agua a utilizar en la confección de los hormigones es agua potable a la temperatura controlada de laboratorio ( $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ). La caracterización se realiza según NCh1444 (NCh1444 Of. 2010 Áridos para mortero y hormigón – Determinación de cloruros y sulfatos).

**Tabla III-9: Contenido de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en el agua.**

Propiedad	Agua
Contenido de SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]	0,0265

### III.2.1.5 Aditivo

El aditivo usado en los hormigones es un hiperplastificante denominado MasterGlenium 1305 del proveedor BASF, con el objetivo de lograr el cono deseado ( $10\pm 3\text{cm}$ ), de manera que permitiese una trabajabilidad adecuada para llenar los moldes. La caracterización se realiza según NCh 2281/6 (NCh 2281/6 – 2010 Aditivos para hormigón – Método de ensayo - Parte 6: Determinación del contenido de sulfatos).

**Tabla III-10: Contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el aditivo.**

Propiedad	Aditivo
Contenido de $\text{SO}_4^{2-}$ [%]	19,73

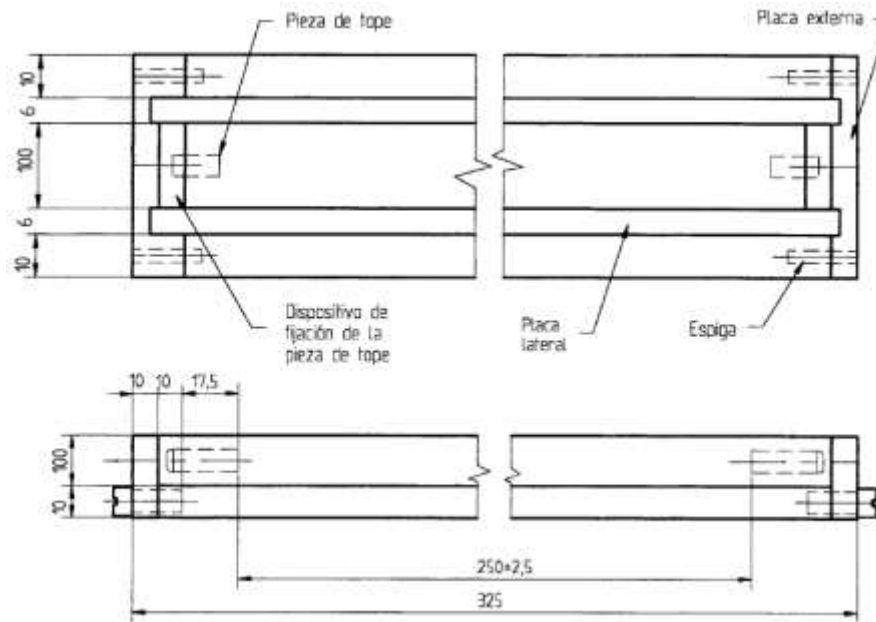
El porcentaje utilizado en cada hormigón de prueba confeccionado se puede apreciar en la siguiente tabla:

**Tabla III-11: Porcentaje de aditivo utilizado en los hormigones.**

Aditivo utilizado [% del peso de cemento]				
$\text{SO}_4^{2-}$ [%]	A/C			
	0,35	0,50	0,65	0,80
0,30	0,40	0,30	0,34	0,34
0,72	0,50	0,35	0,35	0,40
1,08	0,40	0,35	0,30	0,40
1,44	0,40	0,30	0,32	0,35

### III.2.2 Moldes

Los moldes corresponden a los indicados en la NCh2221 (NCh2221 Of.94 Hormigón y Mortero - Método de ensayo – Determinación de los cambios de longitud) para hormigón con árido de  $D_n \leq 50$  mm, proporcionando probetas prismáticas de  $100 \times 100 \times 285$  mm. Estas probetas están dotadas de topes de acero inoxidable en sus extremos, los cuales permiten posicionarlas dentro del aparato medidor de longitud. Los topes se construyen a partir de una barra de hilo de 6 mm de diámetro, tienen una longitud total de 25 mm, de los cuales 20 mm van dentro de la probeta y 5 mm quedan en el exterior de esta.



**Figura III-2: Vista en planta del diseño del molde.**



**Figura III-3: Vista lateral del molde de la viga de hormigón.**



**Figura III-4: Vista superior del molde de la viga de hormigón.**

Antes de llenar el molde con hormigón, se cubre la parte interior con líquido desmoldante, y se procede a insertar los topes en los orificios hilados del dispositivo de fijación para esto. Luego se mide la distancia libre ( $d_i$ ) para cada probeta que corresponde a la longitud entre el interior de ambos topes.

### III.2.3 Dosificación del hormigón

La dosificación se elaboró con el fin de obtener cuatro resistencias diferentes, para esto se fijó en  $180 \text{ l/m}^3$  la dosis de agua y las resistencias están dadas por las relaciones A/C de 0,35; 0,50; 0,65 y 0,80.

**Tabla III-12: Dosificación de los hormigones de prueba.**

Dosificación [ $\text{kg/m}^3$ ], según relación A/C				
Componente	0,35	0,50	0,65	0,80
Cemento	514	360	277	225
Gravilla	701	757	787	805
Arena	1052	1135	1180	1208
Agua	180	180	180	180

En relación al yeso utilizado, las cantidades corresponden a las necesarias para generar cuatro porcentajes de  $\text{SO}_4^{-2}$  respecto al peso de los áridos, estos corresponden a 0,30; 0,72; 1,08 y 1,44 [%]. Cabe destacar que se comienza con 0,30%, ya que este límite corresponde al de la NCh163 Of.2013 y se aumentan gradualmente hasta lograr el porcentaje más alto posible optimizando la cantidad de yeso disponible.

**Tabla III-13: Dosificación del yeso para cada hormigón de prueba.**

Dosificación del yeso [ $\text{kg/m}^3$ ]				
$\text{SO}_4^{-2}$ [%]	A/C			
	0,35	0,50	0,65	0,80
0,30	11,23	12,12	12,60	12,90
0,72	26,21	28,29	29,41	30,11
1,08	39,41	42,54	45,92	47,02
1,44	54,64	58,97	61,31	62,77

### III.2.4 Contenido total de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) respecto al peso del cemento

Una vez conocidas las cantidades de los materiales utilizados para la confección de los hormigones de prueba, además del porcentaje de  $\text{SO}_4^{-2}$  que cada uno posee, es posible determinar el contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  para cada hormigón. A continuación, se muestra el contenido total de  $\text{SO}_4^{-2}$  respecto al peso del cemento para cada hormigón de prueba.

Tabla III-14: Contenido total de  $\text{SO}_4^{-2}$  para cada hormigón de prueba, referido al peso del cemento.

<b><math>\text{SO}_4^{-2}</math> total en el hormigón [%] respecto al peso del cemento</b>				
<b><math>\text{SO}_4^{-2}</math> [%]</b>	<b>A/C</b>			
	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>	<b>0,80</b>
<b>0,30</b>	5,03	5,57	6,14	6,69
<b>0,72</b>	6,47	7,77	9,10	10,45
<b>1,08</b>	7,67	9,66	11,65	13,67
<b>1,44</b>	8,90	11,54	14,21	16,88

### III.2.5 Contenido de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) según la NCh170 Of.2016

Resulta interesante mostrar el contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  de los hormigones según requisito establecido por la NCh170 Of.2016, donde este no debe superar el 2% del peso del cemento, considerando la contribución total de los componentes del hormigón, excluyendo el cemento. Cabe destacar que dos hormigones cumplen con el requisito, por lo tanto, los 14 restantes se encuentran fuera de norma y no podrían ser confeccionados en la práctica con tales contenidos de sulfato.

Tabla III-15: Contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  en el hormigón según requisito de la NCh170 Of.2016.

<b><math>\text{SO}_4^{-2}</math> en el hormigón [%], según NCh170 Of.2016</b>				
<b><math>\text{SO}_4^{-2}</math> [%]</b>	<b>A/C</b>			
	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>	<b>0,80</b>
<b>0,30</b>	1,11	1,65	2,21	2,77
<b>0,72</b>	2,50	3,87	5,20	6,54
<b>1,08</b>	3,77	5,76	7,75	9,76
<b>1,44</b>	5,00	7,64	10,31	12,97

### III.2.6 Contenido total de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) expresados como $\text{kg/m}^3$

Otra forma de ver el contenido total de sulfatos en el hormigón se muestra en la siguiente tabla, donde dicho contenido expresado en  $\text{kg/m}^3$ , considera el aporte de todos los materiales constituyentes.

Tabla III-16: Contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  total en el hormigón, expresado en  $\text{kg/m}^3$ .

<b>Contenido total de <math>\text{SO}_4^{-2}</math> en el hormigón [<math>\text{kg/m}^3</math>]</b>				
<b><math>\text{SO}_4^{-2}</math> [%]</b>	<b>A/C</b>			
	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>	<b>0,80</b>
<b>0,30</b>	25,89	20,06	17,00	15,07
<b>0,72</b>	33,26	27,98	25,21	23,51
<b>1,08</b>	39,47	34,79	32,27	30,76
<b>1,44</b>	45,78	41,56	39,35	37,98

### III.2.7 Identificación de los hormigones

La notación utilizada para hacer referencia a cada uno de los hormigones confeccionados es:

*% de  $SO_4^{2-}$  respecto al peso seco de los áridos/Relación agua-cemento (% de contenido total de  $SO_4^{2-}$  en el hormigón con respecto al cemento).*

Luego, la identificación para cada hormigón se puede ver en la siguiente tabla:

**Tabla III-17: Identificación de cada hormigón de prueba confeccionado.**

Identificación de cada hormigón confeccionado				
$SO_4^{2-}$ [%]	A/C			
	0,35	0,50	0,65	0,80
<b>0,30</b>	0,30/0,35 (5,03%)	0,30/0,50 (5,57%)	0,30/0,65 (6,14%)	0,30/0,80 (6,69%)
<b>0,72</b>	0,72/0,35 (6,47%)	0,72/0,50 (7,77%)	0,72/0,65 (9,10%)	0,72/0,80 (10,45%)
<b>1,08</b>	1,08/0,35 (7,67%)	1,08/0,50 (9,66%)	1,08/0,65 (11,65%)	1,08/0,80 (13,67%)
<b>1,44</b>	1,44/0,35 (8,90%)	1,44/0,50 (11,54%)	1,44/0,65 (14,21%)	1,44/0,80 (16,88%)

Nota: El uso del porcentaje de contenido total de  $SO_4^{2-}$  en el hormigón con respecto al cemento en la identificación de los hormigones, se explica según lo que se verá más adelante en los resultados del trabajo.

### III.2.8 Confección de los hormigones

La confección de los hormigones se realiza según la norma NCh1018 (NCh1018 Of.2009 Hormigón – Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio, 2009). Posteriormente se determina la docilidad mediante el método del asentamiento del cono de Abrams, además de la densidad aparente del hormigón fresco y del contenido de aire.

### III.2.9 Llenado de moldes

Luego de la confección de cada mezcla, se llenan los 3 moldes de viguetas que se utilizan en el ensayo de expansividad y los moldes cúbicos de resina de 15 cm de arista para ensayos de compresión (NCh1017 Of.2009 Hormigón – Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento, 2009).

Tanto los moldes de las viguetas como los cubos son vibrados durante 35 segundos en la mesa vibradora, para posteriormente platachar la superficie de manera de obtener una mejor terminación.



**Figura III-5: Moldes llenos de hormigón antes del vibrado.**



**Figura III-6: Moldes platachados posterior al vibrado.**

### **III.2.10 Desmolde y Curado**

Posterior a la confección de las viguetas y cubos de hormigón, éstos se dejan curando en el laboratorio bajo una lámina de polietileno. Al día siguiente se desmoldan y se almacenan bajo agua a una temperatura de 20°C.

### **III.2.11 Medición inicial de las probetas**

Luego de transcurrido alrededor de 30 min en las piscinas, cada una de las viguetas se mide, correspondiendo esta medición a la lectura inicial ( $L_0$ ), respecto a la cual, posteriormente se referencian las expansiones.



### III.2.12 Medición de las expansiones

La medición de las probetas se realiza utilizando un comparador de mediciones que nos permite obtener la diferencia que existe entre el largo de una probeta con el largo de una barra patrón, la cual no sufre variaciones significativas de longitud en el tiempo.

Las mediciones se realizan a los 7, 14, 28, 56, 90, 120, 150 y 180 días, y se calcula el porcentaje de expansión como la diferencia entre la lectura obtenida ( $L_x$ ) con la lectura inicial ( $L_0$ ), dividida por la distancia libre de cada probeta ( $d_i$ ).

$$\%Expansi\acute{o}n_x = \frac{L_x - L_0}{d_i} \times 100$$

### III.2.13 Resistencia a compresión

Las probetas cúbicas provenientes de los hormigones de prueba, son ensayadas a la compresión a las edades de 7, 14, 28, 56, 90, 120, 150 y 180 días, con acuerdo a la norma NCh1037 (NCh1037 Of.2009 Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas, 2009).

## III.3 Resultados

### III.3.1 Propiedades de los hormigones confeccionados

#### III.3.1.1 Propiedades en estado fresco

En la siguiente tabla se muestran las propiedades en estado fresco, como la densidad del hormigón, asentamiento de cono, porcentaje de aire y temperatura para los 16 hormigones de prueba preparados.

Tabla III-18: Propiedades del hormigón fresco.

Identificación del Hormigón	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Asentamiento de cono [cm]	Porcentaje de aire [%]	Temperatura [°C]
0,30/0,35 (5,03%)	2425	11	1,9	20,7
0,30/0,50 (5,57%)	2407	9,5	1,5	20,2
0,30/0,65 (6,14%)	2406	18	1,3	19,9
0,30/0,80 (6,69%)	2343	9	2,5	20,1
0,72/0,35 (6,47%)	2433	18	2,1	21,0
0,72/0,50 (7,77%)	2361	7	-	19,4
0,72/0,65 (9,10%)	2397	17	2,7	-
0,72/0,80 (10,45%)	2337	16	-	-
1,08/0,35 (7,67%)	2415	9,5	1,8	17,7
1,08/0,50 (9,66%)	2382	16	1,8	17,6
1,08/0,65 (11,65%)	2378	8	1,8	17,6
1,08/0,80 (13,67%)	2342	7,5	1,5	17,7
1,44/0,35 (8,90%)	2428	9,5	0,9	19,6
1,44/0,50 (11,54%)	2364	9,5	2,1	19,9
1,44/0,65 (14,21%)	2413	7,5	1,8	21,1
1,44/0,80 (16,88%)	2369	14	2,0	18,8

Nota: Los parámetros faltantes no pudieron ser registrados.

### III.3.1.2 Propiedades en estado endurecido

A continuación, se muestran los resultados de ensayo de resistencia a la compresión en probetas cúbicas de 15 cm de arista para los hormigones de prueba confeccionados. Las edades de ensayo fueron 7, 14, 28, 56, 90, 120, 150 y 180 días desde su confección. Estas resistencias se presentan en un mismo gráfico para hormigones con igual relación agua/cemento, dejando como variable el contenido de  $SO_4^{2-}$ .

Tabla III-19: Resistencias a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,35.

Resistencia Cúbica a Compresión [MPa], A/C = 0,35								
$SO_4^{2-}$ [%]	Edad [Días]							
	7	14	28	56	90	120	150	180
<b>0,30</b>	72	76	86	87	95	101	103	103
<b>0,72</b>	73	77	80	89	94	95	94	95
<b>1,08</b>	56	66	72	82	90	93	100	99
<b>1,44</b>	57	60	72	81	87	90	95	91

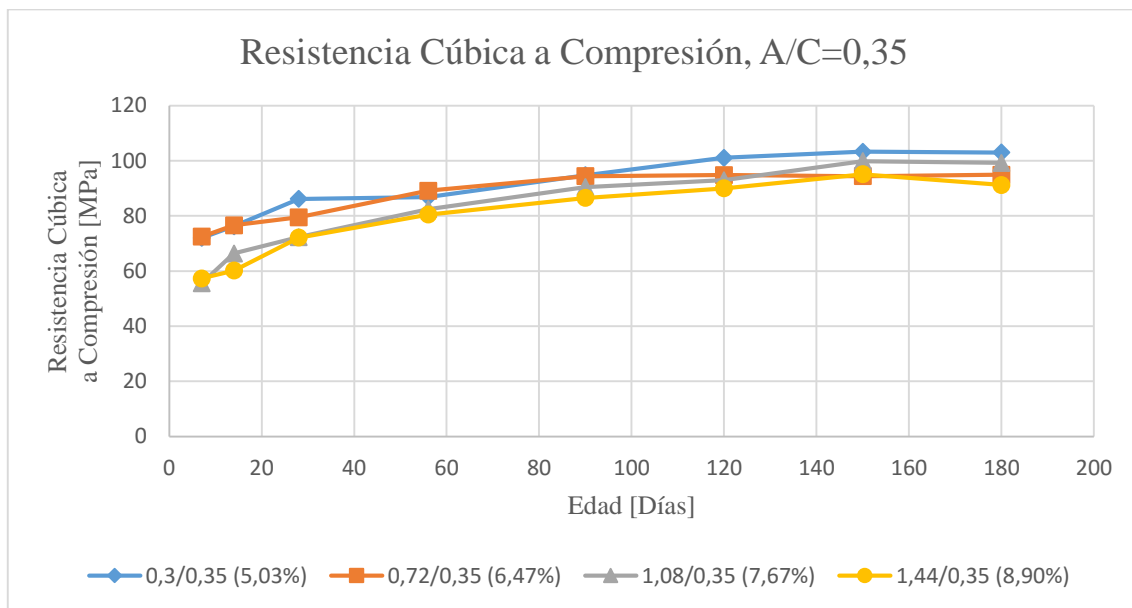


Figura III-7: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,35

Tabla III-20: Resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,50

Resistencia Cúbica a Compresión [MPa], A/C = 0,50								
$SO_4^{2-}$ [%]	Edad [Días]							
	7	14	28	56	90	120	150	180
<b>0,30</b>	49	55	58	64	68	70	74	74
<b>0,72</b>	37	45	51	60	62	64	67	68
<b>1,08</b>	30	34	39	43	52	56	60	67
<b>1,44</b>	29	33	37	44	48	51	54	58

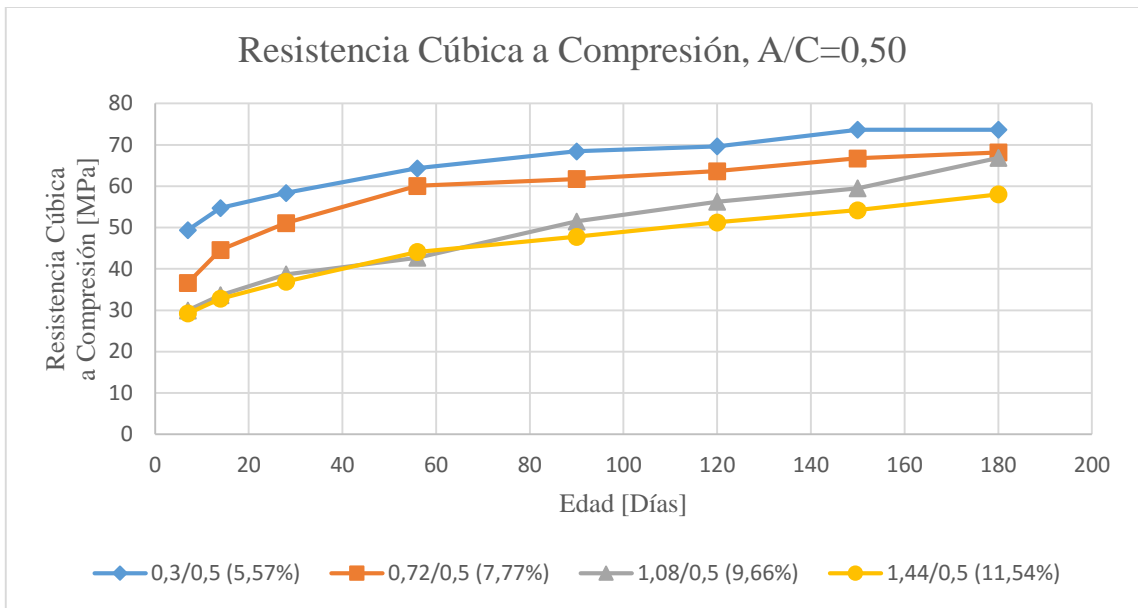


Figura III-8: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,50

Tabla III-21: Resistencias a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,65

Resistencia Cúbica a Compresión [MPa], A/C = 0,65								
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]	Edad [Días]							
	7	14	28	56	90	120	150	180
0,30	27	34	38	42	46	46	50	50
0,72	21	24	28	32	42	44	46	48
1,08	19	21	24	28	33	36	39	44
1,44	21	25	27	31	35	36	38	40

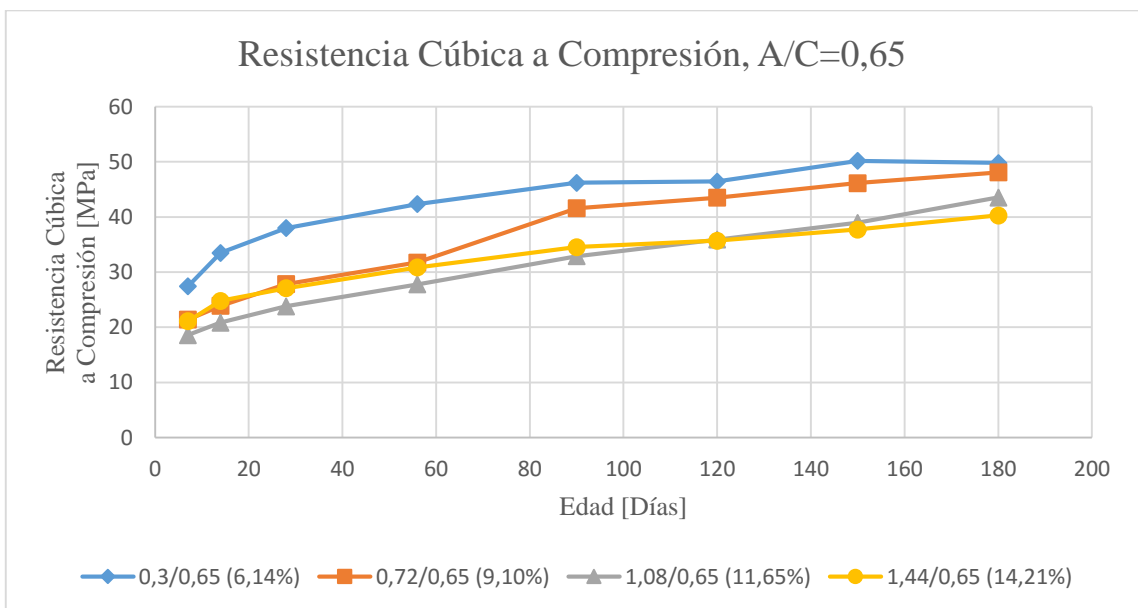


Figura III-9: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,65

Tabla III-22: Resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,80

Resistencia Cúbica a Compresión [MPa], A/C = 0,80								
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]	Edad [Días]							
	7	14	28	56	90	120	150	180
0,30	18	21	24	28	30	33	33	35
0,72	12	14	16	19	22	26	31	32
1,08	11	13	16	17	20	20	23	25
1,44	15	16	17	20	23	24	26	27

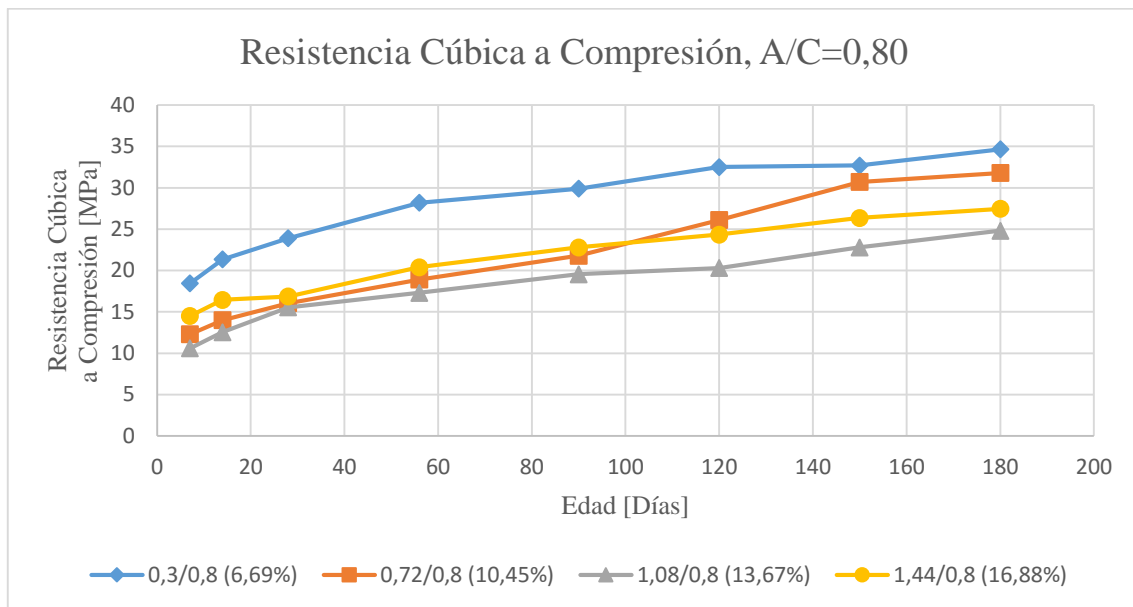


Figura III-10: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,80

### III.3.2 Comportamiento de los hormigones en estudio

Como se menciona anteriormente, se confeccionan hormigones de prueba para 4 relaciones agua/cemento diferentes, y a su vez, con 4 porcentajes distintos de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> respecto al peso seco de los áridos. Las expansiones promedio correspondientes a cada una de las 16 combinaciones mencionadas se muestran desde la Tabla III-23 a la Tabla III-26, las que son presentadas según una misma relación agua/cemento.

### III.3.2.1 Hormigones con relación agua/cemento de 0,35

Tabla III-23: Expansiones para los hormigones de A/C = 0,35 hasta los 180 días.

Expansiones [%], A/C = 0,35				
Edad [Días]	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]			
	0,30	0,72	1,08	1,44
7	0,012	-0,002	-0,001	0,011
14	0,009	-0,002	0,013	0,025
28	0,012	0,001	0,017	0,025
56	0,010	0,015	0,028	0,026
90	0,020	0,005	0,043	0,035
120	0,016	0,008	0,047	0,038
150	0,015	0,023	0,049	0,042
180	0,015	0,017	0,054	0,046

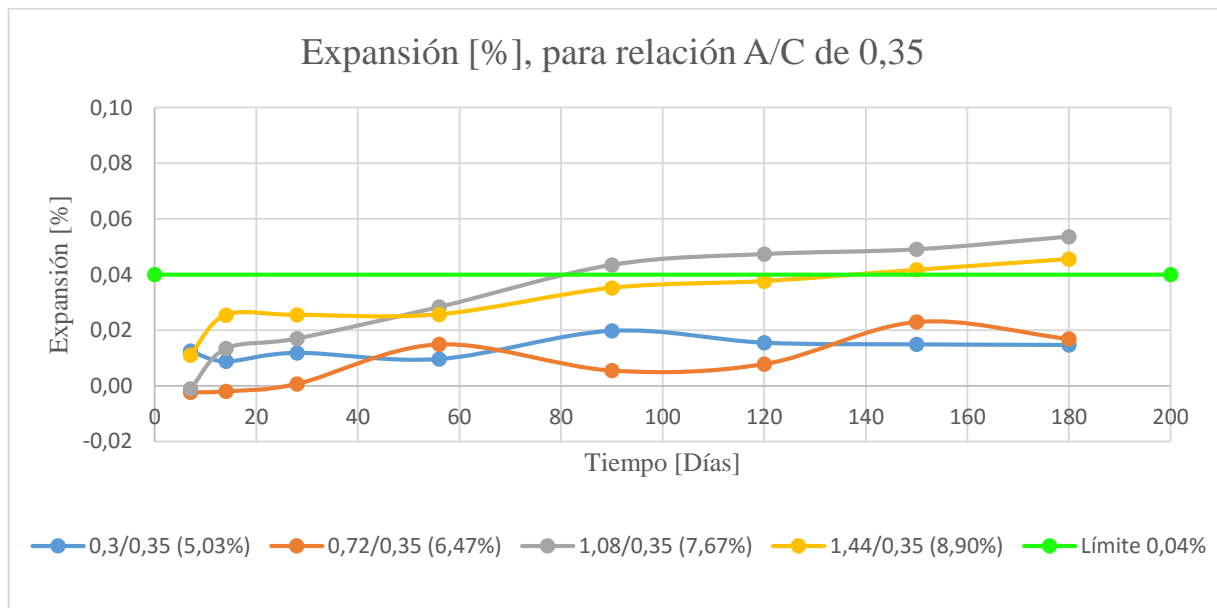


Figura III-11: Gráfico de las expansiones para los hormigones de A/C = 0,35 hasta los 180 días.

### III.3.2.2 Hormigones con relación agua/cemento de 0,50

Tabla III-24: Expansiones para los hormigones de A/C = 0,50 hasta los 180 días.

Expansiones [%], A/C = 0,50				
Edad [Días]	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]			
	0,30	0,72	1,08	1,44
7	0,008	-0,003	0,003	0,015
14	0,003	0,008	0,001	0,020
28	0,014	0,012	0,016	0,028
56	0,007	0,013	0,033	0,038
90	0,010	0,008	0,043	0,050
120	0,011	0,019	0,042	0,063
150	0,006	0,012	0,051	0,074
180	0,008	0,023	0,053	0,071

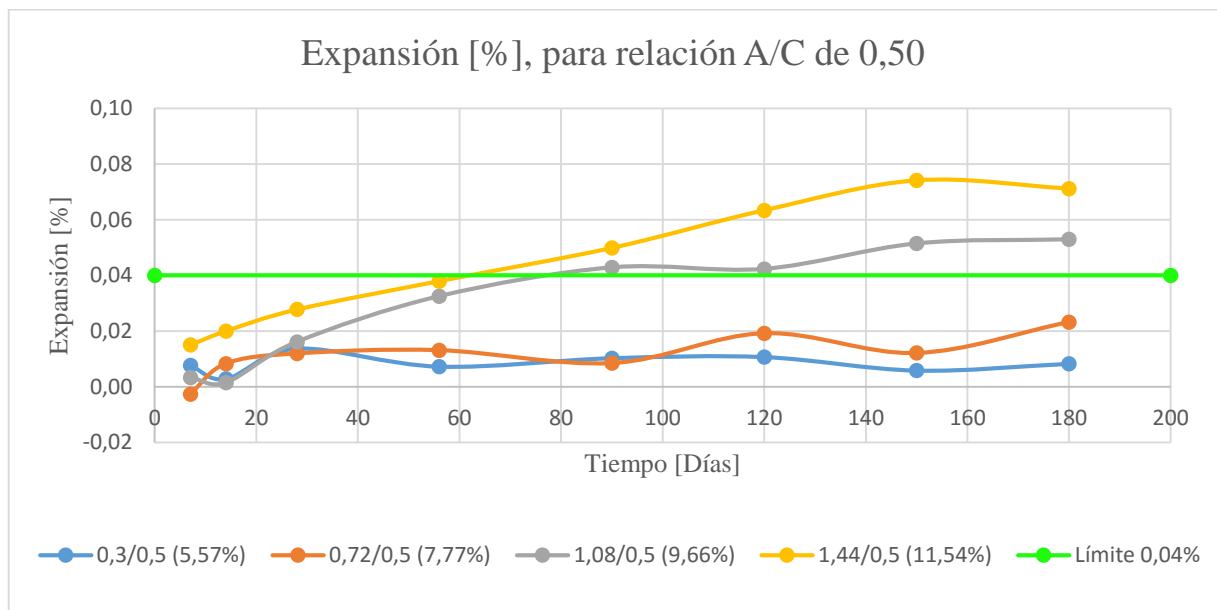


Figura III-12: Gráfico de las expansiones para los hormigones de A/C = 0,50 hasta los 180 días.

### III.3.2.3 Hormigones con relación agua/cemento de 0,65

Tabla III-25: Expansiones para los hormigones de A/C = 0,65 hasta los 180 días.

Expansiones [%], A/C = 0,65				
Edad [Días]	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]			
	0,30	0,72	1,08	1,44
7	0,011	0,020	0,011	0,018
14	0,014	0,023	0,019	0,027
28	0,018	0,038	0,026	0,028
56	0,011	0,044	0,048	0,038
90	0,017	0,047	0,055	0,056
120	0,019	0,050	0,067	0,073
150	0,010	0,047	0,063	0,080
180	0,015	0,053	0,068	0,094

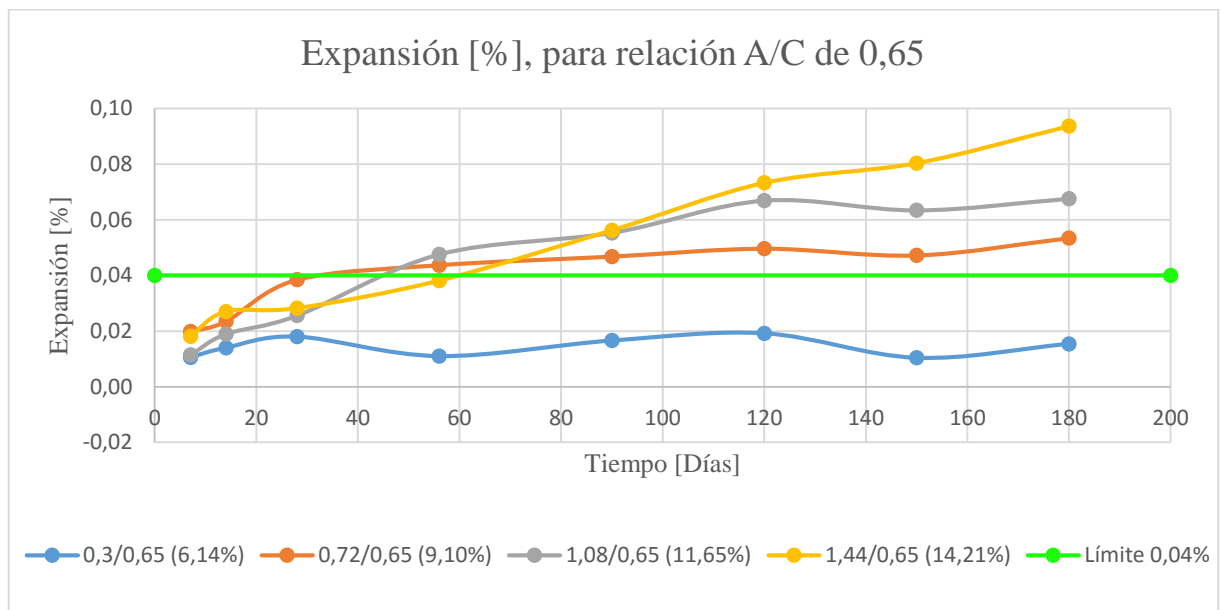


Figura III-13: Gráfico de las expansiones para los hormigones de A/C = 0,65 hasta los 180 días.

### III.3.2.4 Hormigones con relación agua/cemento de 0,80

Tabla III-26: Expansiones para los hormigones de A/C = 0,80 hasta los 180 días.

Expansiones [%], A/C = 0,80				
Edad [Días]	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [%]			
	0,30	0,72	1,08	1,44
7	0,006	0,021	0,007	0,018
14	0,007	0,016	0,012	0,031
28	0,012	0,027	0,033	0,031
56	0,015	0,036	0,042	0,041
90	0,012	0,049	0,053	0,065
120	0,014	0,048	0,066	0,086
150	0,007	0,039	0,080	0,090
180	0,010	0,045	0,072	0,105

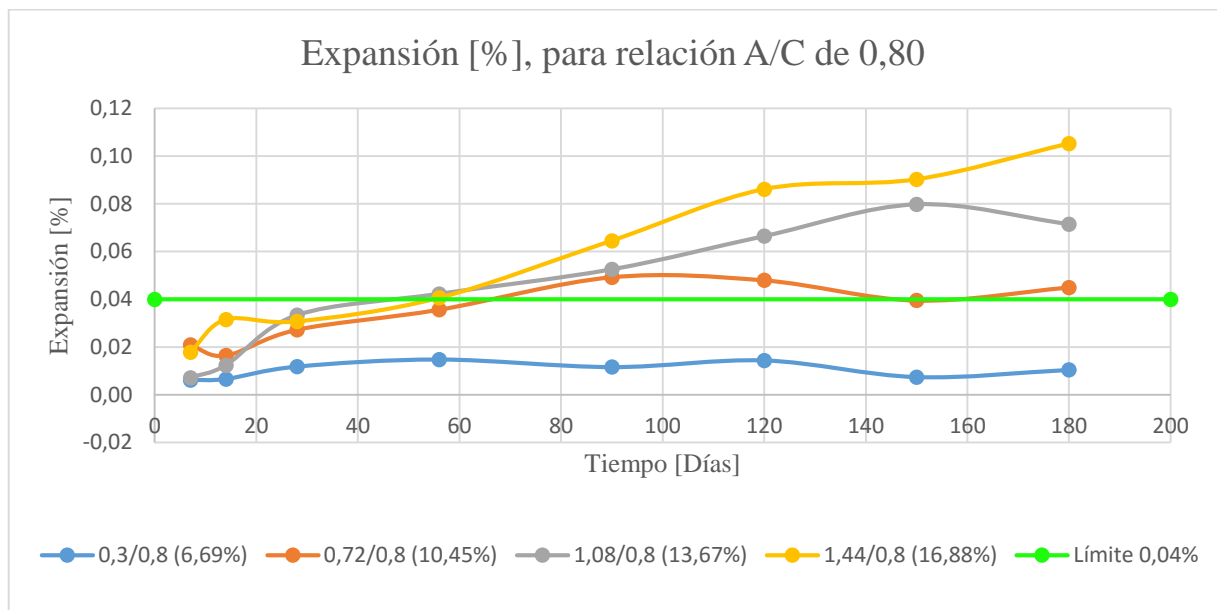


Figura III-14: Gráfico de las expansiones para los hormigones de A/C = 0,80 hasta los 180 días.



# CAPÍTULO IV : ANÁLISIS DE RESULTADOS

## IV.1 Propiedades de los hormigones

### IV.1.1 Composición química de los hormigones, contenido de $\text{SO}_4^{-2}$

A continuación, se muestran los contenidos de sulfato respecto al peso del cemento, expresado como  $\text{SO}_4^{-2}$ , para cada uno de los hormigones confeccionados. Donde es posible observar que dos de ellos (0,30/0,35 (5,03%) y 0,30/0,50 (5,57%)) cumplen con la NCh170, ya que son los únicos que están por debajo del límite del 2%, incluyendo a todos los componentes, salvo al cemento. Por lo tanto, solo 2 de los 16 hormigones confeccionados podrían ser utilizados de acuerdo a la NCh170.

Además, cabe destacar que los hormigones con un contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  de 0,30% respecto al peso seco de los áridos, cumplen con la NCh163, entonces, los 12 restantes no cumplen con la norma.

Tabla IV-1: Contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  en el hormigón según requisito de NCh 170.

<b><math>\text{SO}_4^{-2}</math> en el hormigón [%], NCh 170</b>				
<b>%<math>\text{SO}_4^{-2}</math></b>	<b>A/C</b>			
	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>	<b>0,80</b>
<b>0,30</b>	1,11	1,65	2,21	2,77
<b>0,72</b>	2,47	3,72	5,01	6,30
<b>1,08</b>	3,63	5,55	7,74	9,76
<b>1,44</b>	4,99	7,64	10,30	12,97

### IV.1.2 Propiedades en estado endurecido

Al aumentar el contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  para hormigones con una misma relación agua/cemento, se disminuye la resistencia a la compresión del hormigón a las 8 edades de ensayo, lo que se debe al efecto retardador de la incorporación de yeso a la dosificación de cada hormigón. Dicha pérdida de resistencia para igual relación agua/cemento entre quien tiene menor y mayor contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla IV-2: Pérdida de resistencia a la compresión entre el hormigón con mayor y menor contenido de  $\text{SO}_4^{-2}$  para una misma relación agua/cemento [%].

<b>Pérdida de resistencia a la compresión entre el hormigón con mayor y menor contenido de <math>\text{SO}_4^{-2}</math> para una misma relación agua/cemento [%]</b>				
<b>Edad [Días]</b>	<b>A/C</b>			
	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>	<b>0,80</b>
<b>28</b>	16	36	29	29
<b>180</b>	12	22	20	23

Esta pérdida de resistencia consecutiva a medida que aumenta el contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  en cada hormigón de igual relación agua/cemento se cumple para la mayoría de los hormigones confeccionados, salvo para 1,44/0,65 (11,65%) y 1,44/0,80 (13,67%), que poseen el mayor contenido de sulfato y relaciones agua/cemento más altas.

Además, es posible observar que siempre aumenta la resistencia a la compresión en el tiempo, a pesar de que están sufriendo ataque interno por sulfato y sus expansiones son mayores al límite permisible. Este comportamiento podría ser explicado por la presencia de puzolana en el cemento, ya que es conocido su efecto beneficioso en el aumento de la resistencia y aumento de la durabilidad del hormigón a edades mayores a los 28 días, más aún si el período de evaluación es de 180 días.

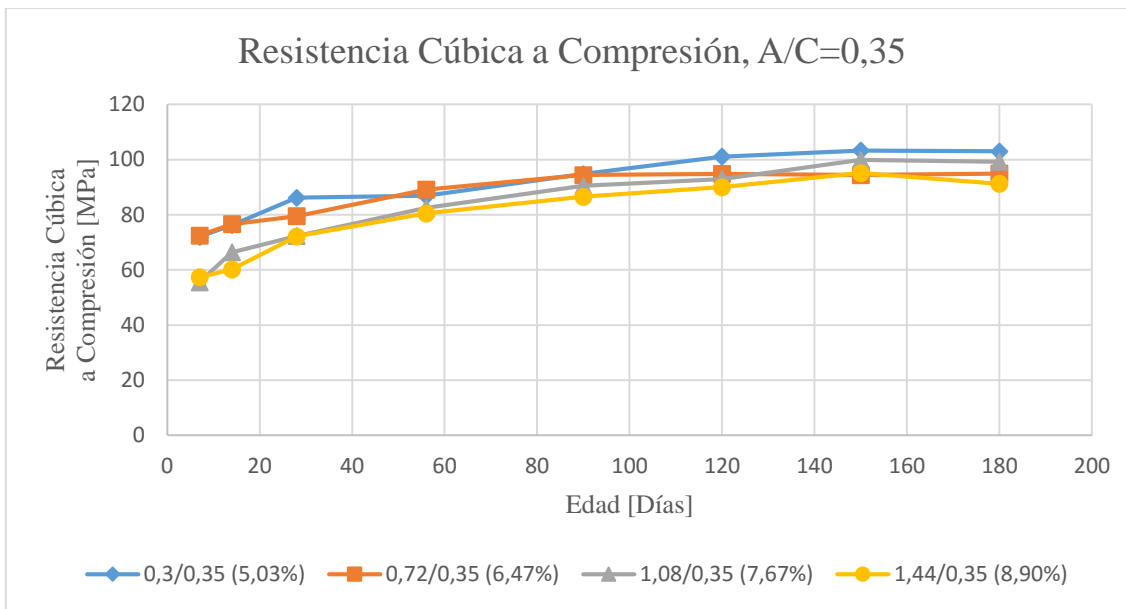


Figura IV-1: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,35

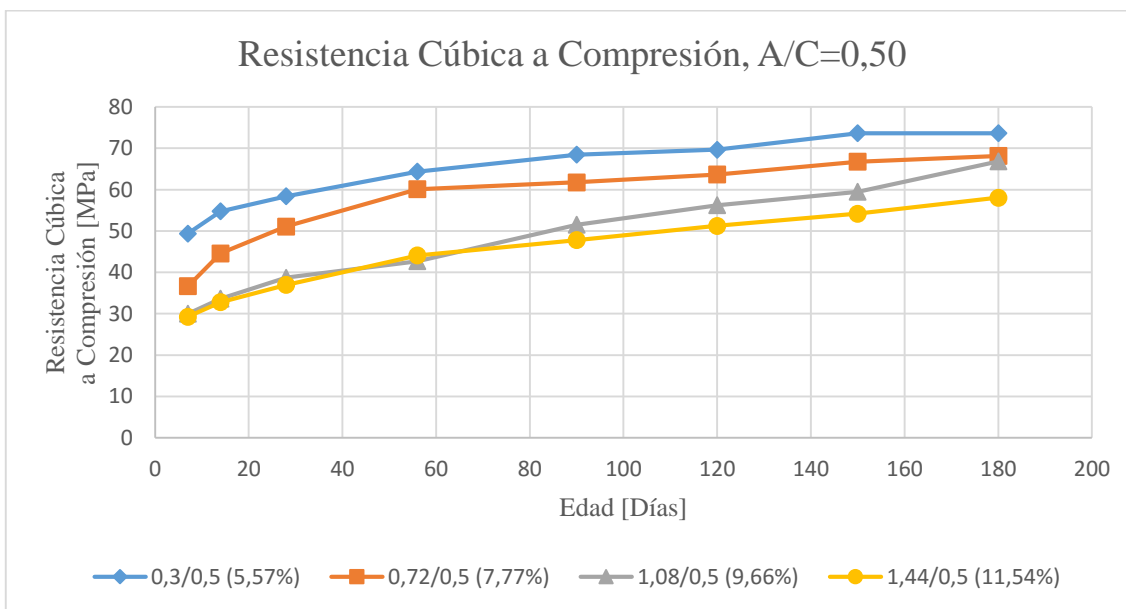
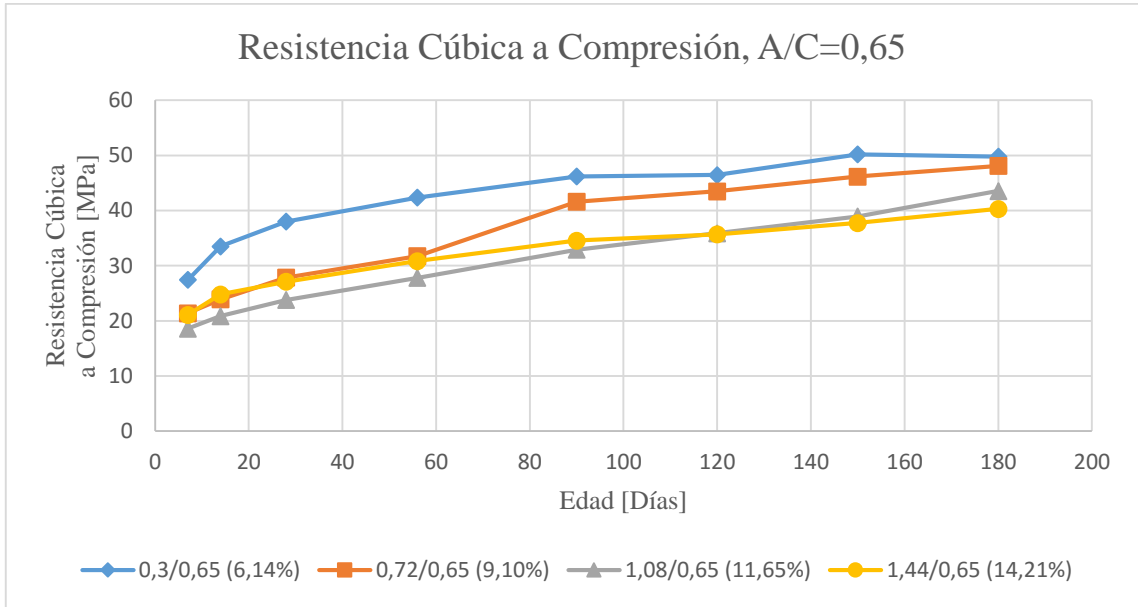
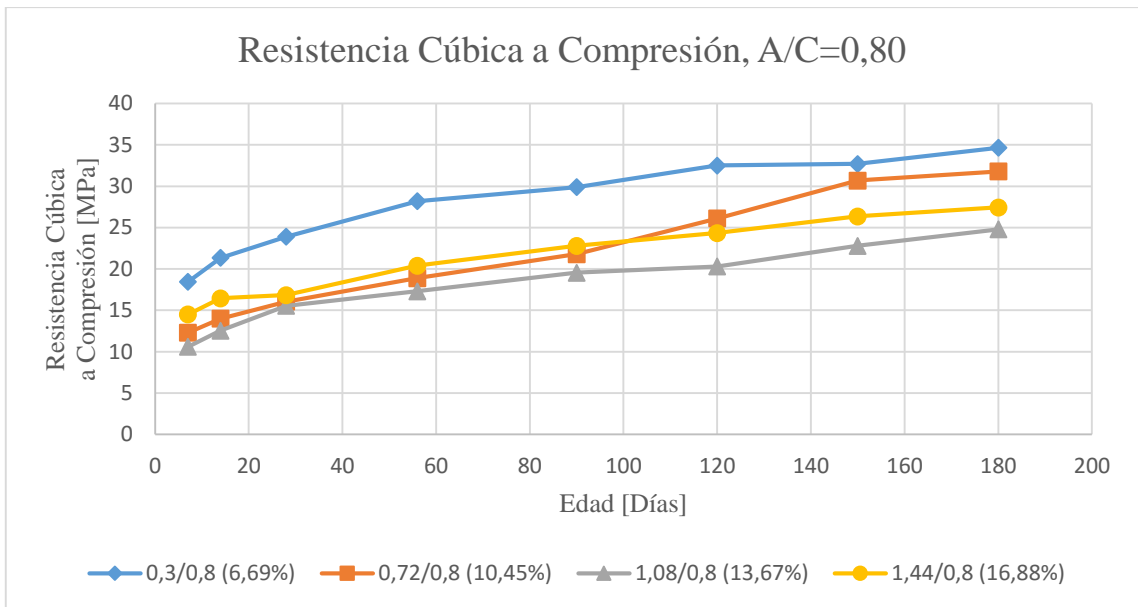


Figura IV-2: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,50



**Figura IV-3: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,65**



**Figura IV-4: Gráfico de la resistencia a compresión de los hormigones con relación agua/cemento de 0,80**

### IV.1.3 Comportamiento de los hormigones estudiados en el ensayo de expansión

Según lo observado en el punto III.3.2 respecto al cumplimiento del límite de expansión de los hormigones en estudio y en conjunto con algunas de las formas en que es posible expresar el contenido de sulfatos en el hormigón vistas en los puntos III.2.4 a III.2.6, se tienen las siguientes tablas resumen:

Tabla IV-3: Cumplimiento del límite de expansiones de 0,04% según el contenido interno total de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Contenido interno total de $\text{SO}_4^{2-}$ [%] respecto al peso del cemento				
$\text{SO}_4^{2-}$ [%]	A/C			
	0,35	0,50	0,65	0,80
0,30	5,03	5,57	6,14	6,70
0,72	6,47	7,77	9,10	10,45
1,08	7,67	9,66	11,65	13,67
1,44	8,90	11,54	14,21	16,88

Donde: Cumple No Cumple

Tabla IV-4: Cumplimiento del límite de expansiones de 0,04% según la NCh170 Of.2016.

$\text{SO}_4$ en el hormigón [%], según NCh 170 Of.2016				
$\text{SO}_4^{2-}$ [%]	A/C			
	0,35	0,50	0,65	0,80
0,30	1,11	1,65	2,21	2,77
0,72	2,56	3,87	5,20	6,54
1,08	3,77	5,76	7,75	9,76
1,44	5,00	7,64	10,31	12,97

Tabla IV-5: Cumplimiento del límite de expansiones de 0,04% según la cantidad total de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el hormigón.

Cantidad total de $\text{SO}_4^{2-}$ en el hormigón [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]				
$\text{SO}_4^{2-}$ [%]	A/C			
	0,35	0,50	0,65	0,80
0,30	25,89	20,06	17,00	15,07
0,72	33,26	27,98	25,21	23,51
1,08	39,47	34,79	32,27	30,76
1,44	45,78	41,56	39,35	37,98

De donde se observa que expresando el contenido de sulfatos según la NCh170 Of.2016 y según el contenido interno total respecto al cemento, es posible ver que el cumplimiento del límite de expansiones se condice con los menores contenidos de sulfatos para cada forma de expresarlos. En cambio, no es claro para el caso de expresar la cantidad de sulfatos en  $\text{kg}/\text{m}^3$ , ya que existen valores intermedios de contenidos (23,51 y 25,21  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) que no cumplen, sin embargo, otros mayores a éstos (25,89; 27,98 y 33,26  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) si cumplen.

Dado que la forma de expresar el contenido de sulfatos en el hormigón según la NCh170 Of.2016 se condice con el comportamiento de los hormigones en las expansiones, es posible determinar un límite para dicho contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$ , el cual es posible establecer en 2,6%, ya que es el mayor contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  del cual se tiene certeza del cumplimiento del límite admisible de expansión para relaciones agua/cemento mayores o iguales a 0,35. Dicho límite resulta ser 30,0% mayor que el límite actual de 2,00%.

Entonces, ya que se comprueba que el expresar el contenido interno total de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) respecto al cemento es efectivo, por lo tanto, será la forma en que se analice con más detalle el comportamiento a la expansión de los hormigones en estudio. Dichos hormigones se dividieron según tramos de contenido interno total de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) respecto al peso del cemento.

#### IV.1.3.1 Contenido de $\text{SO}_4^{2-}$ total entre 5 – 6,5 [%]

Los hormigones que se encuentran entre estos límites, no presentan grandes incrementos en sus expansiones en las edades finales respecto a las medidas en edades iniciales. Es más, las expansiones están cerca o al límite de cumplir con la expansión del 0,02%, siendo las pertenecientes al hormigón 0,72/0,35 (6,47%) el que desarrolla expansiones hasta el 0,023%.

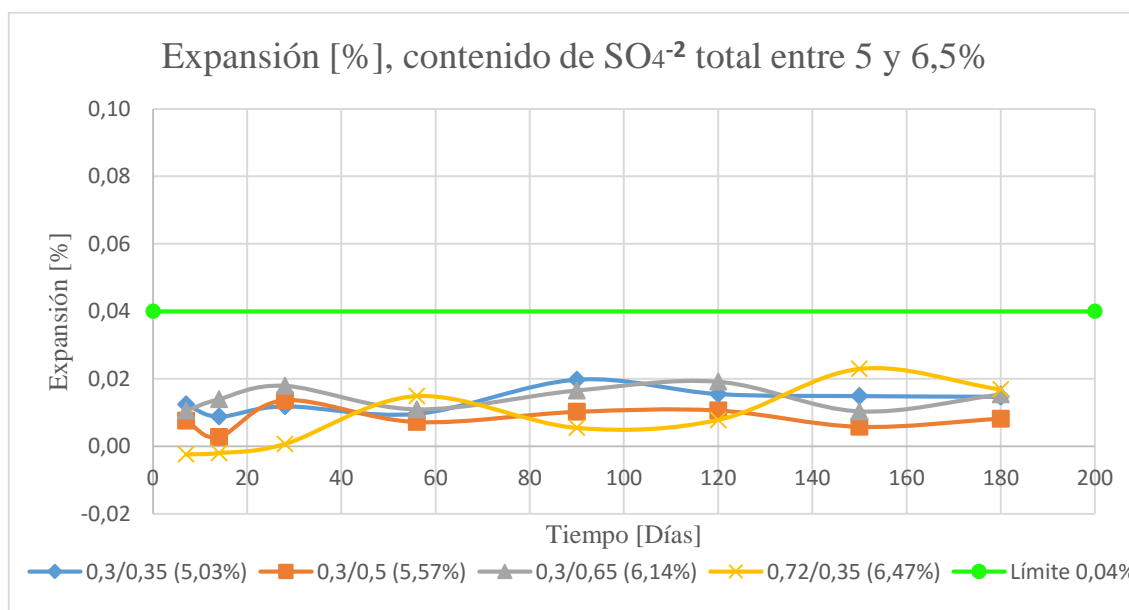


Figura IV-5: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  entre [5% - 6,5%]

#### IV.1.3.2 Contenido de $\text{SO}_4^{2-}$ total entre 6,5 - 8 [%]

Dos de los tres hormigones pertenecientes a este rango, presentan expansiones similares al intervalo anterior, donde el hormigón 0,72/0,50 (7,77%) en la última medición alcanza una expansión de 0,023%. Sin embargo, el hormigón 1,08/0,35 (7,67%) quien posee un menor contenido interno total de  $\text{SO}_4^{2-}$  respecto al 0,72/0,50 (7,77%), presenta expansiones a lo largo del período de evaluación considerablemente mayores, incluso superando el límite permisible de 0,04%, ya que la última expansión medida es de 0,054%. Lo anterior podría explicarse porque el hormigón que presenta mayores expansiones es el de menor relación A/C, por lo tanto, el de mayor dosis de cemento, entonces, una mayor cantidad ( $\text{kg/m}^3$ ) de  $\text{C}_3\text{A}$  y de  $\text{SO}_4^{2-}$ , ya que a pesar de que ambos hormigones posean un % de  $\text{SO}_4^{2-}$  comparable, dicho porcentaje está referido al peso del cemento.

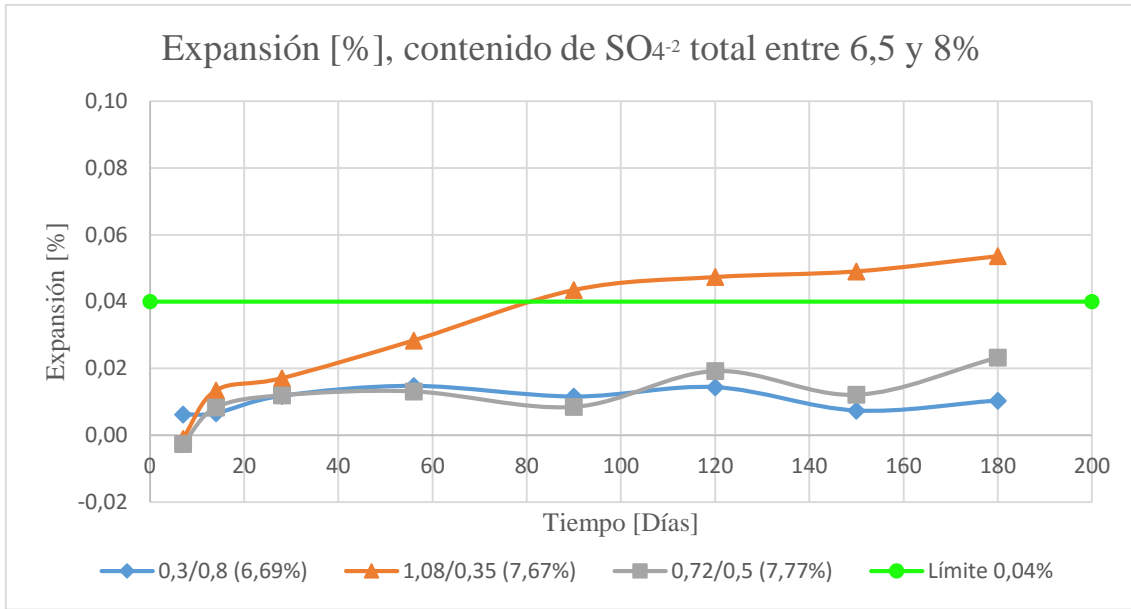


Figura IV-6: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  entre [6,5% - 8%]

#### IV.1.3.3 Contenido de $\text{SO}_4^{2-}$ total entre 8 – 9,5 [%]

En el caso de los hormigones pertenecientes a este rango, estos superan el límite impuesto. El hormigón 0,72/0,65 (9,10%) lo hace a los 56 días con una expansión de 0,044% y llegando a la última de 0,053%. En cambio, el hormigón 1,44/0,35 (8,90%) lo hace al final del periodo de evaluación, a los 150 días con una expansión de 0,042%, lo que se explica debido a que este último posee un menor contenido interno total de sulfatos.

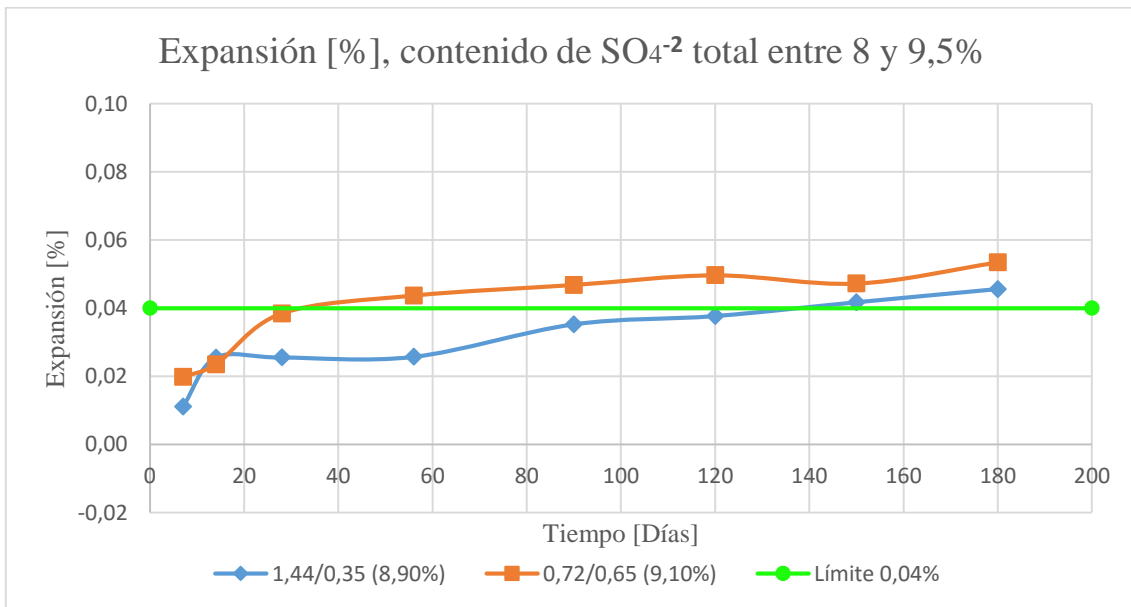


Figura IV-7: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  entre [8% - 9,5%]

#### IV.1.3.4 Contenido de $\text{SO}_4^{2-}$ total entre 9,5 - 11 [%]

Para el caso de los hormigones pertenecientes a este rango, ambos superan el límite de la expansión a los 90 días, y hasta la medición a los 150 días las expansiones para el hormigón 0,72/0,80 (10,45%) son mayores respecto al 1,08/0,50 (9,66%), ya que el primero posee un mayor contenido interno total de sulfatos, sin embargo, en las dos edades finales esto se invierte.

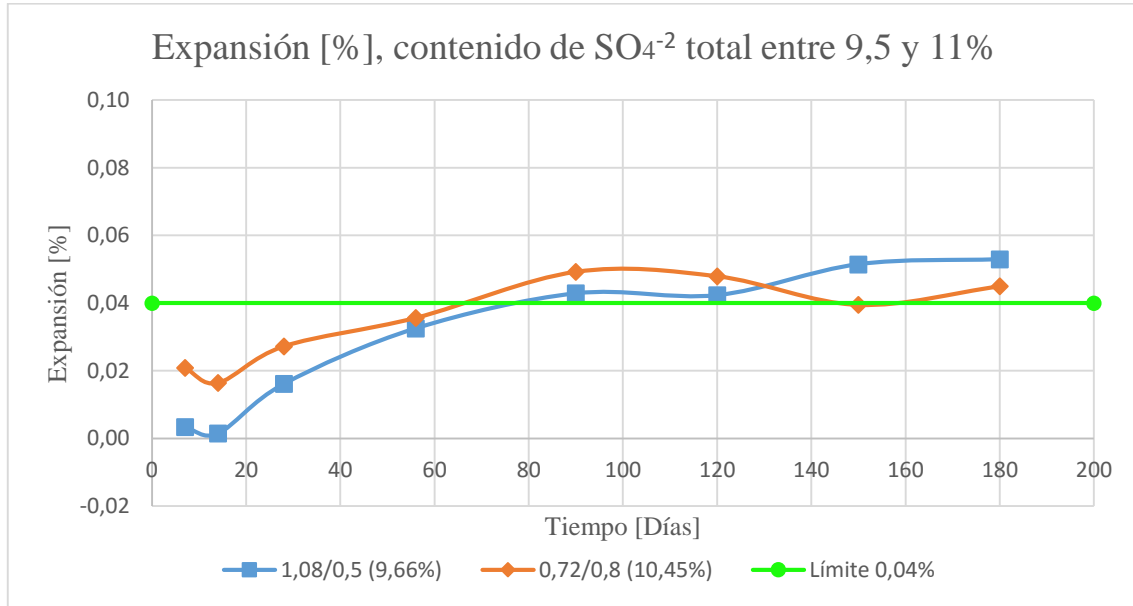


Figura IV-8: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  entre [9,5% - 11%]

#### IV.1.3.5 Contenido de $\text{SO}_4^{2-}$ total entre 11 – 12,5 [%]

Para este rango, el hormigón 1,44/0,50 supera el límite a los 90 días y el 1,08/0,65 (11,65%) a los 56 días, ya que el contenido interno total de sulfatos de este último es mayor. Sin embargo, al igual que para el intervalo anterior, las mediciones finales muestran una inversión de las curvas, donde el hormigón 1,44/0,50 (11,54%) llega una expansión de 0,074% mientras que el 1,08/0,65 (11,65%) a una de 0,068%.

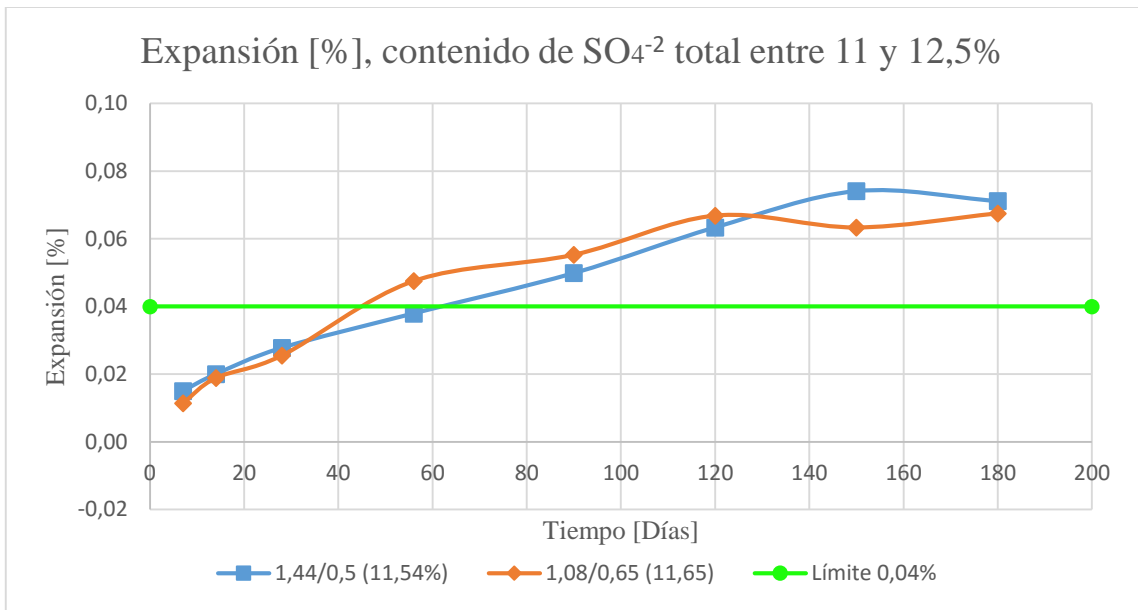


Figura IV-9: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  entre [11% - 12,5%]

#### IV.1.3.6 Contenido de $\text{SO}_4^{2-}$ total entre 12,5 - 17 [%]

En el caso del rango con los mayores contenidos internos totales de  $\text{SO}_4^{2-}$ , estos hormigones muestran que a los 56 días, las expansiones son muy cercanas al límite, incluso el hormigón 1,08/0,80 (13,67%) lo supera con una expansión del 0,054%. Luego, en las expansiones finales, los hormigones reflejan el contenido interno total de cada uno, ya que los hormigones 1,44/0,80 (16,88%); 1,44/0,65 (14,21%) y 1,08/0,80 (13,67%) llegan a expansiones de 0,09%; 0,08% y 0,076% respectivamente.

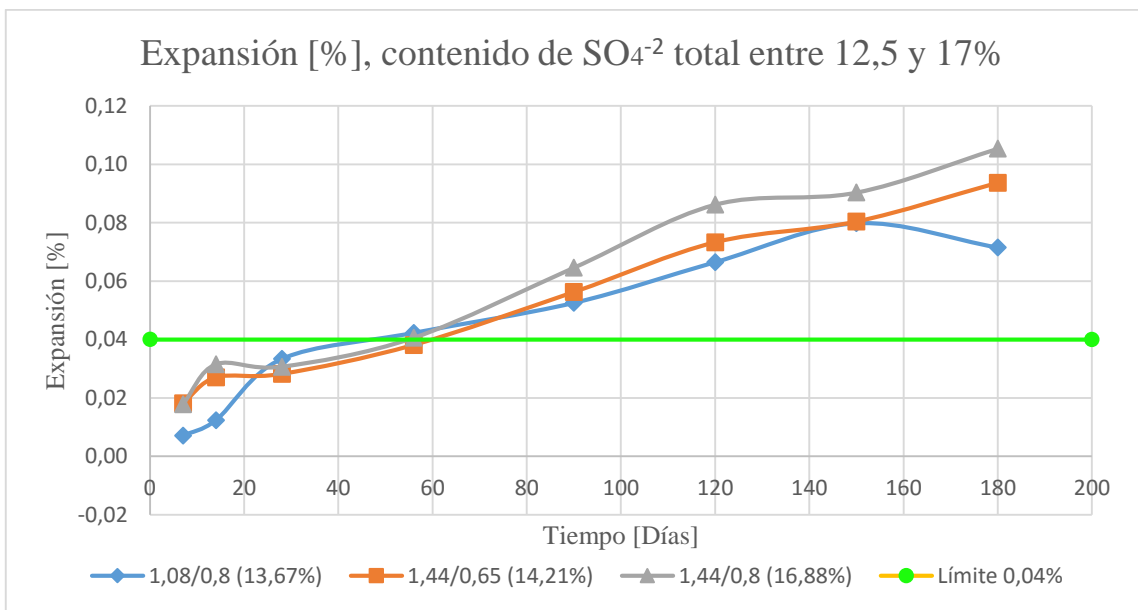


Figura IV-10: Gráfico de las expansiones para los hormigones con un contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  entre [12,5% - 17%]



#### IV.1.3.7 Resumen del comportamiento

En la siguiente tabla se detalla el cumplimiento o no del límite descrito en el punto II.9.

**Tabla IV-6: Tabla resumen del cumplimiento o no del límite de expansión de 0,04%.**

<b>Cumplimiento del límite de expansión 0,04%, según el contenido interno total de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> [%] respecto al peso del cemento</b>				
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> [%]</b>	<b>A/C</b>			
	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>	<b>0,80</b>
<b>0,30</b>	5,03	5,57	6,14	6,70
<b>0,72</b>	6,47	7,77	9,10	10,45
<b>1,08</b>	7,67	9,66	11,65	13,67
<b>1,44</b>	8,90	11,54	14,21	16,88
Donde:	Cumple	No Cumple		

Por lo tanto, se establece como límite el 6,5% para el contenido interno total de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en el hormigón referido al peso del cemento, ya que este es el mayor valor del que se tiene certeza el cumplimiento del límite de expansión de 0,04% para las relaciones agua/cemento en estudio, mayores o iguales a 0,35. Este límite podría ser mayor, sin embargo, el comportamiento de los hormigones 0,72/0,50 (7,77%) y 1,08/0,35 (7,67%) fue diferente a pesar de que poseen porcentajes de contenido interno total de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> respecto al cemento similares.

Además, es posible ver en la siguiente figura, la distribución del contenido interno total de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> según los hormigones confeccionados y su cumplimiento o no del límite de expansiones, en función del contenido de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> según el peso seco de los áridos y la relación agua/cemento de cada hormigón. También se encuentra el límite propuesto de 6,5% marcado con amarillo.

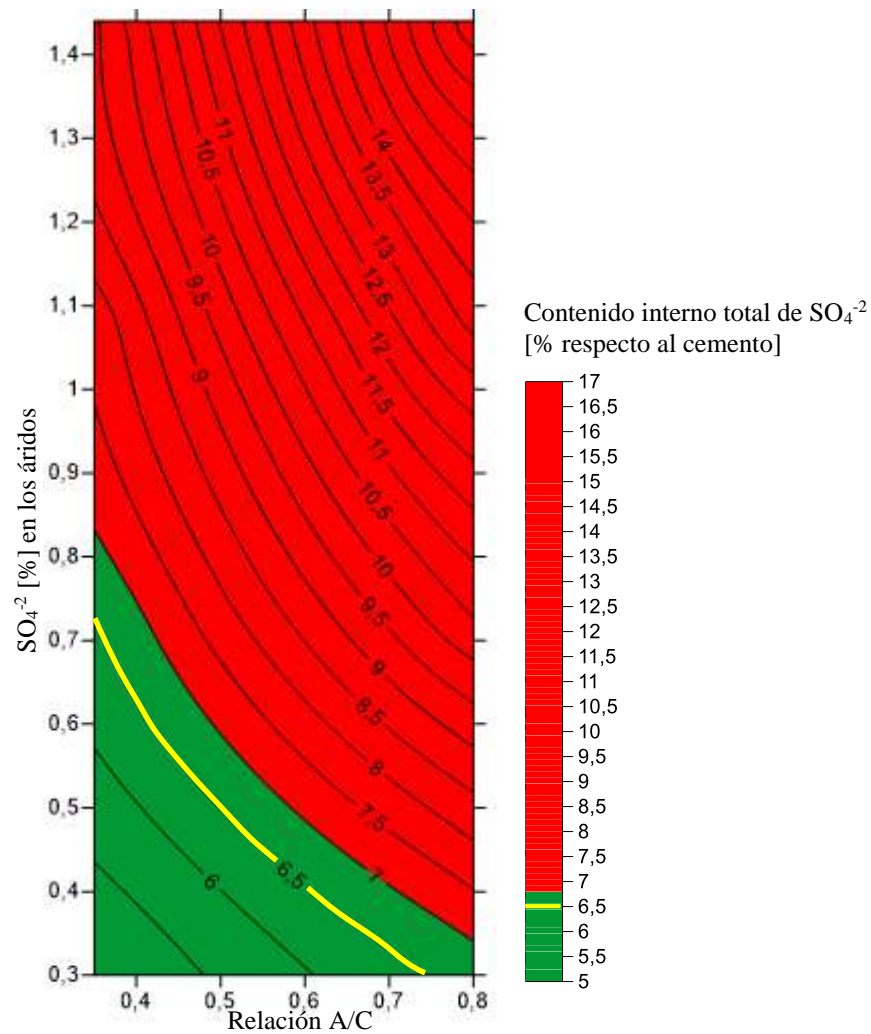


Figura IV-11: Curvas de nivel de la  $\text{SO}_4^{2-}$  [% respecto al cemento].

#### IV.1.3.8 Análisis de sensibilidad

Además, se realiza un análisis de sensibilidad considerando límites hipotéticos de expansiones incluso más estrictos que el utilizado para este trabajo, estos son 0,03; 0,02 y 0,01%. A continuación, se presentan, al igual que en el punto anterior, las tablas resumen del cumplimiento o no de los límites a los 180 días.

Tabla IV-7: Tabla resumen del cumplimiento o no del límite de expansión de 0,03%.

Cumplimiento del límite de expansión 0,03% según el contenido interno total de $\text{SO}_4^{2-}$ [%] respecto al peso del cemento				
$\text{SO}_4^{2-}$ [%]	A/C			
	0,35	0,50	0,65	0,80
0,30	5,03	5,57	6,14	6,70
0,72	6,47	7,77	9,10	10,45
1,08	7,67	9,66	11,65	13,67
1,44	8,90	11,54	14,21	16,88

Según lo observado en la tabla anterior, el límite propuesto para una expansión máxima de 0,03% coincide con el propuesto para la expansión de 0,04%, que es 6,5% de  $\text{SO}_4^{-2}$  en el hormigón respecto al peso del cemento, para hormigones con relaciones agua/cemento mayores a 0,35.

**Tabla IV-8: Tabla resumen del cumplimiento o no del límite de expansión de 0,02%.**

<b>Cumplimiento del límite de expansión 0,02% según el contenido interno total de <math>\text{SO}_4^{-2}</math> [%] respecto al peso del cemento</b>				
<b><math>\text{SO}_4^{-2}</math> [%]</b>	<b>A/C</b>			
	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>	<b>0,80</b>
<b>0,30</b>	5,03	5,57	6,14	6,70
<b>0,72</b>	6,47	7,77	9,10	10,45
<b>1,08</b>	7,67	9,66	11,65	13,67
<b>1,44</b>	8,90	11,54	14,21	16,88

Para el límite máximo de expansiones de 0,02%, el límite propuesto sería de 6,1%, ya que es del que se tiene certeza del cumplimiento de dichas expansiones, ya que los hormigones 0,30/0,80 (6,70%) y 0,72/0,35 (6,47%) a pesar de tener un porcentaje similar de contenido interno total de  $\text{SO}_4^{-2}$  en el hormigón respecto al cemento, su comportamiento frente a las expansiones es opuesto. El límite anterior es válido para hormigones con relación agua/cemento mayores o iguales a 0,35.

**Tabla IV-9: Tabla resumen del cumplimiento o no del límite de expansión de 0,01%.**

<b>Cumplimiento del límite de expansión 0,01% según el contenido interno total de <math>\text{SO}_4^{-2}</math> [%] respecto al peso del cemento</b>				
<b><math>\text{SO}_4^{-2}</math> [%]</b>	<b>A/C</b>			
	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>	<b>0,80</b>
<b>0,30</b>	5,03	5,57	6,14	6,70
<b>0,72</b>	6,47	7,77	9,10	10,45
<b>1,08</b>	7,67	9,66	11,65	13,67
<b>1,44</b>	8,90	11,54	14,21	16,88

En relación al límite de expansiones 0,01%, no es posible establecer un límite de contenido interno total de  $\text{SO}_4^{-2}$ , ya que ningún hormigón estuvo bajo esos niveles de expansiones.

#### IV.1.4 Influencia del curado permanente bajo agua

Al momento de realizar los ensayos de resistencia a la compresión se constató que la penetración de agua a través de las caras de los cubos no era de gran profundidad para los hormigones cuya relación agua/cemento es más baja. Por lo tanto, se realizaron ensayos de tracción por hendimiento a cubos de 15 cm de arista con el fin de registrar la profundidad de penetración del agua de curado. Dichos registros se muestran en la Figura IV-12.



**Figura IV-12: Fotografías de la penetración del agua de curado en las probetas cúbicas de 15 cm.**

En la figura anterior se observa que la profundidad de penetración del agua de curado es baja para los hormigones cuya relación agua/cemento también lo es. Además, sumado al comportamiento en las expansiones de los hormigones con baja relación agua/cemento, los hormigones 1,08/0,35 (7,67%) y 1,44/0,35 (8,90%) no cumplieron con el límite impuesto, entonces, es posible decir que a las reacciones expansivas les fue suficiente con el agua sobrante de la hidratación del cemento para llevarse a cabo.

# CAPÍTULO V : CONCLUSIONES

Para que se genere el ataque interno por sulfatos en el hormigón, debe haber una fuente de éstos, por ejemplo, áridos contaminados con sulfatos debido a las características de los lugares de extracción. Si bien se sabe que la presencia de los sulfatos es perjudicial para el desempeño y durabilidad del hormigón, la falta de áridos inocuos, el costo asociado a tratarlos o transportar áridos limpios desde otros lugares, genera que el costo total de confección del hormigón aumente considerablemente. De aquí que la normativa vigente establece límites máximos para el contenido de sulfatos a el hormigón o a sus componentes.

Otra condición necesaria pero no suficiente para activar las reacciones expansivas, es la presencia de humedad en la fase de curado y a corto plazo, en la etapa de puesta en servicio de la estructura. Incluso, puede que no sea necesaria la presencia de un ambiente de alta humedad en la estructura, como se evidenció en este estudio.

En el presente estudio, se investigó el comportamiento de hormigones de prueba, confeccionados con un cemento portland puzolánico y áridos del río Maipo que cumplen con la NCh163 Of.2013, con diferentes contenidos de sulfato, añadido a la mezcla como yeso y expresado como  $SO_4^{-2}$ , y a la vez con distintas relaciones agua/cemento, lo que se traduce en hormigones con distintos grados de resistencia. La investigación se basa en mediciones de resistencia a la compresión y expansiones de prismas de hormigón hasta los 180 días.

De acuerdo con los resultados obtenidos de estos ensayos se puede concluir lo siguiente:

- La forma en que la NCh170 Of.2016 limita el contenido de  $SO_4^{-2}$  en el hormigón sí representa el comportamiento de los hormigones en el desarrollo de expansiones. Por lo tanto, es posible establecer un límite para el contenido de  $SO_4^{-2}$  en el hormigón expresado según la NCh170 Of.2016, el cual se podría fijar en 2,6%, aumentando en un 30,0% el límite actual.
- Es posible establecer un criterio distinto para expresar el límite del contenido de sulfatos en un hormigón, al que establecen las normativas vigentes en el país, este es incluir el aporte de todos los materiales constituyentes del mismo y expresarlo respecto al peso del cemento. Esta forma de expresar el contenido límite mostró coherencia con los resultados de las expansiones medidas, mostrando un límite entre hormigones que cumplieron con el valor de expansión máximo propuesto por el LCPC (0,04%) y los que no.
- Es posible utilizar elementos constituyentes del hormigón cuyo aporte total de sulfatos referidos al peso del cemento es inferior a 6,5%. Dentro de los elementos constituyentes que podrían contener un mayor contenido de sulfato, destacan los áridos que no cumplen con el requisito establecido por la NCh163 Of.2013 y más en general, las dosificaciones que no cumplen con el requisito establecido por la NCh170 Of.2016. Las probetas de cuyos hormigones están por debajo de dicho límite se mantuvieron por debajo de la expansión sugerida por el LCPC, que está asociado al comportamiento de hormigones bajo DEF, pero que acá se utiliza como indicador de alteración en las propiedades del hormigón.

- El uso de un cemento portland puzolánico puede que haya contribuido a que todos los hormigones confeccionados siempre fuesen ganando resistencia en el tiempo, a pesar de que todos, en distinto grado, estaban experimentando ataques internos por sulfato. Incluso en aquellos en que las expansiones superaban por más del doble a la máxima establecida por el LCPC. Así también, puede haber influido en el comportamiento de los hormigones en el desarrollo de las expansiones.
- La presencia de agua o humedad en el ambiente no es estrictamente necesaria para generar las reacciones expansivas, ya que como se evidenció en el trabajo, para el caso de hormigones con la menor relación agua/cemento y por ende una mayor impermeabilidad, las reacciones expansivas se generaron de igual manera, por lo tanto, no fue necesaria el agua de curado para generar las reacciones, sino que fue suficiente con aquella agregada a la mezcla y no utilizada para la hidratación del cemento.

# CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Kheder, G. and Assi, D. (2009). Limiting total internal sulphates in 15–75 MPa concrete in accordance to its mix proportions. *Materials and Structures*, 43(1-2), pp.273-281.
- [2]. NCh1017 Of.2009 Hormigón - Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresion, tracción por flexión y por hendimiento. (2009). Instituto Nacional de Normalización.
- [3]. NCh1018 Of.2009 Hormigón - Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio. (2009). Instituto Nacional de Normalización.
- [4]. NCh1019 Of.2009 Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams. (2009). Instituto Nacional de Normalización.
- [5]. NCh1037 Of.2009 Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. (2009). Instituto Nacional de Normalización.
- [6]. NCh1116 Of.2008 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente. (2008). Instituto Nacional de Normalización.
- [7]. NCh1117 Of.2010 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las gravas. (2010). Instituto Nacional de Normalización.
- [8]. NCh1444 Of.2010 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de cloruros y sulfatos. (2010). Instituto Nacional de Normalización.
- [9]. NCh145 Of.99 Yeso – Métodos de análisis químicos. (1999). Instituto Nacional de Normalización.
- [10]. NCh147 Of.69 Cemento – Análisis Químico. (1969). Instituto Nacional de Normalización.
- [11]. NCh148 Of.68 Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales. (1968). Instituto Nacional de Normalización.
- [12]. NCh154 Of.69 Cemento – Determinación del peso específico relativo. (1969). Instituto Nacional de Normalización.
- [13]. NCh1564 Of.2009 Hormigón – Determinación de la densidad aparente del hormigón fresco. (1979). Instituto Nacional de Normalización.
- [14]. NCh163 Of.2013 Áridos para morteros y hormigones – Requisitos. (2013). Instituto Nacional de Normalización.
- [15]. NCh165 Of.77 Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. (1977). Instituto Nacional de Normalización.
- [16]. NCh170 Of.2016 Hormigón – Requisitos generales. (2016). Instituto Nacional de Normalización.
- [17]. NCh2184 Of.92 Hormigón y mortero – Métodos de ensayo – Determinación del contenido de aire. (1992). Instituto Nacional de Normalización.

- [18]. NCh2221 Of.94 Hormigón y mortero – Métodos de ensayo – Determinación de los cambios de longitud. (1994). Instituto Nacional de Normalización.
- [19]. NCh2281/6 Of.2010 Aditivo para hormigón – Método de ensayo – parte 6: determinación del contenido de sulfatos. (2010). Instituto Nacional de Normalización.
- [20]. Skalny, J., Marchand, J. and Odler, I. (2003). *Sulfate Attack on Concrete*. 1st ed. London: Spon Press.
- [21]. Custódio, J. and Ribeiro, A. (2015). Internal expansive reactions in concrete structures – deterioration of the mechanical properties. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 27(2), pp.108-114.
- [22]. Ríos, W. y Zétola, V. (1990). Evaluación del efecto de los sulfatos incorporados por los áridos en obras de hormigón en la zona norte, pp.314-333.
- [23]. Sahmaran, M., Kasap, O., Duru, K. and Yaman, I. (2007). Effects of mix composition and water–cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), pp.159-167.
- [24]. de Sousa Coutinho, A. (1979). Aspects of Sulfate Attack on Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 1(1), pp.10-12.
- [25]. Merida, A. and Kharchi, F. (2015). Pozzolan Concrete Durability on Sulphate Attack. *Procedia Engineering*, 114, pp.832-837.
- [26]. LCPC. (2007). LPC Test Method n°66: Reactivity of a concrete mix design with respect to the delayed ettringite formation - Performance testing.
- [27]. LCPC. (2009). Recommendations for preventing disorders due to delayed ettringite formation. Guide technique of the laboratoires des ponts et chaussées.