

# 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