



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

“COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN QUE TIENE ENTRE SUS COMPONENTES MOLÉCULAS DE NANOSÍLICE, ANTE EL ATAQUE QUÍMICO DE SULFATO DE MAGNESIO”

Tesis para optar al título de:
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor Patrocinante:
Sr. Ernesto Zumelzu Delgado.
Ingeniero Civil Metalúrgico
Doctor Materiales, Energía y Medioambiente.

Profesor Co-Patrocinante:
Sr. Carlos Cabezas Cuevas
Magíster en Ciencias, mención Química.

FABIOLA ALEJANDRA BRANDT BRANDT
Valdivia – Chile
2008

*Dedicada a mi madre
María Teresa Brandt.
Todo lo que soy ahora
Te lo debo a ti.*

Agradecimientos

En primer lugar a Dios por ser mi gran guía y protector, cuidándome cada día de mi vida.

A mi mamá, María Teresa Brandt, quien es mi incondicional apoyo, fortaleza y principal ejemplo, por todos los sacrificios que ha hecho por mí, para darme siempre la mejor educación.

A mi madrina Ana María López y su familia, por su cariño, ayuda y preocupación.

Al Sr. Ernesto Zumelzu, patrocinante de ésta tesis por su colaboración y orientación en el desarrollo de la investigación.

Al Sr. Carlos Cabezas, por su co-patrocinio, además del constante compromiso, paciencia y dedicación durante la realización del presente trabajo.

Al Sr. Carlos Vergara M, director de Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles, por sus consejos desde la elaboración del proyecto de esta tesis, y a través de su persona a todos los profesores que participaron en mi formación.

Al Sr. Ricardo Silva R, docente del Instituto de Histología y Patología, por su excelente disposición y colaboración.

A los funcionarios del laboratorio Lemco, Instituto de Materiales y Procesos Termodinámicos, y Dirección de Investigación y Desarrollo por su ayuda, buena voluntad y facilidades para la ejecución de este trabajo.

A mis amigas de toda la vida, por su compañía, optimismo y palabras de ánimo durante todo este proceso.

A mis compañeros de carrera, entre quienes conocí excelentes personas y buenos amigos, que hicieron de mi paso por la universidad una etapa muy alegre.

INDICE TEMÁTICO

<u>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	<u>1</u>
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Antecedentes bibliográficos.....	2
1.2.1 Historia e Inversión.....	2
1.2.1.1 Logro reciente en el área de la Nanotecnología.....	3
1.2.2 Nanotecnología en América Latina.....	3
1.2.3 Nanotecnología en Chile.....	3
1.2.4 Nanotecnología en Ingeniería Civil.....	5
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Metodología y Estructura de trabajo.....	7
1.5 Alcances y limitaciones.....	8
<u>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</u>	<u>9</u>
2.1 Química y hormigón.....	9
2.1.1 Cemento y sus componentes.....	9
2.1.1.1 Características de los constituyentes del cemento.....	10
2.1.2 Producción del cemento.....	11
2.1.3 Fraguado y Curado.....	12
2.1.4 Reacciones de hidratación normal.....	12

2.1.5	Microestructura durante el proceso de hidratación.....	13
2.1.5.1	Fase Inicial.....	13
2.1.5.2	Fase Intermedia.....	14
2.1.5.3	Fase Final.....	14
2.1.6	El agua en la hidratación del cemento.....	14
2.1.6.1	Relación Agua/Cemento.....	15
2.1.7	Productos de la hidratación del cemento.....	15
2.1.8	Ataque químico al hormigón.....	16
2.1.8.1	Ambiente químicamente agresivo.....	17
2.1.8.2	Clasificación de ataques químicos.....	18
2.2	Durabilidad del Concreto.....	20
2.2.1	Características de la permeabilidad del concreto.....	21
2.2.1.1	Factores influyentes en la permeabilidad.....	21
2.2.2	Mecanismos de infiltración.....	23
2.2.2.1	Absorción.....	23
2.2.2.2	Permeabilidad.....	24
2.2.2.3	Difusión.....	24
2.2.3	Resistencia a los Sulfatos.....	25
2.2.4	Reacción álcali-agregado.....	25
2.2.4.1	Reacción Álcali- Sílice.....	26
2.2.4.2	Reacción Álcali- Silicato.....	26
2.2.4.3	Reacción Álcali-Carbonatos.....	27
2.2.5	Tendencia a la fisuración.....	27
2.3	¿Qué es Nano?.....	29
2.3.1	Nanociencia y Nanotecnología.....	29
2.3.2	Nanoestructuras.....	30

2.3.3	Nanomateriales.....	30
2.3.3.1	Definición.....	30
2.3.3.2	Clasificación de nanomateriales.....	31
2.3.3.3	Aplicaciones.....	32
2.3.3.4	Nanomateriales en el concreto.....	32
2.4	Nanosílice.....	33
2.4.1	Composición de la Nanosílice.....	35
2.4.2	Funcionamiento de la Nanosílice en la pasta de cemento.....	36
2.4.3	Incidencia de la Nanosílice en las propiedades del Cemento.....	36
2.4.3.1	Con respecto a las propiedades físicas.....	36
2.4.3.2	Incidencia en las propiedades mecánicas.....	37
2.4.3.3	Efectos en la mineralogía.....	37
2.4.4	Beneficios conocidos en las propiedades del hormigón.....	39
2.5	Sulfatos.....	40
2.5.1	Ataque por sulfatos.....	41
2.5.2	Mecanismos de reacción.....	41
2.5.3	Modos de deterioro del concreto.....	42
2.5.3.1	Protección del hormigón.....	43
2.5.3.2	Reparación de estructuras que han sido dañadas por sulfatos.....	43
2.6	Sulfato de Magnesio.....	44
2.6.1	Composición química.....	44
2.6.2	Presencia de Sulfato de Magnesio.....	44
2.6.3	Evaluación de la agresividad del medio.....	45

2.6.4	Factores que rigen la agresión química.....	46
2.6.5	Descripción de la acción del Sulfato de Magnesio sobre el concreto.....	47
2.6.5.1	Reacciones químicas por la acción de Sulfato de Magnesio sobre hormigón.....	47
2.6.6	Productos del ataque químico del Sulfato de Magnesio.	48
2.6.6.1	Yeso secundario.....	49
2.6.6.2	Etringita.....	49
2.6.6.3	Hidróxido de Magnesio.....	50
2.6.7	Efectos del ataque químico.....	51
2.6.7.1	Efectos de la acción simultánea de sulfatos.....	52

CAPÍTULO III. ENSAYO DE INMERSIÓN EN SULFATO DE MAGNESIO 53

3.1	Elaboración de probetas de mortero con adiciones de Nanosílice.....	53
3.1.1	Confección de moldajes.....	53
3.1.1.1	Materiales.....	53
3.1.1.2	Características.....	53
3.1.2	Fabricación del mortero.....	53
3.1.2.1	Materiales.....	53
3.1.2.2	Características de materiales usados en la elaboración del mortero.....	54
3.1.3	Resultados de Ensayos Normalizados de áridos para la fabricación de morteros	55
3.1.3.1	Granulometría.....	55
3.1.3.2	Cálculo de Módulo de Finura.....	56
3.1.3.3	Determinación colorimétrica de la presencia de impurezas orgánicas en las arenas para hormigones.....	57
3.1.3.4	Porcentaje de material fino menor a 0.080mm.....	57
3.1.3.5	Determinación de densidades y absorción de agua.....	58

3.1.4	Dosificación de morteros.....	60
3.1.4.1	Cantidades de mortero a elaborar.....	63
3.1.4.2	Adiciones de Nanosílice.....	63
3.2	Análisis de pérdida de material.....	67
3.2.1	Preparación de Solución.....	67
3.2.1.1	Materiales.....	67
3.2.1.2	Procedimiento.....	68
3.2.2	Determinación peso seco de probetas previo a Ensayo de Inmersión.....	68
3.2.2.1	Materiales y equipos.....	68
3.2.2.2	Procedimiento.....	69
3.2.3	Inmersión de probetas en solución de Sulfato de Magnesio.....	70
3.2.3.1	Materiales.....	70
3.2.3.2	Metodología.....	70
3.2.4	Determinación peso seco de probetas posterior a Ensayo de Inmersión.....	72
3.2.5	Resultados obtenidos del Ensayo de Inmersión en Sulfato de Magnesio.....	74
3.2.5.1	Con respecto a las probetas que no fueron sometidas a Ensayo (T0).....	74
3.2.5.2	Comparación de Resultado con respecto a la razón agua/cemento.....	77
3.2.5.3	En relación a la adición de Nanosílice utilizada.....	78
3.3	Análisis descriptivo y discusión de resultados.....	80
3.4	Medición de pH.....	87
3.4.1	Concepto de pH.....	87
3.4.2	Instrumento de medición.....	87
3.4.3	Metodología.....	88
3.5	Análisis de resultados de Curvas de pH.....	90

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

91

4.1	Microscopio Electrónico de Barrido.....	91
4.1.1	Interacción haz incidente con muestra en SEM.....	92
4.1.2	Aplicaciones del Microscopio Electrónico de Barrido en Hormigones y áridos.....	92
4.2	Análisis de Microscopía Electrónica.....	93
4.2.1	Preparación de Muestras.....	93
4.2.1.1	Recubrimiento de muestras con oro.....	93
4.2.1.2	Recubrimiento de muestras con carbono.....	94
4.3	Muestras caracterizadas en Estudio de Microscopía Electrónica.....	95
4.4	Microanálisis Químico por Energía Dispersiva de Rayos X (EDAX).....	112
4.5	Análisis Imágenes Microscopía Electrónica.....	132
4.5.1	Hipótesis de Trabajo.....	132
4.5.2	Análisis de Muestras.....	132
4.5.2.1	Muestra Control Buena (A/C 0.55 1.5% T0) y Muestra Control Mala (A/C 0.65 0.5%T0).....	132
4.5.2.2	Muestra con Menor pérdida de material: A/C 0.55 1.5%	133
4.5.2.3	Muestra con Mayor pérdida de material: A/C 0.65 0.5%	133
4.5.2.4	Análisis Grupo de Muestras con Daño Creciente.....	133
4.5.2.5	Análisis Grupo de Muestras con Daño Decreciente.....	134
4.6	Discusión de Resultados Imágenes SEM.....	135
4.7	Estudio de Microanálisis Químicos.....	137
4.8	Discusión de Resultados Microanálisis Químicos.....	146

**CAPÍTULO V. COMPARACIÓN CON RESULTADOS OBTENIDOS EN
INVESTIGACIÓN PRECEDENTE PARA SULFATO DE SODIO** **148**

5.1 Recomendaciones aplicadas de la Experiencia Anterior.....148

5.2 Con respecto a los mecanismos de reacción de la Nanosílice.....148

5.3 En relación al Análisis de Pérdida de Material.....149

5.4 En relación a los valores de pH.....150

5.5 En cuanto a los Análisis de Microscopía Electrónica.....151

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES **152**

6.1 Comentarios y Conclusiones.....152

BIBLIOGRAFÍA **155**

ANEXOS **159**

ANEXO A: Descripción de Ensayos realizados a los áridos utilizados.....159

ANEXO B: Registro de pesos secos y disminuciones porcentuales, de
probetas de mortero con adición de Nanosílice ante ataque de
Sulfato de Magnesio.....170

ANEXO C: Concentración de moles de Magnesio.176

ANEXO D: Resultados obtenidos para Sulfato de Sodio.....179

INDICE DE FIGURAS

Temario: _____ **Página.**

CAPÍTULO I: ASPECTOS INTRODUCTORIOS.

Figura 1.1	Evolución de las publicaciones sobre nanociencia y nanotecnología en Chile.....	4
-------------------	---	---

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

Figura 2.1	Fases del proceso de hidratación.....	13
Figura 2.2	Factores que influyen en la permeabilidad del concreto.....	23
Figura 2.3	Mecanismo de Difusión.....	24
Figura 2.4	Nueva tecnología para producir nanoestructuras.....	30
Figura 2.5	Comparación de tamaño de partículas de Microsílice y Nanosílice.....	33
Figura 2.6	Fotografía electrónica de Nanosílice a 100nm.....	34
Figura 2.7	Detalle de los distintos componentes de la Nanosílice por medio de Microscopio de Transmisión de Electrones.....	35
Figura 2.8	Microfotografía SEM del hidróxido de calcio a 28 días.....	38
Figura 2.9	(a) Concreto normal 28 días de curado; (b) Concreto con adición de nanosílice a 28 días de curado; (c) Concreto normal 180 días de curado; (d) Concreto con adición de nanosílice a 180 días de curado.....	38
Figura 2.10	Reacciones químicas en el concreto por presencia de Sulfatos.....	42
Figura 2.11	Modos de falla del concreto por el ataque de Sulfatos.....	42
Figura 2.12	Minerales de Sulfato de Magnesio.....	44
Figura 2.13	Microfotografía SEM de Yeso.....	49
Figura 2.14	Etringita.....	50
Figura 2.15	Hidróxido de Magnesio.....	50
Figura 2.16	Pasta de cemento y cubo de hormigón sometidas al ataque de Sulfato de Magnesio.....	51

CAPÍTULO III: ENSAYO DE INMERSIÓN EN SULFATO DE MAGNESIO.

Figura 3.1	Características del patrón de color.....	57
Figura 3.2	Medición de cantidad de Nanosílice a utilizar.....	64
Figura 3.3	Medición de cantidad de Nanosílice a utilizar.....	64
Figura 3.4	Identificación de cantidades de Nanosílice.....	65
Figura 3.5	Medición de cantidad de cemento y arena a utilizar.....	65
Figura 3.6	Medición de cantidad de cemento y arena a utilizar.....	65
Figura 3.7	Probetas aceitadas para facilitar el desmolde.....	65
Figura 3.8	Llenado de moldes con mortero.....	66
Figura 3.9	Total de probetas ya confeccionadas en sus respectivos moldes.....	66
Figura 3.10	Tras los 28 días las probetas fueron desmoldadas.....	66
Figura 3.11	Esquema de distribución de recipientes y muestras.....	70
Figura 3.12	Uno de los recipientes utilizados con su respectiva identificación.....	72
Figura 3.13	Uno de los recipientes utilizados con su respectiva identificación.....	72
Figura 3.14	Secado de probetas en balanza detectora de humedad.....	72
Figura 3.15	Registro de peso seco de probetas posterior a Ensayo de Inmersión....	73
Figura 3.16	Instrumento utilizado para medición de pH.....	88

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

Figura 4.1	Microscopio Electrónico de Barrido utilizado en el presente estudio.....	91
Figura 4.2	Maquina utilizada para sombrear las muestras con oro.....	94
Figura 4.3	Muestras de mortero con adición de nanosílice recubiertas en oro, dispuestas para ser analizadas en SEM.....	94
Figura 4.4	Imagen muestra con Menor Pérdida de material a Escala 1000x.....	96
Figura 4.5	Imagen muestra con Menor Pérdida de material a Escala 5000x.....	96
Figura 4.6	Imagen muestra con Menor Pérdida de material a Escala 12000x.....	97
Figura 4.7	Imagen muestra con Menor Pérdida de material a Escala 60000x.....	97
Figura 4.8	Imagen muestra Control Buena a Escala 1000x.....	98
Figura 4.9	Imagen muestra Control Buena a Escala 5000x.....	98
Figura 4.10	Imagen muestra Control Buena a Escala 12000x.....	99
Figura 4.11	Imagen muestra con Mayor Pérdida de material a Escala 1000x.....	99
Figura 4.12	Imagen muestra con Mayor Pérdida de material a Escala 5000x.....	100
Figura 4.13	Imagen muestra con Mayor Pérdida de material a Escala 12000x.....	100

Figura 4.14	Imagen muestra Control Mala a Escala 1000x.....	101
Figura 4.15	Imagen muestra Control Mala a Escala 5000x.....	101
Figura 4.16	Imagen muestra Control Mala a Escala 12000x.....	102
Figura 4.17	Imagen 1ª muestra con daño creciente a Escala 1000x.....	102
Figura 4.18	Imagen 1ª muestra con daño creciente a Escala 5000x.....	103
Figura 4.19	Imagen 1ª muestra con daño creciente a Escala 12000x.....	103
Figura 4.20	Imagen 2ª muestra con daño creciente a Escala 1000x.....	104
Figura 4.21	Imagen 2ª muestra con daño creciente a Escala 5000x.....	104
Figura 4.22	Imagen 2ª muestra con daño creciente a Escala 12000x.....	105
Figura 4.23	Imagen 3ª muestra con daño creciente a Escala 1000x.....	105
Figura 4.24	Imagen 3ª muestra con daño creciente a Escala 5000x.....	106
Figura 4.25	Imagen 3ª muestra con daño creciente a Escala 12000x.....	106
Figura 4.26	Imagen 1ª muestra con daño decreciente a Escala 1000x.....	107
Figura 4.27	Imagen 1ª muestra con daño decreciente a Escala 5000x.....	107
Figura 4.28	Imagen 1ª muestra con daño decreciente a Escala 12000x.....	108
Figura 4.29	Imagen 2ª muestra con daño decreciente a Escala 1000x.....	108
Figura 4.30	Imagen 2ª muestra con daño decreciente a Escala 5000x.....	109
Figura 4.31	Imagen 2ª muestra con daño decreciente a Escala 12000x.....	109
Figura 4.32	Imagen 2ª muestra con daño decreciente a Escala 23000x.....	110
Figura 4.33	Imagen 3ª muestra con daño decreciente a Escala 1000x.....	110
Figura 4.34	Imagen 3ª muestra con daño decreciente a Escala 5000x.....	111
Figura 4.35	Imagen 3ª muestra con daño decreciente a Escala 12000x.....	111
Figura 4.36	Microanálisis Muestra con Menor Pérdida de material.....	112
Figura 4.37	Linescan de Muestra con Menor Pérdida de material.....	112
Figura 4.38	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de Muestra con Menor Pérdida de material.....	113
Figura 4.39	Microanálisis Muestra Control Buena.....	114
Figura 4.40	Linescan de Muestra Control Buena.....	114
Figura 4.41	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de Muestra Control Buena.....	115
Figura 4.42	Microanálisis Muestra con Mayor Pérdida de material.....	116
Figura 4.43	Linescan de Muestra con Mayor Pérdida de material.....	116
Figura 4.44	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de Muestra con Mayor Pérdida de material.....	117
Figura 4.45	Microanálisis Muestra Control Mala.....	118
Figura 4.46	Linescan de Muestra Control Mala.....	118

Figura 4.47	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de Muestra Control Mala.....	119
Figura 4.48	Microanálisis de 1ª Muestra con Daño Creciente.....	120
Figura 4.49	Linescan de 1ª Muestra con Daño Creciente.....	120
Figura 4.50	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de 1ª Muestra con Daño Creciente.....	121
Figura 4.51	Microanálisis de 2ª Muestra con Daño Creciente.....	122
Figura 4.52	Linescan de 2ª Muestra con Daño Creciente.....	122
Figura 4.53	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de 2ª Muestra con Daño Creciente.....	123
Figura 4.54	Microanálisis de 3ª Muestra con Daño Creciente.....	124
Figura 4.55	Linescan de 3ª Muestra con Daño Creciente.....	124
Figura 4.56	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de 3ª Muestra con Daño Creciente.....	125
Figura 4.57	Microanálisis de 1ª Muestra con Daño Decreciente.....	126
Figura 4.58	Linescan de 1ª Muestra con Daño Decreciente.....	126
Figura 4.59	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de 1ª Muestra con Daño Decreciente.....	127
Figura 4.60	Microanálisis de 2ª Muestra con Daño Decreciente.....	128
Figura 4.61	Linescan de 2ª Muestra con Daño Decreciente.....	128
Figura 4.62	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de 2ª Muestra con Daño Decreciente.....	129
Figura 4.63	Microanálisis de 3ª Muestra con Daño Decreciente.....	130
Figura 4.64	Linescan de 3ª Muestra con Daño Decreciente.....	130
Figura 4.65	Distribución Mapping elementos químicos en la superficie de 3ª Muestra con Daño Decreciente.....	131
Figura 4.66	Fotografías SEM de Silicato de Calcio Hidratado e Hidróxido de Calcio.....	138

ANEXO A: Descripción de Ensayos realizados a los áridos utilizados.

Figura A.1	Tamizado del árido en una serie de mallas.....	159
-------------------	--	-----

ANEXO D: Resultados obtenidos para Sulfato de Sodio.

Figura D.1	Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena” con un aumento de 1000x.....	180
-------------------	---	-----

Figura D.2	Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena” con un aumento de 5000x.....	180
Figura D.3	Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena” con un aumento de 12000x.....	180
Figura D.4	Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 1000x.....	181
Figura D.5	Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 5000x.....	181
Figura D.6	Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 12000x.....	181

INDICE DE GRAFICOS

Temario: _____ **Página.**

CAPÍTULO III: ENSAYO DE INMERSIÓN EN SULFATO DE MAGNESIO.

Gráfico 3.1	Gráfico Diferencia de Peso seco (%) entre T0 y T1.....	74
Gráfico 3.2	Gráfico Diferencia de Peso seco (%) entre T0 y T2.....	74
Gráfico 3.3	Gráfico Diferencia de Peso seco (%) entre T0 y T3.....	75
Gráfico 3.4	Gráfico Diferencia de Peso seco (%) entre T0 y T4.....	75
Gráfico 3.5	Gráfico Diferencia de Peso seco (%) entre T0 y T5.....	76
Gráfico 3.6	Gráfico Diferencia de Peso seco (%) entre T0 y T6.....	76
Gráfico 3.7	Gráfico comparación de resultados para A/C 0.55 en relación a la diferencia de Peso seco (%) para todos los tiempos desde T1 a T6.....	77
Gráfico 3.8	Gráfico comparación de resultados para A/C 0.65 en relación a la diferencia de Peso seco (%) para todos los tiempos desde T1 a T6.....	77
Gráfico 3.9	Gráfico comparación de resultados para 0% de adición de Nanosílice en relación a las razones de agua-cemento utilizadas.....	78
Gráfico 3.10	Gráfico comparación de resultados para 0.5% de adición de Nanosílice en relación a las razones de agua-cemento utilizadas.....	78
Gráfico 3.11	Gráfico comparación de resultados para 1 % de adición de Nanosílice en relación a las razones de agua-cemento utilizadas.....	79
Gráfico 3.12	Gráfico comparación de resultados para 1.5 % de adición de Nanosílice en relación a las razones de agua-cemento utilizadas.....	79
Gráfico 3.13	Curvas valores de pH para ambas razones de A/C.....	90

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

Gráfico 4.1	Selección de Muestras con Daño Creciente para hacer estudio SEM.....	134
Gráfico 4.2	Selección de Muestras con Daño Decreciente para hacer estudio SEM.....	135
Gráfico 4.3	Distribución porcentual de Elementos Químicos en Muestra Control Buena, en base a resultados obtenidos mediante EDAX.....	142

Gráfico 4.4	Distribución porcentual de Elementos Químicos en Muestra Control Mala, en base a resultados obtenidos mediante EDAX.....	142
Gráfico 4.5	Distribución porcentual de Elementos Químicos en Muestra con Menor pérdida de material, en base a resultados obtenidos mediante EDAX.....	143
Gráfico 4.6	Distribución porcentual de Elementos Químicos en Muestra con Mayor pérdida de material, en base a resultados obtenidos mediante EDAX.....	143
Gráfico 4.7	Curvas de Evolución de Elementos químicos característicos en Intervalo Daño Creciente.....	144
Gráfico 4.8	Curvas de Evolución de Elementos químicos característicos en Intervalo Daño Decreciente.....	145

CAPÍTULO V: COMPARACIÓN CON RESULTADOS OBTENIDOS EN INVESTIGACIÓN PRECEDENTE PARA SULFATO DE SODIO.

Gráfico 5.1	Curvas valores de pH para ambas razones de A/C, en soluciones de Sulfato de Sodio.....	150
Gráfico 5.2	Curvas valores de pH para ambas razones de A/C, en soluciones de Sulfato de Magnesio.....	151

INDICE DE TABLAS

Temario: _____ **Página.**

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

Tabla 2.1	Componentes principales del cemento.....	10
Tabla 2.2	Productos de hidratación del cemento.....	16
Tabla 2.3	Diferencias entre nanosílice y microsílice.....	34
Tabla 2.4	Requisitos para hormigones expuestos a soluciones que contienen sulfatos.....	40

CAPÍTULO III: ENSAYO DE INMERSIÓN EN SULFATO DE MAGNESIO.

Tabla 3.1	Resultados de granulometría de la arena ensayada.....	55
Tabla 3.2	Tipos granulométricos de arena.....	56
Tabla 3.3	Determinación de la dosis de agua y aire (l/m^3) del mortero.....	60
Tabla 3.4	Dosificación para 8 probetas de mortero A/C 0.55.....	63
Tabla 3.5	Dosificación para 8 probetas de mortero A/C 0.65.....	63
Tabla 3.6	Nanosílice adicionada.....	63
Tabla 3.7	Utilización de los 64 discos de morteros con adiciones de nanosílice.....	67
Tabla 3.8	Cantidad de días correspondientes a cada tiempo de extracción.....	71
Tabla 3.9	Tiempos utilizados en Análisis de probetas de mortero con adiciones de Nanosílice, en un medio de Sulfato de Sodio.....	71
Tabla 3.10	Resumen de resultados Ensayo de Inmersión.....	87
Tabla 3.11	Registro de valores de pH probetas razón A/C 0.55.....	89
Tabla 3.12	Registro de valores de pH probetas razón A/C 0.65.....	89

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

Tabla 4.1	Muestras con menor y mayor pérdida de material y sus respectivas controles que serán analizadas mediante SEM.....	95
------------------	---	----

Tabla 4.2	Grupo de muestras con daño creciente que serán analizadas mediante SEM.....	95
Tabla 4.3	Grupo de muestras con daño decreciente que serán analizadas mediante SEM.....	95
Tabla 4.4	Comparación de valores de porcentaje de peso de los elementos químicos presentes en Muestra Control Buena y Control Mala.....	137
Tabla 4.5	Comparación de Registro de valores de porcentaje de peso de los elementos químicos presentes en Muestra con Menor pérdida de material y su respectiva Muestra Control.....	139
Tabla 4.6	Comparación de Registro de valores de porcentaje de peso de los Elementos químicos presentes en Muestra con Mayor pérdida de material y su respectiva Muestra Control.....	140
Tabla 4.7	Comparación de Registro de valores de porcentaje de peso de los Elementos químicos presentes en Muestras con menor y mayor pérdida de material.....	141
Tabla 4.8	Comparación de Registro de valores de porcentaje de peso de los elementos químicos presentes en el Grupo de Muestras con Daño Creciente.....	144
Tabla 4.9	Comparación de Registro de valores de porcentaje de peso de los elementos químicos presentes en el Grupo de Muestras con Daño Decreciente.....	145

CAPÍTULO V: COMPARACIÓN CON RESULTADOS OBTENIDOS EN INVESTIGACIÓN PRECEDENTE PARA SULFATO DE SODIO.

Tabla 5.1	Resumen de resultados Ensayo de Inmersión en Sulfato de Sodio.....	149
Tabla 5.2	Resumen de resultados Ensayo de Inmersión en Sulfato de Magnesio..	150

ANEXO A: Descripción de Ensayos realizados a los áridos utilizados.

Tabla A.1	Tamaños nominales de abertura de tamices.....	160
Tabla A.2	Tamaño mínimo de la muestra.....	161
Tabla A.3	Tamaño mínimo de la muestra de ensayo.....	165
Tabla A.4	Porcentajes permitidos de material fino menor a 0.08mm.....	166

ANEXO B: Registro de pesos secos y disminuciones porcentuales, de probetas de mortero con adición de Nanosílice ante ataque de Sulfato de Magnesio.

Tabla B.1	Registro de peso seco de probetas T1 previo a ensayo de inmersión....	170
Tabla B.2	Registro de peso seco de probetas T2 previo a ensayo de inmersión....	170
Tabla B.3	Registro de peso seco de probetas T3 previo a ensayo de inmersión....	170
Tabla B.4	Registro de peso seco de probetas T4 previo a ensayo de inmersión....	171
Tabla B.5	Registro de peso seco de probetas T5 previo a ensayo de inmersión....	171
Tabla B.6	Registro de peso seco de probetas T6 previo a ensayo de inmersión....	171
Tabla B.7	Registro de peso seco de probetas de control que no son sometidas a ensayo.....	171
Tabla B.8	Registro de peso seco de probetas T1 posterior a ensayo de inmersión.....	172
Tabla B.9	Disminución porcentual de peso seco de probetas T1 posterior a ensayo de inmersión.....	172
Tabla B.10	Registro de peso seco de probetas T2 posterior a ensayo de inmersión.....	172
Tabla B.11	Disminución porcentual de peso seco de probetas T2 posterior a ensayo de inmersión.....	173
Tabla B.12	Registro de peso seco de probetas T3 posterior a ensayo de inmersión.....	173
Tabla B.13	Disminución porcentual de peso seco de probetas T3 posterior a ensayo de inmersión.....	173
Tabla B.14	Registro de peso seco de probetas T4 posterior a ensayo de inmersión.....	174
Tabla B.15	Disminución porcentual de peso seco de probetas T4 posterior a ensayo de inmersión.....	174
Tabla B.16	Registro de peso seco de probetas T5 posterior a ensayo de inmersión.....	174
Tabla B.17	Disminución porcentual de peso seco de probetas T5 posterior a ensayo de inmersión.....	175
Tabla B.18	Registro de peso seco de probetas T6 posterior a ensayo de inmersión.....	175
Tabla B.19	Disminución porcentual de peso seco de probetas T6 posterior a ensayo de inmersión.....	175

ANEXO C: Concentración de moles de Magnesio

Tabla C.1 Cantidad de moles de Magnesio probetas razón A/C 0.55.....178

Tabla C.2 Cantidad de moles de Magnesio probetas razón A/C 0.65.....178

ANEXO D: Resultados obtenidos para Sulfato de Sodio.

Tabla D.1 Disminución de peso seco de probetas T1 (13días), posterior a ensayo de inmersión en Sulfato de Sodio.....179

Tabla D.2 Disminución de peso seco de probetas T2 (26 días), posterior a ensayo de inmersión en Sulfato de Sodio.....179

Tabla D.3 Disminución de peso seco de probetas T3 (39 días), posterior a ensayo de inmersión en Sulfato de Sodio.....179

RESUMEN

El presente trabajo está inmerso en los últimos avances de la ciencia en el área de la nanotecnología, considerando una de sus múltiples aplicaciones. En este caso la de los materiales de la construcción, específicamente el hormigón, que es ampliamente utilizado en las obras de ingeniería de nuestro país.

De esta manera este proyecto de investigación titulado: “Comportamiento del Hormigón que tiene entre sus componentes moléculas de nanosílice, ante el ataque químico de Sulfato de Magnesio”, está dividido en las siguientes partes:

En una primera parte se da a conocer en que consiste básicamente la Nanotecnología y los aportes y beneficios que se han conocido hasta ahora.

Luego, gracias a una exhaustiva revisión bibliográfica, se explican los conceptos teóricos involucrados, que son muy importantes para la comprensión del tema en desarrollo, como son por ejemplo la definición de los nanomateriales, los ataques químicos al concreto y como actúa el sulfato de magnesio, entre otros.

Para finalmente dar paso a la fase de experimentación, de la cual mediante ensayos de laboratorio y su posterior análisis e interpretación de resultados, se esperan obtener las conclusiones de la investigación.

SUMMARY

The present work is immersed in the latest science advances in the Nanotechnology field, considering one of its multiple applications. In this case, one of the construction materials, specifically the concrete, which is widely used in engineer installations of our country.

In this way, this research project headline is presented as: "Concrete Behavior with nanosilice molecules among its components, exposed to the Magnesium Sulphate chemical attack", is divided into the following parts:

First of all, Nanotechnology is basically explained what it consists of. And then, its contributions and benefits presented that have been known up to now.

So, thanks to an exhaustive bibliographical revision, the involved theoretical concepts are explained. They are very important for the understanding of the developing theme. For example, the nanomaterials definition, the chemical attacks to the concrete, and how sulphate of magnesium acts, among other concepts.

Finally, to go into the experimentation phase, by means of laboratory tests and their further analysis and interpretation of results, research conclusions are wanted to be obtained.

BIBLIOGRAFÍA

ABRASINTER. 2007. Compuestos de Magnesio. Sulfato de Magnesio. (Disponible en: <http://www.abrasinter.com/page17.html>. Consultado el: 28 de Noviembre de 2007).

AGUILAR, R. 2007. Determinación de la influencia de las nanomoléculas de Sílice en el Concreto frente a un factor que afecta su durabilidad. Tesis. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Ciencias de la Ingeniería. 132p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). 2001. Guía para la durabilidad del hormigón. Reporte ACI Comité 201.2R. Estados Unidos. 59p.

AZONANO. 2007. The A to Z of Nanotechnology. (Disponible en: <http://www.azozano.com/nanotechnology.asp>. Consultado el: 2 de Septiembre de 2007).

BECKER, E. 2001. "Cemento Pórtland – Características y Recomendaciones de Uso", Seminario sobre Cemento Pórtland y Patología del Hormigón (Disponible en: <http://www.lomanegra.com.ar>. Consultado el: 12 de Junio de 2008).

BOJORQUE, I; J. ACEVEDO; R. VALERA. 2007. Microscopía electrónica para el estudio del Na_2SiO_4 en la durabilidad de un compuesto a base de cemento Pórtland y refuerzo de caoba. Revista Ingeniería de Construcción. 22 (3): 165-172.

CÁRCAMO, L. 2006. Revisión, análisis y aplicación de la Nanotecnología en la generación y mejora de materiales constructivos. Estudio de Morteros de cemento con adiciones de Nanosílice. Tesis. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Ciencias de la Ingeniería. 205p.

CZERNIN, W. 1963. La Química del Cemento. Barcelona, España. Ediciones Palestra. 167 p.

EURORESIDENTES. 2006. Diccionario de nanociencia: Nanomateriales / Nanomaterials. España. (Disponible en: <http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/diccionario/nanomateriales.htm>. Consultado el: 2 de Septiembre de 2007).

HERSAM, M. 2006. Advances in nanomaterials. American Ceramic Society Bulletin. 85 (11): 14-15.

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA. Proceso expansivos del hormigón: Ensayos Árido –Álcali, Ataque por sulfatos y ataque por hielo-deshielo. Sistemas de prevención y actuaciones. Madrid, España. 13p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN).1979. Norma Chilena Oficial NCh 163 Of.79: “Áridos para morteros y hormigones- Requisitos generales”. Santiago, Chile.23 p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN).1982. Norma Chilena Oficial NCh 164 Of.76: “Áridos para morteros y hormigones - Extracción y preparación de muestras”. Santiago, Chile.11 p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 1982. Norma Chilena Oficial NCh 165 Of.77: “Áridos para morteros y hormigones- tamizado y determinación de granulometría” .Santiago, Chile. 21 p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN).1952. Norma Chilena Oficial NCh 166 Of.52: “Determinación colorimétrica de la presencia de impurezas orgánicas en las arenas para hormigones”. Santiago, Chile.3 p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN).1979. Norma Chilena Oficial NCh 1223 Of.77: “Áridos para morteros y hormigones – Determinación del material fino menor a 0.080mm”. Santiago, Chile.4 p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN).1979. Norma Chilena Oficial NCh 1239 Of.77: “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta de agua en las arenas”. Santiago, Chile.7 p.

JACKSON, N; R. DHIR. 1996. Civil Engineering Materials. 5 ed. Estados Unidos, Taylor & Francis. 534p.

JOHANSEN, V; W. KLEMM; P. TAYLOR. 2002. ¿Por qué la química interesa en el hormigón? Adaptación del Artículo publicado en ACI Concrete International, de marzo de 2002. (Disponible en: www.icpa.org.ar/files/aciquim.doc. Consultado el 17 de diciembre de 2007).

MARTÍN, A. 2007. La Nanotecnología: la nueva revolución que nos espera "ahí abajo". (Disponible en: <http://www.laflecha.net/canales/ciencia/articulos/la-nanotecnologia-la-nueva-revolucion-que-nos-espera-ahi-abajo>. Consultado el: 2 de Septiembre de 2007).

MARTÍN, E. 2003. Ataque al hormigón por sulfatos y agua de mar: precauciones y recomendaciones. (Disponible en: <http://www.cementosrezola.com/Documentos/DocPublicaciones/Cementos%20sulforresistentes.pdf>. Consultado el: 12 de octubre de 2007).

MURPHY, P; P. DOHERTY. 2007. Think Small. Fantasy & Science Fiction. 112(5): 118-128.

PRASAD, J; D. K. JAIN; A. K. AHUJA. 2006. Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing). 7(3): 259-268.

RESTREPO, O; J. TOBÓN; J. PAYÁ. 2007. Adición de Nanopartículas al Cemento Pórtland. DYNA (Colombia). 74 (152): 277-291.

ROMERO, S. 2007 Nueva tecnología para producir 'nanoestructuras'. España. (Disponible en: <http://www.laflecha.net/canales/ciencia/200412031/>. Consultado el: 2 de Septiembre de 2007).

SOLÍS, L. 2007. Gobierno da primer espaldarazo al desarrollo de la nanotecnología en Chile. Santiago. (Disponible en: http://www.chilepotenciaalimentaria.cl/content/view/1928/Gobierno_da_primer_espaldarazo_al_desarrollo_de_la_nanotecnologia_en_Chile.html. Consultado el: 26 de Agosto de 2007).

SHETTY, M.S. 2005. Concrete Technology ; Theory and Practice. 5 ed. New Dehli, S.Chand & Company Ltd. 625p.

THE OFICIAL WEB SITE OF THE NOBEL FOUNDATION. 2007. The Nobel Prize in Physics 2007. Suecia. (Disponible en: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/press.html. Consultado el: 12 de Octubre de 2007).

THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. 2004. Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. Londres. (Disponible en www.nanotec.org.uk/finalReport.htm. Consultado el: 24 de Agosto de 2007).

ULMEN. 2007. GAIA Nanosílice. Divulgación general en Chile. La llegada de los nanomateriales al concreto. Santiago. (Disponible en: [http://www.ulmen.cl/Gaia%20Nanosilice.%20Divulgacion%20general%20\(Chile\).%20La%20llegada%20de%20los%20nanomateriales%20al%20concreto.pdf](http://www.ulmen.cl/Gaia%20Nanosilice.%20Divulgacion%20general%20(Chile).%20La%20llegada%20de%20los%20nanomateriales%20al%20concreto.pdf). Consultado el: 9 de Septiembre de 2007).

VARGAS, P; I. ORTIZ; V. ROJAS. 2006. Vigilancia Tecnológica aplicada a Nanociencia y Nanotecnología en países de Latinoamérica. Journal of Technology Management & Innovation, Universidad de Talca. 1(4): 83 – 94.

WADDEL, J; J. DOBROWOLSKI. 1997. Manual de la Construcción con Concreto. 3 ed. Estados Unidos .Mc Graw Hill.437p. Tomo I.

ANEXOS

ANEXO A: Descripción de Ensayos realizados a los áridos utilizados.

a) Ensayo de Granulometría, según NCh 165 Of.77

La granulometría es la determinación más corriente y una de las más importantes que se realizan a un árido; y representa la distribución de los tamaños que posee el árido. La granulometría está directamente relacionada con las características de manejabilidad del hormigón fresco, la demanda de agua, la compactación y la resistencia mecánica del hormigón endurecido.

Consiste en hacer pasar una muestra de árido seco por una serie de tamices normalizados, pesando el material retenido en cada uno de ellos. Determinando posteriormente el porcentaje de peso retenido y finalmente el porcentaje que pasa en peso, para cada tamiz.

La granulometría de los áridos se determina haciendo pasar una muestra representativa del acopio por una serie de tamices ordenado por abertura de mayor a menor.



Figura A.1: Tamizado del árido en una serie de mallas. (Fuente: Elaboración propia)

Los pesos retenidos en cada tamiz se expresan como porcentajes del peso total de la muestra y, finalmente, la granulometría del árido se indica en porcentajes que pasan acumulados.

➤ Juego de tamices:

El juego de tamices se elegirá de acuerdo al material a ensayar y será dispuesto en orden decreciente de abertura y provisto de tapa y recipiente receptor del residuo. Los tamices deben estar limpios y secos.

La Norma Chilena determina una serie de tamices cuya abertura esta expresada en milímetros. Existe la Serie Preferida y además la Serie Complementaria que corresponde a aberturas intermedias de las de la serie preferida entre 80mm y 5mm (fracción gruesa). Al no existir tamices fabricados con las aberturas de la serie preferida, se acepta usar tamices ASTM correspondientes y a esta serie se le denomina Serie Provisoria. Los tamices son de alambre y abertura cuadrada, de tamaños nominales como se indica en la siguiente tabla:

Tabla A.1: Tamaños nominales de abertura de tamices.

Serie Preferida (mm)	Serie Complementaria (mm)	Serie Provisoria (mm)
-	125	-
-	100	-
80	-	75
-	63	-
-	50	-
40	-	38.1
-	31.5	-
-	25	-
20	-	19
-	16	-
-	12.5	-
10	-	9.5
-	8	-
-	6.3	-
5	-	4.75
2.5	-	2.36
1.25	-	1.18
0.630	-	0.600
0.315	-	0.300
0.160	-	0.150

Fuente: Elaboración propia.

➤ Tamaño de la muestra.

En el caso de la arena, el tamaño mínimo de la muestra depende del porcentaje retenido de la misma en el tamiz de 5mm.

Tabla A.2: Tamaño mínimo de la muestra.

Característica de la arena		
Tamiz	% Retenido	Masa mínima de la muestra
5 mm	> 15	Ver nota
5 mm	≤ 15	500 g
2,5 mm	≥ 5	100 g

Fuente: INN

Nota: Cuando una arena contenga una fracción de grava superior a 15%, el material debe separarse por el tamiz de 5 mm determinando el porcentaje en masa de cada fracción. Las fracciones se tratarán como una arena y una grava por separado.

➤ Materiales.

- Balanza de precisión
- Juego de tamices
- Depósito receptor
- Tapa
- Estufa
- Herramientas (Espátula, Pala, Palangana, Bandejas, etc.)

➤ Acondicionamiento de Muestra de Ensayo.

- Homogeneizar muestra en estado húmedo.
- Reducir por cuarteo, como se trata sólo de arena se hace con pala.
- Secar la muestra se seca hasta masa constante en estufa a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

➤ Procedimiento.

- Se determina la masa de una muestra de ensayo en estado seco, aproximando a 1 g para el caso de arenas.
- Se vacía en el juego de tamices. Se cumple el ciclo de tamizado.
- Se registra la masa retenida en cada tamiz y en el recipiente receptor con la aproximación de 1 g o a lo menos 0,1% de la pesada.
- Se calcula la masa total o suma de las fracciones retenidas en todos los tamices y en recipiente receptor, la que no debe diferir con la masa de la muestra de ensayo en más de 3% para las arenas y de 0,5% para las gravas. En caso que no se cumpla este requisito se rechaza el ensayo y se debe repetir con una muestra gemela.
- Se calcula el porcentaje parcial retenido en cada tamiz y en el recipiente receptor, con respecto a la masa total de las fracciones retenidas, aproximando al 1 %.
- Se expresa la granulometría como el porcentaje acumulado que pasa, en el que se indica como primer resultado el del menor tamiz en que pasa el 100% y como último resultado, el del primer tamiz en que pasa el 0%.

➤ Cálculo de Módulo de Finura de las Arenas

El módulo de finura es el valor correspondiente a la centésima parte de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie preferida. Se calcula tanto para arenas como para gravas o áridos totales. Cuanto mayor es el módulo de finura más grueso es el material. El módulo de finura también se puede apreciar en la granulometría.

En una arena se pueden presentar dos casos:

- 1) Que en el tamiz de 5mm quede retenido 0% (o que el 100% pase). Es el caso de las arenas que cumplen con las especificaciones granulométricas.
- 2) Que en el tamiz de 5mm quede retenido un cierto porcentaje (o que pase menos del 100%). Es el caso corriente de las arenas nacionales que no cumplen con las especificaciones granulométricas, debido al porcentaje de sobretamaño en 5mm que contienen.

Para el caso de las arenas sólo se consideran los siguientes tamices: N°s 4, 8, 16, 30, 50, 100 y las formulas quedan:

- Cuando pasa el 100% en malla N° 4:

$$MF = \frac{\sum \% \text{Ret.Acumulados}}{100}$$

$$MF = 6 - \frac{\sum \% \text{Que.Pasa}}{100}$$

- Cuando pasa menos de un 100% en malla N° 4:

$$MF = 6 - \frac{\sum \% \text{Que.Pasa}}{\% \text{QuePasa.en.Malla.N}^\circ 4}$$

b) Determinación colorimétrica de la presencia de impurezas orgánicas en las arenas para hormigones, según NCh 166 Of.77

El ensayo consiste en colocar una muestra de arena en un envase que contiene una solución de hidróxido de sodio al 3%, la que de después de 24 horas de reposo en un estado de oscuridad adoptará un color que posteriormente deberá ser comparado con un patrón colorimétrico.

➤ Impurezas Orgánicas.

La presencia de impurezas orgánicas en un árido puede modificar las reacciones químicas del cemento con el agua, alterando el correcto fraguado y retardar endurecimiento.

Las impurezas orgánicas tales como arcilla o una cantidad excesiva de finos puede ser un factor de contaminación y usualmente requieren más agua y cemento resultando una mezcla más costosa y con mayor probabilidad de agrietamientos al secarse.

➤ Reactivos.

El ácido tánico empleado en la preparación de la solución tipo deberá cumplir una serie de condiciones en cuanto a enturbamiento, limpieza, pérdida, de peso por calentamiento y peso de cenizas por calcinación.

Se prepara una solución de hidróxido de sodio al 3% disolviendo 30 g de hidróxido de sodio en 970 g de agua destilada.

➤ Procedimiento.

- Se selecciona una muestra según norma NCh 166.
- Se pesan 200 grs. de arena y se colocan en un frasco que contiene 100cc de una solución de hidróxido de sodio al 3 %.
- Se agita y deja reposar durante 24 horas en un lugar sin luz.
- Cumplido el tiempo se compara el color tomado por la solución con el patrón de colores.

➤ Resultado del ensayo.

El resultado del ensayo se expresa como presencia de impurezas orgánicas o no presencia de impurezas orgánicas (no apta o apta), cuando la coloración de la muestra tratada es más o es menos intensa que la solución tipo.

c) Porcentaje de material fino menor a 0.080mm, según NCh 1223 Of.77

El material fino menor que 0.08 mm también se denomina material fino menor que malla Nº 200, esta fracción de material se conoce generalmente como arcilla, la que recubre las partículas formando una película que desmejora la adherencia entre el cemento y el árido afectando la resistencia del hormigón.

Además se obtienen hormigones fisurables y de baja resistencia a la abrasión.

Por otro parte un exceso de finos bajo malla Nº 200 representa algunas ventajas como mejorar en forma significativa la trabajabilidad y la impermeabilidad, además de ayudar a tener una mejor terminación superficial.

➤ Materiales.

- Balanza de precisión
- Tamices
- Recipiente para lavado
- Tapa
- Estufa
- Herramientas (espátula, brocha, recipientes para pesaje y secado etc.)

➤ Acondicionamiento de Muestra de Ensayo.

- Homogeneizar muestra en estado húmedo.
- Reducir por cuarteo, como se trata sólo de arena se hace con pala.
- Secar la muestra se seca hasta masa constante en estufa a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

➤ Tamaño de la muestra.

La muestra de ensayo debe tener una masa ligeramente mayor a los valores que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla A.3: Tamaño mínimo de la muestra de ensayo.

Tamaño máximo nominal del árido, mm	Masa mínima de la muestra seca, g
40 o más	5000
20	2500
10	2000
5	500
2,5	100

Fuente: INN.

➤ Procedimiento.

- Se seca la muestra en estufa.
- Se determina y registra la masa inicial de la muestra de ensayo en estado seco (antes de ser lavada).
- Se coloca la muestra en un recipiente de lavado y se agrega agua cubriéndola.
- Se agita la muestra en el agua de modo de separar el material más fino, dejándolo en suspensión.

- Se vacía el agua con el material más fino en suspensión a través de los tamices dispuestos de mayor a menor (1,25 y 0.08 mm).
- Se agrega tantas veces agua y se repite tantas veces la operación como sea necesaria, hasta que el agua con la muestra permanezca limpia y clara.
- Se reúne el material retenido en ambos tamices con la muestra ya lavada.
- Se seca el material reunido hasta masa constante a 110° C.
- Se pesa y se registra la masa lavada y seca.
- Se procede a calcular el material fino inferior a 0.08 mm según la fórmula.

➤ Cálculo.

El resultado del ensayo se expresa en porcentaje y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$A = \frac{B - C}{B} \cdot 100(\%)$$

En que:

A= Contenido de material fino inferior a 0.080 mm (%)

B= Masa inicial de la muestra de ensayo seca (grs.)

C= Masa de la muestra de ensayo lavada y seca (grs.)

➤ Aceptación del árido.

La norma NCh 163 establece los límites que se deben cumplir:

Tabla A.4: Porcentajes permitidos de material fino menor a 0.08mm.

Tipo de Hormigón	%máx.	%máx.
	Gravas	Arenas
Hormigón sometido a desgaste	0.5	2
Para todo hormigón	1	5

Fuente: INN.

d) Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las arenas, según NCh 1239 Of. 77.

El tamaño, cantidad y naturaleza de los poros afectan la resistencia del árido y están relacionados con la absorción de agua y con la permeabilidad.

La absorción de agua influye por tanto en la resistencia del hormigón a los ciclos de hielo-deshielo, a los ataques químicos y la abrasión, en suma, en su durabilidad.

El contenido total de humedad interna de un árido en condición saturado superficialmente seco se expresa como absorción y es una medida de la porosidad.

➤ Materiales.

- Balanza de precisión
- Estufa
- Recipientes
- Matraz aforado
- Molde tronco-cónico
- Pisón

➤ Acondicionamiento de Muestra de Ensayo.

Si la muestra de laboratorio contiene un porcentaje igual o inferior a 15% de material retenido en el tamiz de 5 mm, se eliminará dicha fracción retenida, ya la fracción que pasa se le aplicará el procedimiento. Si el porcentaje es superior al 15% se separará en dos fracciones por el tamiz de 5 mm y se determinará por separado cada fracción. En este caso los resultados se expresarán como el promedio ponderado de las densidades real y neta y absorción de agua correspondiente a ambas fracciones.

- La muestra humedecida se reduce por cuarteo a una cantidad de árido aproximado del doble del tamaño de muestra requerida (aproximadamente 1 kg.)

- Se seca el árido en estufa.

- Se sumerge el árido en agua por 24 horas \pm 4 horas. La inmersión puede ser eliminada si las partículas se han mantenido con su superficie húmeda durante más de 24 horas previas al ensayo y si se sabe que el material completa su saturación en este plazo.

- Se extiende el árido en una superficie lisa expuesta a una corriente suave de aire caliente, revolviéndolo en forma constante hasta que el árido alcance la condición suelta.

- Se coloca el molde tronco - cónico firme contra una superficie lisa y no absorbente, se llena con árido en condición suelta y se compacta suavemente con 25 golpes de pisón.

- Se levanta el molde verticalmente. Si hay humedad libre el cono de arena conserva su forma. Se continúa el secado y se repite la operación a intervalos frecuentes hasta que el cono se asiente según su talud natural. Esto significa que la arena ha alcanzado la condición de saturada superficialmente seca.

➤ Tamaño de la muestra.

Se necesita para el ensayo una cantidad de arena superior a 50 g. e inferior a 500g.

➤ Procedimiento.

- Previamente conviene conocer la tara de cada matraz de laboratorio para evitar medirla durante el ensayo. Para esto se llena el matraz con agua a una temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta la marca de calibración. Se mide y registra la masa del matraz más el agua (Ma).

- Se mide y registra la masa de la muestra de ensayo en condición saturada superficialmente seca (msss).

- Se coloca la muestra en el matraz y se llena con agua a una temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ casi hasta la marca de calibración.

- Se agita el matraz para eliminar las burbujas de aire golpeándolo contra la palma de la mano.

- Se deja reposar por una hora cuidando de que se mantenga a temperatura constante.

- Se llena con agua a $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta la marca de calibración, se agita y se deja reposar nuevamente.

- Se mide y registra la masa total del matraz más la muestra de ensayo y el agua (Mm).

- Se saca la muestra del matraz evitando las pérdidas de material y se seca en estufa a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Se deja enfriar a temperatura ambiente. Se mide y registra la masa de la muestra de ensayo en condición seca (ms).

➤ Cálculos.

Simbología:

ρ = Densidad

m_s = Masa de la muestra seca, g.

m_{sss} = Masa de la muestra saturada superficialmente seca, g.

M_a = Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración, g.

M_m = Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración, g.

Densidad real del árido saturado superficialmente seco (ρ_{Rsss}) :

$$\rho_{Rsss} = \frac{m_{sss}}{M_a + m_{sss} - M_m} \cdot 1000 \text{ kg / m}^3$$

Densidad real del árido seco (ρ_{Rs}) :

$$\rho_{Rs} = \frac{m_s}{M_a + m_{sss} - M_m} \cdot 1000 \text{ kg / m}^3$$

Densidad neta (ρ_N):

$$\rho_N = \frac{m_s}{M_a + m_s - M_n} \cdot 1000 \text{ kg / m}^3$$

Absorción de agua (α):

$$\alpha = \frac{m_{sss} - m_s}{m_s} \cdot 100\%$$

➤ Aceptación del árido.

Los datos de densidades se calculan para ser utilizados en la dosificación del mortero y en cuanto a la absorción de agua, ésta tiene un límite de 3 % para el caso de las arenas, según lo establecido en la NCh 163 Of.79.

ANEXO B: Registro de pesos secos y disminuciones porcentuales, de probetas de mortero con adición de Nanosílice ante ataque de Sulfato de Magnesio.

a) Pesos secos de discos de mortero previo a ensayo de inmersión.

Tabla B.1: Registro de peso seco de probetas T1 previo a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T1	21.764
A/C 0.55 – 0.5%- T1	20.881
A/C 0.55 – 1 % - T1	22.044
A/C 0.55 – 1.5%- T1	22.281
A/C 0.65 – 0 % - T1	20.545
A/C 0.65 – 0.5%- T1	22.151
A/C 0.65 – 1 % - T1	21.329
A/C 0.65 – 1.5%- T1	21.361

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.2: Registro de peso seco de probetas T2 previo a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T2	21.309
A/C 0.55 – 0.5%- T2	21.494
A/C 0.55 – 1 % - T2	20.537
A/C 0.55 – 1.5%- T2	21.265
A/C 0.65 – 0 % - T2	21.557
A/C 0.65 – 0.5%- T2	21.095
A/C 0.65 – 1 % - T2	20.382
A/C 0.65 – 1.5%- T2	21.612

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.3: Registro de peso seco de probetas T3 previo a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T3	20.678
A/C 0.55 – 0.5%- T3	20.553
A/C 0.55 – 1 % - T3	21.957
A/C 0.55 – 1.5%- T3	21.633
A/C 0.65 – 0 % - T3	20.470
A/C 0.65 – 0.5%- T3	21.551
A/C 0.65 – 1 % - T3	21.152
A/C 0.65 – 1.5%- T3	22.176

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.4: Registro de peso seco de probetas T4 previo a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T4	20.521
A/C 0.55 – 0.5%- T4	21.209
A/C 0.55 – 1 % - T4	20.775
A/C 0.55 – 1.5%- T4	21.137
A/C 0.65 – 0 % - T4	21.758
A/C 0.65 – 0.5%- T4	21.726
A/C 0.65 – 1 % - T4	21.375
A/C 0.65 – 1.5%- T4	21.117

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.5: Registro de peso seco de probetas T5 previo a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T5	20.773
A/C 0.55 – 0.5%- T5	21.223
A/C 0.55 – 1 % - T5	20.977
A/C 0.55 – 1.5%- T5	20.539
A/C 0.65 – 0 % - T5	21.636
A/C 0.65 – 0.5%- T5	21.928
A/C 0.65 – 1 % - T5	21.663
A/C 0.65 – 1.5%- T5	21.563

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.6: Registro de peso seco de probetas T6 previo a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T6	20.823
A/C 0.55 – 0.5%- T6	21.523
A/C 0.55 – 1 % - T6	21.619
A/C 0.55 – 1.5%- T6	21.555
A/C 0.65 – 0 % - T6	20.859
A/C 0.65 – 0.5%- T6	22.013
A/C 0.65 – 1 % - T6	21.105
A/C 0.65 – 1.5%- T6	21.943

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.7: Registro de peso seco de probetas de control que no son sometidas a ensayo.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - Control 1	20.957
A/C 0.55 – 0.5%- Control 2	20.530
A/C 0.55 – 1 % - Control 3	20.630
A/C 0.55 – 1.5%- Control 4	21.528
A/C 0.65 – 0 % - Control 5	20.825
A/C 0.65 – 0.5%- Control 6	20.743
A/C 0.65 – 1 % - Control 7	21.096
A/C 0.65 – 1.5%- Control 8	21.748

Fuente: Elaboración propia.

b) Pesos secos de discos de mortero luego de 7 días de inmersión en solución de Sulfato de Magnesio.

Tabla B.8: Registro de peso seco de probetas T1 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T1	21.708
A/C 0.55 – 0.5%- T1	20.866
A/C 0.55 – 1 % - T1	21.958
A/C 0.55 – 1.5%- T1	22.263
A/C 0.65 – 0 % - T1	20.512
A/C 0.65 – 0.5%- T1	22.085
A/C 0.65 – 1 % - T1	21.285
A/C 0.65 – 1.5%- T1	21.347

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.9: Disminución porcentual de peso seco de probetas T1 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Disminución Peso seco (%)
A/C 0.55 – 0 % - T1	0.257
A/C 0.55 – 0.5%- T1	0.072
A/C 0.55 – 1 % - T1	0.390
A/C 0.55 – 1.5%- T1	0.080
A/C 0.65 – 0 % - T1	0.160
A/C 0.65 – 0.5%- T1	0.298
A/C 0.65 – 1 % - T1	0.210
A/C 0.65 – 1.5%- T1	0.065

Fuente: Elaboración propia.

c) Pesos secos de discos de mortero luego de 14 días de inmersión en solución de Sulfato de Magnesio.

Tabla B.10: Registro de peso seco de probetas T2 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T2	21.240
A/C 0.55 – 0.5%- T2	21.459
A/C 0.55 – 1 % - T2	20.424
A/C 0.55 – 1.5%- T2	21.223
A/C 0.65 – 0 % - T2	21.469
A/C 0.65 – 0.5%- T2	21.137
A/C 0.65 – 1 % - T2	20.257
A/C 0.65 – 1.5%- T2	21.471

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.11: Disminución porcentual de peso seco de probetas T2 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Disminución Peso Seco (%)
A/C 0.55 – 0 % - T2	0.324
A/C 0.55 – 0.5%- T2	0.163
A/C 0.55 – 1 % - T2	0.550
A/C 0.55 – 1.5%- T2	0.198
A/C 0.65 – 0 % - T2	0.408
A/C 0.65 – 0.5%- T2	0.316
A/C 0.65 – 1 % - T2	0.613
A/C 0.65 – 1.5%- T2	0.652

Fuente: Elaboración propia.

d) Pesos secos de discos de mortero luego de 21 días de inmersión en solución de Sulfato de Magnesio.**Tabla B.12:** Registro de peso seco de probetas T3 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T3	20.640
A/C 0.55 – 0.5%- T3	20.512
A/C 0.55 – 1 % - T3	21.832
A/C 0.55 – 1.5%- T3	21.615
A/C 0.65 – 0 % - T3	20.378
A/C 0.65 – 0.5%- T3	21.439
A/C 0.65 – 1 % - T3	21.008
A/C 0.65 – 1.5%- T3	22.027

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.13: Disminución porcentual de peso seco de probetas T3 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Disminución Peso Seco (%)
A/C 0.55 – 0 % - T3	0.184
A/C 0.55 – 0.5%- T3	0.200
A/C 0.55 – 1 % - T3	0.570
A/C 0.55 – 1.5%- T3	0.083
A/C 0.65 – 0 % - T3	0.450
A/C 0.65 – 0.5%- T3	0.520
A/C 0.65 – 1 % - T3	0.680
A/C 0.65 – 1.5%- T3	0.672

Fuente: Elaboración propia.

e) Pesos secos de discos de mortero luego de 28 días de inmersión en solución de sulfato de magnesio.

Tabla B.14: Registro de peso seco de probetas T4 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T4	20.464
A/C 0.55 – 0.5%- T4	21.143
A/C 0.55 – 1 % - T4	20.735
A/C 0.55 – 1.5%- T4	21.124
A/C 0.65 – 0 % - T4	21.654
A/C 0.65 – 0.5%- T4	21.548
A/C 0.65 – 1 % - T4	21.221
A/C 0.65 – 1.5%- T4	21.008

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.15: Disminución porcentual de peso seco de probetas T4 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Disminución Peso Seco (%)
A/C 0.55 – 0 % - T4	0.280
A/C 0.55 – 0.5%- T4	0.311
A/C 0.55 – 1 % - T4	0.193
A/C 0.55 – 1.5%- T4	0.060
A/C 0.65 – 0 % - T4	0.480
A/C 0.65 – 0.5%- T4	0.820
A/C 0.65 – 1 % - T4	0.720
A/C 0.65 – 1.5%- T4	0.516

Fuente: Elaboración propia.

f) Pesos secos de discos de mortero luego de 35 días de inmersión en solución de sulfato de magnesio.

Tabla B.16: Registro de peso seco de probetas T5 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T5	20.721
A/C 0.55 – 0.5%- T5	20.928
A/C 0.55 – 1 % - T5	20.957
A/C 0.55 – 1.5%- T5	20.524
A/C 0.65 – 0 % - T5	21.524
A/C 0.65 – 0.5%- T5	21.873
A/C 0.65 – 1 % - T5	21.548
A/C 0.65 – 1.5%- T5	21.48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.17: Disminución porcentual de peso seco de probetas T5 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Disminución Peso Seco (%)
A/C 0.55 – 0 % - T5	0.250
A/C 0.55 – 0.5%- T5	0.296
A/C 0.55 – 1 % - T5	0.095
A/C 0.55 – 1.5%- T5	0.073
A/C 0.65 – 0 % - T5	0.517
A/C 0.65 – 0.5%- T5	0.733
A/C 0.65 – 1 % - T5	0.531
A/C 0.65 – 1.5%- T5	0.385

Fuente: Elaboración propia.

g) Pesos secos de discos de mortero luego de 42 días de inmersión en solución de sulfato de magnesio.**Tabla B.18:** Registro de peso seco de probetas T6 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Peso seco (g)
A/C 0.55 – 0 % - T6	20.79
A/C 0.55 – 0.5%- T6	21.485
A/C 0.55 – 1 % - T6	21.604
A/C 0.55 – 1.5%- T6	21.534
A/C 0.65 – 0 % - T6	20.738
A/C 0.65 – 0.5%- T6	22.069
A/C 0.65 – 1 % - T6	21.010
A/C 0.65 – 1.5%- T6	21.872

Fuente: Elaboración propia.

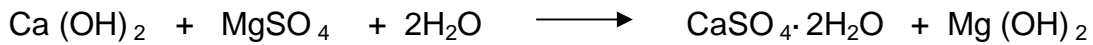
Tabla B.19: Disminución porcentual de peso seco de probetas T6 posterior a ensayo de inmersión.

Identificación Probeta	Disminución Peso Seco (%)
A/C 0.55 – 0 % - T6	0.158
A/C 0.55 – 0.5%- T6	0.176
A/C 0.55 – 1 % - T6	0.070
A/C 0.55 – 1.5%- T6	0.097
A/C 0.65 – 0 % - T6	0.580
A/C 0.65 – 0.5%- T6	0.985
A/C 0.65 – 1 % - T6	0.450
A/C 0.65 – 1.5%- T6	0.323

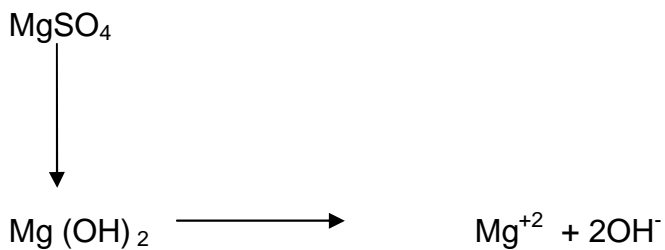
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO C: Concentración de moles de Magnesio.

Considerando la reacción del sulfato de magnesio al entrar en contacto con el concreto, en la que reacciona con el hidróxido de calcio generando yeso e hidróxido de magnesio.



De aquí se desprende que el sulfato de magnesio se convierte en hidróxido de magnesio y por cada mol de Mg (OH)_2 se forman 2 moles de OH^- .

Datos solución

Cantidad de solución	=	4 L
Reactivo Sulfato de Magnesio	=	20 g
Concentración	=	5000 ppm

Moles de Magnesio en reactivo

Se utilizaron 20 grs de MgSO_4

Peso atómico de cada elemento:

$$\begin{array}{l} \text{Mg} = 24.3 \\ \text{S} = 32 \\ \text{O} = 16 \cdot 4 = 64 \end{array}$$

Peso molecular del compuesto:

$$\text{PM MgSO}_4 = 120.3 \text{ g/mol}$$

Cantidad de moles de magnesio participantes:

$$n = \frac{20\text{g}}{120.3\text{g}} = 0.166 \text{ mol Mg}$$

Anterior a ensayo de inmersión

pH solución inicial (t_0) = 5.6

$$\text{pOH} = 14 - \text{pH}$$

$$\text{pOH} = 14 - 5.6 = 8.4$$

$$pOH = -\log [OH^-]$$

$$\begin{aligned} [OH^-] \text{ inicial} &= \text{antilog}(-pOH) \\ &= \text{antilog}(-8.4) \\ &= 3.98 \cdot 10^{-9} \text{ mol OH}^-/\text{L} \end{aligned}$$

Posterior a ensayo de inmersión.

- Para razón agua/cemento 0.55:

$$\begin{aligned} \text{pH solución final } (t_6) &= 9.4 \\ \text{pOH solución final } (t_6) &= 4.6 \\ [OH^-] \text{ en solución final } (t_6) &= 2.511 \cdot 10^{-5} \text{ mol (OH}^-)/\text{L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta[OH^-] &= [OH^-] \text{ en solución final } (t_6) - [OH^-] \text{ inicial} \\ \Delta[OH^-] &= 2.510 \cdot 10^{-5} \text{ mol (OH}^-)/\text{L} \end{aligned}$$

Cantidad de moles de $Mg(OH)_2$:

$$2.510 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol(OH}^-)}{\text{L}} \cdot 4\text{L} \cdot \frac{1\text{molMg(OH)}_2}{2\text{mol(OH}^-)} = 5.02 \cdot 10^{-5} \text{ mol Mg (OH)}_2$$

A la cantidad de moles de Magnesio presentes en el Sulfato de Magnesio inicial se le resta la cantidad de moles de $Mg(OH)_2$ formados:

$$0.166 - 5.02 \cdot 10^{-5} = 0.16595 \approx 0.166$$

- Para razón agua/cemento 0.65:

$$\begin{aligned} \text{pH solución final } (t_6) &= 9.7 \\ \text{pOH solución final } (t_6) &= 4.30 \\ [OH^-] \text{ en solución final } (t_6) &= 5.012 \cdot 10^{-5} \text{ mol (OH}^-)/\text{L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta[OH^-] &= [OH^-] \text{ en solución final } (t_6) - [OH^-] \text{ inicial} \\ \Delta[OH^-] &= 5.0115 \cdot 10^{-5} \text{ mol (OH}^-)/\text{L} \end{aligned}$$

Cantidad de moles de $Mg(OH)_2$:

$$5.0115 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol(OH}^-)}{\text{L}} \cdot 4\text{L} \cdot \frac{1\text{molMg(OH)}_2}{2\text{mol(OH}^-)} = 1.0023 \cdot 10^{-4} \text{ mol Mg (OH)}_2$$

A la cantidad de moles de Magnesio presentes en el Sulfato de Magnesio inicial se le resta la cantidad de moles de $Mg(OH)_2$ formados:

$$0.166 - 1.0023 \cdot 10^{-4} = 0.16589 \approx 0.166$$

De los valores obtenidos, se desprende que la diferencia de pH entre el tiempo inicial y final, no produce una diferencia significativa en la concentración de moles de Mg presentes en la solución, tanto para el caso de las probetas con razón A/C 0.55 como para las A/C 0.65.

Con el mismo procedimiento utilizado anteriormente se obtiene la cantidad de moles de magnesio presentes en cada tiempo de ensayo y para cada pH registrado, lo que se resume en la siguiente tabla:

Tabla C.1: Cantidad de moles de Magnesio probetas razón A/C 0.55.

Tiempo (días)	pH	Moles de Magnesio
0	5.6	0.166
7	8.3	0.16599
14	8.6	0.16599
21	9.5	0.16594
28	9.6	0.16592
35	9.7	0.16590
42	9.4	0.16595

Fuente: Elaboración propia.

Tabla C.2: Cantidad de moles de Magnesio probetas razón A/C 0.65.

Tiempo (días)	pH	Moles de Magnesio
0	5.6	0.166
7	8.3	0.16599
14	8.6	0.16599
21	9.3	0.16596
28	9.4	0.16595
35	9.5	0.16593
42	9.7	0.16589

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO D: Resultados obtenidos para Sulfato de Sodio.

a) **Disminución de peso seco en el tiempo para cada adición de nanosílice, ante el ataque de Sulfato de Sodio.**

Tabla D.1: Disminución de peso seco de probetas T1 (13días), posterior a ensayo de inmersión en Sulfato de Sodio.

% Nanosílice	A/C 0.65	A/C 0.55
0	0.196	0.169
0.5	1.356	0.126
1	0.617	0.510
1.5	0.669	0.241

Fuente: Aguilar (2007).

Tabla D.2: Disminución de peso seco de probetas T2 (26 días), posterior a ensayo de inmersión en Sulfato de Sodio.

% Nanosílice	A/C 0.65	A/C 0.55
0	0.401	0.266
0.5	0.931	0.301
1	0.866	0.080
1.5	0.575	0.036

Fuente: Aguilar (2007).

Tabla D.3: Disminución de peso seco de probetas T3 (39 días), posterior a ensayo de inmersión en Sulfato de Sodio.

% Nanosílice	A/C 0.65	A/C 0.55
0	0.445	0.138
0.5	0.607	0.147
1	0.377	0.059
1.5	0.247	0.045

Fuente: Aguilar (2007).

b) Microscopía Electrónica de muestras de mortero con adiciones de Nanosílice que fueron atacadas por Sulfato de Sodio

- **Muestra sometida a la acción de sulfato de sodio: “buena” (A/C 0.55 1.5%).**

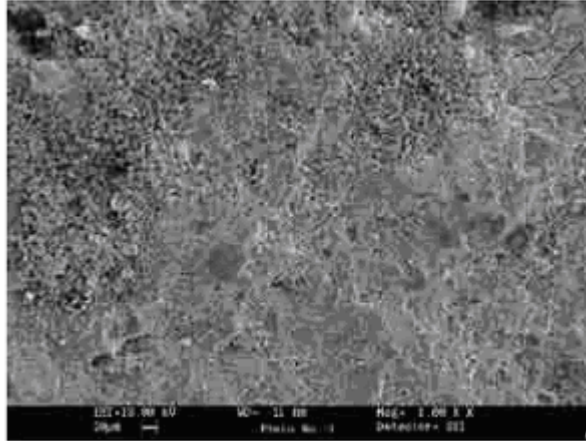


Figura D.1: Imagen muestra sometida a la acción de solución de **sulfato de sodio**: “buena” con un aumento de 1000x. Superficie con perfil de topografía irregular. Zonas más densas en gránulos, depresiones y desadherencias de sustratos superficiales. (Fuente: Aguilar, 2007).

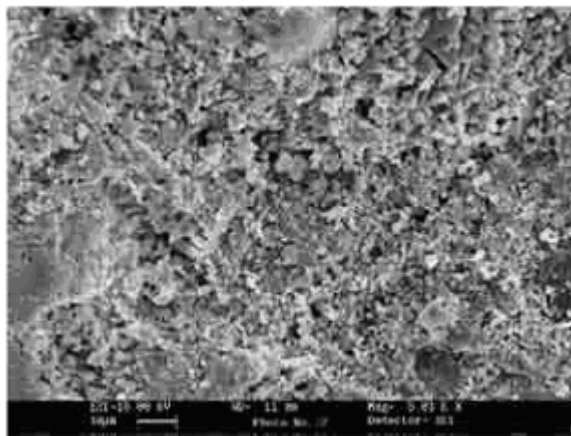


Figura D.2: Imagen muestra sometida a la acción de solución de **sulfato de sodio**: “buena” con un aumento de 5000x. Muestra poco atacada superficialmente, cristales pierden forma en bordes. Gránulos dispersos. (Fuente: Aguilar, 2007).

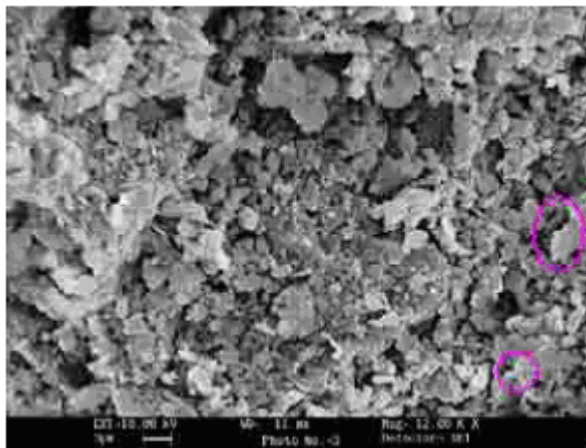


Figura D.3: Imagen muestra sometida a la acción de solución de **sulfato de sodio**: “buena” con un aumento de 12000x. Detalle de superficie, se ven desadherencias entre granos, deterioro puntual en zonas oscuras (parte superior) con cambio de coloración gris por efecto de solución y aparición incipiente de etringita en los bordes de los granos (marcada con círculos). (Fuente: Aguilar, 2007).

- Muestra sometida a la acción de sulfato de sodio: “mala” (A/C 0.65 0.5%).

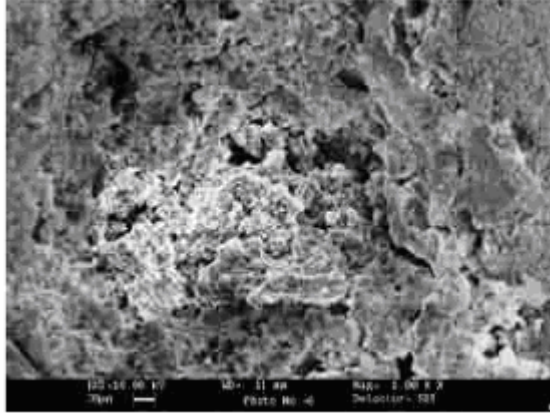


Figura D.4: Imagen muestra sometida a la acción de solución de **sulfato de sodio**: “mala” con un aumento de 1000x. Detalle ataque por sulfatos, con acción en profundidad, remoción de microconstituyentes, cristales sin forma y cubiertos por partículas. (Fuente: Aguilar, 2007).

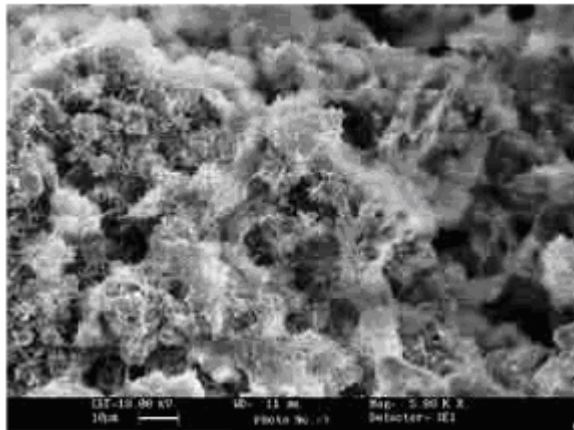


Figura D.5: Imagen muestra sometida a la acción de solución de **sulfato de sodio**: “mala” con un aumento de 5000x. Presencia de etringita no en forma continua ni uniforme, con distintos grados de crecimiento. (Fuente: Aguilar, 2007).

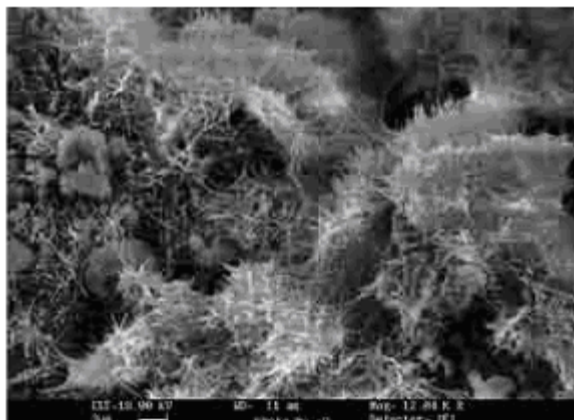


Figura D.6: Imagen muestra sometida a la acción de solución de **sulfato de sodio**: “mala” con un aumento de 12000x. Detalle imagen anterior con etringita que cubre la mayor parte de la superficie en distintos sustratos. (Fuente: Aguilar, 2007).