



# Universidad Austral de Chile

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

## “DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS NANOMOLÉCULAS DE SÍLICE EN EL CONCRETO FRENTE A UN FACTOR QUE AFECTA SU DURABILIDAD”

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 Copatrocinante:  
Sr. Carlos Cabezas Cuevas.  
M.Sc. en Química

REBECA PAZ AGUILAR MUNDACA  
VALDIVIA - CHILE  
2007

## *Agradecimientos*

*Mi familia ha sido el fundamento de mi existencia, a ellos les debo lo que soy. Gracias a mis amados padres Marcia y Martín, por su incondicional apoyo, protección y motivación al logro de mis metas. A mis hermanas, por siempre estar conmigo y su preocupación constante.*

*Eduardo, gracias por tu comprensión, apoyo y aliento, que han sido esenciales para mí.*

*Agradezco a Don Carlos Cabezas y a Don Ernesto Zumelzu, por su guía, consejos y disposición a lo largo de este trabajo.*

*Por último, quiero dar las gracias a todos mis familiares y amigos, que de alguna u otra manera aportaron a mi desarrollo durante este largo proceso que ya culmina.*

## *Dedicatoria*

*A Rebequita, una bellísima persona, que con su sonrisa es capaz de llenar el alma de todos los que la rodean.*

## INDICE GENERAL

| <u>Temario</u>   | <u>Página.</u> |
|--|----------------|
| <b>CAPITULO I: ASPECTOS INTRODUCTORIOS</b>                               |                |
| <b>1.1 Planteamiento del Problema</b>                                    | <b>1</b>       |
| <b>1.2 Antecedentes bibliográficos</b>                                   | <b>1</b>       |
| <b>1.3 Objetivos</b>   | <b>2</b>       |
| 1.3.1 Objetivos generales  | 2              |
| 1.3.2 Objetivos específicos  | 2              |
| <b>1.4 Metodología y estructura de trabajo</b>                           | <b>2</b>       |
| <b>1.5 Alcances y limitaciones</b>                                       | <b>3</b>       |
| <b>CAPITULO II: ASPECTOS TEÓRICOS</b>                                    |                |
| <b>2.1 Aspectos teóricos referentes al concreto</b>                      | <b>5</b>       |
| 2.1.1 Generalidades del concreto   | 5              |
| 2.1.2 Materiales constituyentes del concreto                             | 6              |
| 2.1.2.1 Cemento  | 6              |
| 2.1.2.2 Agua de amasado  | 12             |
| 2.1.2.3 Hidratación del cemento  | 13             |
| 2.1.2.4 Áridos   | 15             |
| 2.1.2.5 Aditivos   | 17             |
| <b>2.2 Nanociencia y Nanotecnología</b>                                  | <b>19</b>      |
| 2.2.1 Nanomateriales   | 20             |
| 2.2.2 La llegada de la nanotecnología al concreto                        | 23             |
| 2.2.2.1 Concreto a escala nanométrica                                    | 23             |
| 2.2.2.2 Concreto con nanosílice  | 25             |
| 2.2.2.2.1 Estudios relacionados al concreto con nanopartículas de sílice | 25             |
| 2.2.2.2.2 Nanosílice como aditivo  | 27             |
| <b>2.3 Durabilidad del concreto</b>                                      | <b>33</b>      |
| 2.3.1 Factores que afectan la durabilidad del concreto                   | 34             |
| 2.3.1.1 Congelamiento y deshielo   | 34             |
| 2.3.1.2 Abrasión   | 37             |
| 2.3.1.3 Reacciones químicas en los agregados                             | 39             |
| 2.3.1.4 Ambiente químicamente agresivo                                   | 43             |

| <b><u>Temario</u></b>   | <b><u>Página.</u></b> |
|---|-----------------------|
| <b>2.4 Ataque químico por sulfatos provenientes de fuentes externas al hormigón</b>             | <b>52</b>             |
| 2.4.1 ¿Qué componentes internos del concreto sean quizás inestables a la presencia de sulfatos? | 52                    |
| 2.4.2 Mecanismo de reacción   | 53                    |
| 2.4.2.1 Caracterización del ataque por sulfatos   | 56                    |
| 2.4.3 Factores que afectan la resistencia a sulfatos en el concreto                             | 57                    |
| <br>  |                       |
| <b>CAPITULO III: EXPERIENCIAS DE LABORATORIO</b>  |                       |
| <br>  |                       |
| <b>3.1 Descripción general de las experiencias a realizar</b>                                   | <b>61</b>             |
| <b>3.2 Discos de mortero a utilizar en el ensayo</b>  | <b>62</b>             |
| 3.2.1 Preparación de los discos de mortero  | 64                    |
| <br>  |                       |
| <b>3.3 Ensayo de Inmersión Concreto en Solución de Sulfato</b>                                  | <b>65</b>             |
| 3.3.1 Análisis de diferencia de Peso  | 67                    |
| 3.3.1.1 Resultados Obtenidos  | 69                    |
| 3.3.1.2 Análisis descriptivo y discusión de resultados  | 73                    |
| 3.3.1.3 Comparación de resultados con propiedades mecánicas y de trabajabilidad                 | 78                    |
| 3.3.2 Análisis pH solución sulfato de sodio   | 79                    |
| 3.3.2.1 Resultados Obtenidos  | 81                    |
| 3.3.2.2 Análisis descriptivo y discusión de resultados  | 82                    |
| 3.3.3 Análisis microscopia electrónica  | 83                    |
| 3.3.2.1 Análisis y caracterización de muestras a través de microscopia electrónica              | 88                    |
| <br>  |                       |
| <b>CAPITULO IV: CONCLUSIONES</b>  | <b>107</b>            |
| <br>  |                       |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b>   | <b>110</b>            |
| <br>  |                       |
| <b>ANEXOS</b>   | <b>113</b>            |

## INDICE TABLAS

| <u>Tabla</u>  |   | <u>Página.</u> |
|---|---|----------------|
| <b><u>Capítulo II: Aspectos teóricos</u></b>            |   |                |
| <b>Tabla 2.1:</b>                                       | Compuestos mineralógicos principales del clínquer   | 7              |
| <b>Tabla 2.2:</b>                                       | Secuencia de reacciones en un horno rotatorio.  | 8              |
| <b>Tabla 2.3:</b>                                       | Proporción de Óxidos en cementos Pórtland   | 9              |
| <b>Tabla 2.4:</b>                                       | Composición media de los minerales principales en cementos Pórtland corrientes  | 9              |
| <b>Tabla 2.5:</b>                                       | Propiedades de los minerales principales presentes en el cemento Pórtland   | 10             |
| <b>Tabla 2.6:</b>                                       | Características de los tipos de cementos Pórtland (ASTM) según su composición de minerales principales  | 11             |
| <b>Tabla 2.7:</b>                                       | Porcentaje de hidratación en condiciones normales   | 13             |
| <b>Tabla 2.8:</b>                                       | Efectos de GAIA Nanosílice en mezclas de hormigón   | 27             |
| <b>Tabla 2.9:</b>                                       | Propiedades Físicas y Químicas de Gaia Nanosílice   | 28             |
| <b>Tabla 2.10:</b>                                      | Características generales de la nanosílice, microsílice y sílice Precipitada  | 30             |
| <b>Tabla 2.11:</b>                                      | Componentes silíceos reactivos que pueden estar presentes en los agregados  | 40             |
| <b>Tabla 2.12:</b>                                      | Efecto de los agentes químicos de uso habitual en el hormigón   | 44             |
| <b>Tabla 2.13:</b>                                      | Factores que afectan el ataque del hormigón por parte de los agentes químicos   | 45             |
| <b>Tabla 2.14:</b>                                      | Compuestos mineralógicos del cemento Pórtland   | 53             |
| <b>Tabla 2.15:</b>                                      | Requisitos para concreto expuestos a soluciones con sulfatos  | 60             |
| <b><u>Capítulo III: Experiencias de laboratorio</u></b> |   |                |
| <b>Tabla 3.1:</b>                                       | Dosificación corregida mortero tipo A/C 0.55  | 63             |
| <b>Tabla 3.2:</b>                                       | Dosificación corregida mortero tipo A/C 0.65  | 63             |
| <b>Tabla 3.3:</b>                                       | Óptimas adiciones para propiedades de resistencias mecánicas, trabajabilidad y durabilidad en relación a la disminución de deterioro por acción de sulfatos | 79             |

| <u>Tabla</u>  | <u>Página.</u> |
|---|----------------|
| <b>Tabla 3.4:</b> Características muestras analizadas a través del microscopio Electrónico  | 88             |
| <b>Tabla 3.5:</b> Resumen elementos químicos constituyentes de los cristales presentes en las muestras de concreto, en relación al porcentaje en peso que estos tienen en cada zona analizada | 104            |
| <br><b><u>Anexos</u></b>  |                |
| <b>Tabla A.1:</b> Granulometría de la Arena seleccionada para ensayos   | 113            |
| <b>Tabla A.2:</b> Granulometría permitida arena incluyendo tolerancias en la banda de trabajo (NCh. 165)  | 114            |
| <b>Tabla A.3:</b> Dosificación corregida mortero tipo A/C 0.55  | 116            |
| <b>Tabla A.4:</b> Dosificación corregida mortero tipo A/C 0.65  | 116            |
| <b>Tabla B.1:</b> Dosificación corregida morteros de cemento para ensayo de cono Reducido (NCh. 2257/3)   | 124            |
| <b>Tabla C.1:</b> Tamaños de partículas y Porcentajes de vacíos para diversas adiciones de nanosílice   | 128            |
| <b>Tabla C.2:</b> Porcentajes de vacíos para diversas categorías de tamaño de grano   | 128            |
| <b>Tabla C.3:</b> Resultado ensayos de morteros de cemento con diversas adiciones de Nanosílice a flexotracción   | 128            |
| <b>Tabla C.4:</b> Resultado ensayos de compresión a morteros de cemento con adiciones de Nanosílice   | 128            |
| <b>Tabla C.5:</b> Asentamiento instantáneo de cono (reducido) para morteros de cemento en diversas configuraciones  | 128            |
| <b>Tabla C.6:</b> Medición previa inmersión de discos en solución sulfato de sodio. Peso seco para T <sub>0</sub>   | 129            |
| <b>Tabla C.7:</b> Medición posterior inmersión de discos en solución sulfato de sodio. Peso seco para T <sub>I</sub> , T <sub>II</sub> y T <sub>III</sub> , para A/C 0,65                     | 129            |
| <b>Tabla C.8:</b> Medición posterior inmersión de discos en solución sulfato de sodio. Peso seco para T <sub>I</sub> , T <sub>II</sub> y T <sub>III</sub> , para A/C 0,55                     | 129            |
| <b>Tabla C.9:</b> Disminución de peso seco en relación al % de adición de nanosílice entre T <sub>0</sub> y T <sub>I</sub>  | 129            |
| <b>Tabla C.10:</b> Disminución de peso seco en relación al % de adición de nanosílice entre T <sub>0</sub> y T <sub>II</sub>  | 130            |

| <b><u>Tabla</u></b>   | <b><u>Página.</u></b> |
|---|-----------------------|
| <b>Tabla C.11:</b> Disminución de peso seco en relación al % de adición de nanosílice entre $T_0$ y $T_{III}$ | 130                   |
| <b>Tabla C.12:</b> Comparación de resultados para A/C 0,65  | 130                   |
| <b>Tabla C.13:</b> Comparación de resultados para A/C 0,55  | 130                   |
| <b>Tabla C.14:</b> Disminución de peso seco en el tiempo para 0% de adición                                   | 130                   |
| <b>Tabla C.15:</b> Disminución de peso seco en el tiempo para 0.5% de adición                                 | 131                   |
| <b>Tabla C.16:</b> Disminución de peso seco en el tiempo para 1.0% de adición                                 | 131                   |
| <b>Tabla C.17:</b> Disminución de peso seco en el tiempo para 1.5% de adición                                 | 131                   |

## INDICE FIGURAS

| <u>Figura</u>   |  | <u>Página.</u> |
|---|--|----------------|
| <b><u>Capítulo II: Aspectos teóricos</u></b>            |  |                |
| <b>Figura 2.1:</b>                                      | Clasificación de nanomateriales  | 20             |
| <b>Figura 2.2:</b>                                      | Incremento en áreas superficiales en materiales por la utilización nanopartículas  | 21             |
| <b>Figura 2.3:</b>                                      | Dispersiones coloidales de nanopartículas metálicas  | 22             |
| <b>Figura 2.4:</b>                                      | Imagen del polvo de cemento dispersado en epoxi  | 23             |
| <b>Figura 2.5:</b>                                      | Diferentes imágenes de las mismas partículas de cemento  | 24             |
| <b>Figura 2.6:</b>                                      | Reacciones del modelo de cemento   | 24             |
| <b>Figura 2.7:</b>                                      | Imagen TEM donde se señalan a las nanopartículas (np)  | 29             |
| <b>Figura 2.8:</b>                                      | Detalle general imagen TEM de la Nanosílice  | 29             |
| <b>Figura 2.9:</b>                                      | Comparación de la cantidad de material necesario para obtener un hormigón H-70   | 31             |
| <b>Figura 2.10:</b>                                     | Fotografía SEM de cristales de etringita   | 55             |
| <b>Figura 2.11:</b>                                     | Efecto de cementos Pórtland y contenido de cemento en la velocidad de deterioro de concreto expuesto a suelos que contienen sulfatos | 58             |
| <b>Figura 2.12:</b>                                     | Efecto de cementos Pórtland y combinados y contenido de cemento, en la exposición de concreto expuesto a una solución de sulfatos    | 58             |
| <b>Figura 2.13:</b>                                     | Efecto de la relación agua-cemento sobre la velocidad de deterioro del concreto expuesto a sales que contienen sulfatos              | 59             |
| <b><u>Capítulo III: Experiencias de laboratorio</u></b> |  |                |
| <b>Figura 3.1:</b>                                      | Esquema ordenamiento recipientes y discos en su interior   | 66             |
| <b>Figura 3.2:</b>                                      | Discos introducidos en sus respectivos recipientes plásticos   | 66             |
| <b>Figura 3.3:</b>                                      | Discos introducidos en sus respectivos recipientes plásticos   | 66             |
| <b>Figura 3.4:</b>                                      | Manchas blancas en la superficie de muestra  | 67             |
| <b>Figura 3.5:</b>                                      | Secado discos de mortero   | 68             |
| <b>Figura 3.6:</b>                                      | Secado discos de mortero   | 68             |
| <b>Figura 3.7:</b>                                      | Gráfico disminución peso seco (%) entro $T_0$ y $T_1$ en relación al % de nanosílice de la muestra                                   | 69             |
| <b>Figura 3.8:</b>                                      | Gráfico disminución peso seco (%) entro $T_0$ y $T_1$ en relación al % de nanosílice de la muestra                                   | 70             |

| <b><u>Figura</u></b>   | <b><u>Página.</u></b> |
|--|-----------------------|
| <b>Figura 3.9:</b> Gráfico disminución peso seco (%) entro $T_0$ y $T_{III}$ en relación al % de nanosílice de la muestra                                | 70                    |
| <b>Figura 3.10:</b> Gráfico comparación de resultados para A/C 0,65 en relación a la disminución de peso seco entre $T_I$ , $T_{II}$ y $T_{III}$ y $T_0$ | 70                    |
| <b>Figura 3.11:</b> Gráfico comparación de resultados para A/C 0.55 en relación a la disminución de peso seco entre $T_I$ , $T_{II}$ y $T_{III}$ y $T_0$ | 71                    |
| <b>Figura 3.12:</b> Gráfico disminución de peso seco en el tiempo para muestras sin adición de nanosílice  | 71                    |
| <b>Figura 3.13:</b> Gráfico disminución de peso seco en el tiempo para muestras con 0.5% de adición de nanosílice  | 72                    |
| <b>Figura 3.14:</b> Gráfico disminución de peso seco en el tiempo para muestras con 1.0% de adición de nanosílice  | 72                    |
| <b>Figura 3.15:</b> Gráfico disminución de peso seco en el tiempo para muestras con 1.5% de adición de nanosílice  | 72                    |
| <b>Figura 3.16:</b> Gráfico pH soluciones utilizadas en el ensayo de inmersión en relación al día en que fueron sacados los discos de mortero            | 81                    |
| <b>Figura 3.17:</b> Microscopio SEM, detector de electrones secundarios y rayos X  | 84                    |
| <b>Figura 3.18:</b> Diferentes volumen de interacción microscopio SEM  | 85                    |
| <b>Figura 3.19:</b> Ejemplo de microanálisis por dispersión de rayos X   | 85                    |
| <b>Figura 3.20:</b> Técnica de recubrimiento con oro   | 86                    |
| <b>Figura 3.21:</b> Máquina utilizada en recubrimiento de muestras con oro   | 87                    |
| <b>Figura 3.22:</b> Máquina utilizada en recubrimiento de muestras con oro   | 87                    |
| <b>Figura3.23:</b> Técnica de recubrimiento con carbono  | 87                    |
| <b>Figura 3.24:</b> Resultado preparación muestra con oro  | 87                    |
| <b>Figura 3.25:</b> Resultado preparación muestra con carbón   | 87                    |
| <b>Figura 3.26:</b> Imagen muestra “control buena” con un aumento de 1000X   | 90                    |
| <b>Figura 3.27:</b> Imagen muestra “control buena” con un aumento de 5000X   | 90                    |
| <b>Figura 3.28:</b> Imagen muestra “control buena” con un aumento de 12000X  | 90                    |
| <b>Figura 3.29:</b> Imagen muestra “buena” con un aumento de 1000X   | 91                    |
| <b>Figura 3.30:</b> Imagen muestra “buena” con un aumento de 5000X   | 91                    |
| <b>Figura 3.31:</b> Imagen muestra “buena” con un aumento de 12000X  | 91                    |
| <b>Figura 3.32:</b> Imagen muestra “control mala” con un aumento de 1000X  | 92                    |
| <b>Figura 3.33:</b> Imagen muestra “control mala” con un aumento de 5000X  | 92                    |
| <b>Figura 3.34:</b> Imagen muestra “control mala” con un aumento de 12000X   | 92                    |
| <b>Figura 3.35:</b> Imagen muestra “mala” con un aumento de 1000X  | 93                    |

| <b><u>Figura</u></b>  | <b><u>Página.</u></b> |
|---|-----------------------|
| <b>Figura 3.36:</b> Imagen muestra “mala” con un aumento de 5000X       | 93                    |
| <b>Figura 3.37:</b> Imagen muestra “mala” con un aumento de 12000X      | 93                    |
| <b>Figura 3.38:</b> Microanálisis muestra “control buena” EDAX 1        | 94                    |
| <b>Figura 3.39:</b> Linescan realizado a muestra “control buena” EDAX 2 | 94                    |
| <b>Figura 3.40:</b> Gráficos elementos químicos encontrados en EDAX 2   | 95                    |
| <b>Figura 3.41:</b> Distribución mapping muestra “control buena”        | 95                    |
| <b>Figura 3.42:</b> Microanálisis muestra “control mala” EDAX 3         | 96                    |
| <b>Figura 3.43:</b> Linescan realizado a muestra “control mala” EDAX 4  | 96                    |
| <b>Figura 3.44:</b> Gráficos elementos químicos encontrados en EDAX 4   | 97                    |
| <b>Figura 3.45:</b> Distribución mapping muestra “control mala”         | 97                    |
| <b>Figura 3.46:</b> Microanálisis muestra “buena” EDAX 5                | 98                    |
| <b>Figura 3.47:</b> Linescan realizado a muestra “buena” EDAX 6         | 98                    |
| <b>Figura 3.48:</b> Gráficos elementos químicos encontrados en EDAX 6   | 99                    |
| <b>Figura 3.49:</b> Distribución mapping muestra “buena”                | 99                    |
| <b>Figura 3.50:</b> Microanálisis muestra “mala” EDAX 7                 | 100                   |
| <b>Figura 3.51:</b> Linescan realizado a muestra “mala” EDAX 8          | 100                   |
| <b>Figura 3.52:</b> Gráficos elementos químicos encontrados en EDAX 8   | 101                   |
| <b>Figura 3.53:</b> Distribución mapping muestra “mala”                 | 101                   |

## **Anexos**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura B.1:</b> Adición de nanosílice v/s tamaño promedio de partículas    | 117 |
| <b>Figura B.2:</b> Adición de nanosílice v/s Porcentaje de vacío en muestra   | 117 |
| <b>Figura B.3:</b> Gráfica tamaño partículas v/s porcentaje vacíos en muestra | 118 |
| <b>Figura B.4:</b> Resultados gráficos Resistencia a Flexotracción            | 120 |
| <b>Figura B.5:</b> Gráfico de Resultados ensayo de compresión                 | 122 |
| <b>Figura B.6:</b> Gráfico de resultados de trabajabilidad                    | 125 |
| <b>Figura D.1:</b> Imagen muestra “mala” con un aumento de 210X               | 132 |
| <b>Figura D.2:</b> Imagen muestra “mala” con un aumento de 639X               | 132 |
| <b>Figura D.3:</b> Imagen muestra “mala” con un aumento de 17000X             | 132 |

## INDICE ANEXOS

| <u>Anexo</u>  | <u>Página.</u> |
|---|----------------|
| <b>ANEXO A:</b> Ensayos normalizados de caracterización de áridos para fabricación de morteros y dosificación de probetas | 113            |
| <b>ANEXO B:</b> Caracterización y propiedades de morteros que tienen incluidas nanomoléculas de sílice                    | 117            |
| <b>ANEXO C:</b> Tablas  | 128            |
| <b>ANEXO D:</b> Microscopia electrónica de barrido (SEM)  | 132            |

## RESUMEN

En los últimos años se han intensificado las investigaciones relacionadas con el mejoramiento de los materiales utilizados en obras de ingeniería, con el objetivo de mejorar sus propiedades y economizar su costo de fabricación y los que su utilización implique. Una de las últimas tecnologías desarrolladas con muchas aplicaciones en este campo es la nanotecnología, que como su nombre lo indica, se desarrolla a escalas nanométricas, en que un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro.

Es en el marco de esta tecnología que se desarrolla el presente trabajo, que tiene como objeto principal la determinación de la influencia de las nanopartículas de sílice en el concreto frente a la acción de agentes que son agresivos para éste que afectan su durabilidad considerando los efectos superficiales y estructurales, físicos y químicos, de esta acción en el concreto.

Para determinar la influencia de estas nanomoléculas, se realiza un trabajo experimental que consiste en un ensayo de inmersión de pequeños discos de concreto con árido fino o mortero, con distintas adiciones de nanosílice en porcentaje de peso de cemento, en una solución de sulfato de sodio, del que se desprenden tres tipos de análisis:

- ❖ El primero está relacionado con la pérdida o disminución de masa de cada una de las muestras en forma posterior a su inmersión
- ❖ El segundo es un análisis del pH de la solución utilizada en forma previa y posterior al ensayo de inmersión
- ❖ Por último se expone un análisis de microscopía electrónica, en la muestra que sufrió mayor deterioro y aquella que fue menos dañada, producto de la acción de los sulfatos en el ensayo de inmersión.

Además se hace una comparación de los resultados del primer análisis mencionado, con los de una investigación anterior referente al estudio de resistencias mecánicas (flexotracción y compresión) y trabajabilidad de probetas de mortero, idénticas a las utilizadas en esta investigación.

## SUMMARY

Research projects relating to the improvement of materials utilized for engineer work has intensified in the last years. The objective is to improve their characteristics and to reduce the production and implementation costs. One of the latest technologies developed with many applications in this field is the nanotechnology. As its name indicates, it uses a nanometric scale, in which a nanometer is the millionth part of a millimeter.

It is in the framework of this technology that the present work develops. Its main objective is the determination of the influence of the nanoparticles of silica in the concrete in front of the action of agents that are aggressive and affect its durability, considering the structural and superficial effects, chemical and physical, of this action on the concrete.

To determine the influence of these nanomolecules in the concrete, an experimental work is done that consists of a test of immersion of small concrete disks made of fine aggregate or mortar, with quantities of nanosilica in cement weight percentage, in a sodium sulphate solution. From this test three types of analyses are done:

- ❖ The first one is related to the loss or decrease of mass in each one of the samples after their immersion
- ❖ Second is an analysis of the pH of the solution utilized before and after the trial of immersion test
- ❖ Finally an analysis of electron microscopy is presented, in the sample that suffered the greatest deterioration and the sample which was least damaged, product of the action of the sulphates in the trial of immersion test.

The results of the first analysis are compared with the previous investigation relating to the study of mechanical resistances (flexure and compression) and workability of test tubes of mortar, identical to the samples utilized in this investigation.

## **CAPITULO I**

### **ASPECTOS INTRODUCTORIOS**

#### **1.1 Planteamiento del Problema**

En el siglo XXI la ciencia se ha visto revolucionada por investigaciones relacionadas con nanociencia y nanotecnología, conceptos que se traducen en un gran desarrollo tecnológico en una variada gama de actividades de gran impacto para la sociedad. Una de ellas es el estudio de materiales relacionados con la ingeniería civil.

En relación al nanosílice en los últimos años se ha estudiado sus características generales (tamaño de la partícula, área específica de superficie, apariencia, etc.), como también sus propiedades físicas y químicas (densidad, ph, viscosidad, etc.) y ha sido creada como un producto para ser usado en el concreto u hormigón. En cuanto al concreto que tiene incorporado nanomoléculas de sílice en su estructura, en la actualidad se han realizado estudios para determinar, sus propiedades mecánicas de resistencia, rugosidad superficial, análisis microscópico y sus propiedades reológicas de plasticidad y autocompactación.

Esta investigación se centrará en un tema aún no abordado en las investigaciones realizadas hasta ahora, que es la determinación de la influencia de las nanomoléculas de sílice en el concreto frente a un agente o medio que afecta la durabilidad de éste, el cual se desarrollará a través de un ensayo en laboratorio del cual se desprenderán una serie de análisis (físicos y químicos), con los que se estudiará el comportamiento de muestras fabricadas con este nanomaterial, sometido a ciertas condiciones desfavorables que se definirán a futuro en esta investigación.

La importancia de este trabajo es que realizando este ensayo y los análisis que se desprenden de él, se podrá caracterizar los efectos físicos y químicos, superficiales y microestructurales, en el concreto producto del medio agresivo y establecer si la incorporación de las nanomoléculas de sílice favorece la disminución de éstos.

#### **1.2 Antecedentes bibliográficos**

Existe un conocimiento profundo del concreto o mortero en la mayoría de sus aspectos, pero cuando este concepto se traslada al área de los nanomateriales, este conocimiento comienza a decaer.

Hasta el momento se han desarrollado investigaciones en cuanto a las propiedades mecánicas y reológicas de diversos concretos con nanomoléculas de sílice, así como también de la nanosílice por sí sola, pero en general el conocimiento que existe en esta área es escaso y no hay una gran cantidad de información.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general:**

- Determinar la influencia de las nanopartículas de sílice en el concreto, en presencia de un agente que afecta la durabilidad de éste, realizando análisis físicos y químicos, superficiales y microestructurales, por medio de experiencias en laboratorio.

#### **1.3.2 Objetivos específicos:**

- Estudiar cual es el efecto de las nanomoléculas de sílice en el concreto, como elemento que le otorga durabilidad, en cuanto a la resistencia al deterioro.
- Analizar como es el mecanismo físico-químico de degradación del concreto que tiene incorporado estas nanomoléculas.
- Estudiar como se caracteriza el daño por efecto del agente agresivo a nivel estructural y superficial.
- Demostrar que un concreto compuesto por nanomoléculas de sílice se comporta mejor frente a ambientes adversos que un concreto convencional.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en esta investigación con los resultados de una investigación anterior referente al estudio de propiedades mecánicas (flexo-tracción y compresión) y trabajabilidad, examinando si los resultados de la presente investigación son coherentes y están relacionados a los de la investigación previa.

### **1.4 Metodología y estructura de trabajo**

Con el objetivo de recopilar el material que sea necesario para la realización de esta investigación, se comenzará con una fase exploratoria, en la cual se realizará un minucioso análisis de la literatura existente, comenzando con la recopilación de bibliografía relacionada al concreto, mortero, la nanociencia y nanotecnología, su grado de desarrollo, los nanomateriales, profundizando en el nanosílice, material base de esta investigación. Se estudiará información respecto de los factores principales que afectan

la durabilidad del concreto, de los cuales se seleccionará uno de ellos para realizar la parte experimental de esta investigación.

Una vez conocido el agente agresivo a utilizar en la experimentación, se definen el tipo de ensayo, procedimientos y análisis a realizar en el laboratorio, para lo cual es necesario realizar una planificación de estos de acuerdo a los objetivos que se quiere alcanzar en esta investigación, ya que por medio de estos ensayos se expondrá el concreto con nanomoléculas de sílice a este agente y se analizarán los efectos producidos en él.

Se procederá a la preparación de probetas que serán utilizadas en el ensayo y los análisis acordes con la investigación. Se realiza un ensayo de inmersión de pequeños discos de concreto con árido fino (mortero), los cuales se sumergen en una solución de sulfato, de tipo y concertación determinada.

En forma previa se realiza un secado especial, obteniendo el peso seco de cada una de ellas. Una vez sumergidas y transcurrido un tiempo determinado, las muestras se sacaran de la solución por grupos en tres tiempos diferentes, se volverán a secar y pesar en estado seco, por lo que se estudiará la degradación en cuanto a la diferencia de peso (pérdida de masa).

Cuando halla finalizado este proceso se procederá a analizar la estructura de las probetas por medio de microscopía realizando un análisis morfológico y otro químico por energía dispersiva de rayos X, en la muestra que resulto mas afectada y aquella que resulto menos afectada por la acción del agente agresivo, de acuerdo a los resultados del análisis anterior. También se analizará el PH de las soluciones posterior retiro de las muestras.

Así, por medio del ensayo de inmersión de probetas en solución de sulfato, se realizarán los siguientes análisis:

- Análisis de pérdida de masa
- Análisis del PH de la solución
- Análisis microscopía electrónica

Luego de realizado los análisis se deberá hacer una acabada discusión y comparación de los resultados, para poder elaborar las conclusiones de esta investigación.

## **1.5 Alcances y limitaciones**

La influencia de las nanopartículas de sílice en el concreto frente a la acción de agentes que afectan la durabilidad de éste, es determinada para mortero de

especificaciones descritas en el anexo A de este trabajo, con diferentes adiciones de nanosílice en porcentaje de peso de cemento: 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5%. Por lo que los resultados obtenidos y su análisis son válidos para estos tipos de concreto, que se sometieron al tipo de ataque, correspondiente a un agente químicamente agresivo, con solución de sulfato de sodio de concertación también especificada.

## CAPITULO II

### ASPECTOS TEORICOS

#### 2.1 Aspectos teóricos referentes al concreto

##### 2.1.1 Generalidades del concreto

###### ¿Qué se entiende por concreto u hormigón?

El concreto u hormigón es el resultado de la mezcla de uno o más conglomerantes, que pueden ser de tipo calcáreo, bituminoso, etc., áridos fino o grueso (grava, gravilla y arena), agua, aire, posibles aditivos (colorantes, aceleradores, retardadores de fraguado, fluidificantes, impermeabilizantes, etc.) y adiciones. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose complejas reacciones químicas que derivan en el fraguado y endurecimiento de la mezcla, obteniéndose al final del proceso un material con consistencia pétreo.

###### Mortero

Cuando se habla de mortero, se esta haciendo referencia a un tipo de concreto fabricado específicamente con árido fino (arena) de tamaño máximo igual o inferior a 5mm o que pasa por una abertura nominal de 5 mm. y es retenido en el 0.080 mm. con tolerancias establecidas en la Nch163, junto a los demás componentes mencionados anteriormente. Dependiendo del tipo de conglomerante que se utilice los morteros se clasifican en:

- Mortero de cemento: se compone de una mezcla en la que el conglomerante es cemento. Su principal ventaja respecto a otros tipos de argamasa es su gran resistencia y la rapidez con la que se seca y endurece. Sin embargo, como es poco flexible, es fácil que se resquebraje.
- Mortero de cal: el conglomerante en el que se amasa este producto es cal, tiene la gran ventaja de que es fácil de aplicar, y es flexible y untuoso. No obstante, es menos resistente e impermeable que el mortero de cemento.
- Mortero mixto: donde el conglomerante esta compuesto por cemento y cal, que aúna las cualidades de los dos anteriores. Si en la masa se pone más cemento que cal será más resistente y si la cantidad de cal es mayor será más flexible.

###### Usos del mortero

- Como mortero de junta, para la adherencia de unidades de albañilería.

- Como mortero de estuco, para recubrimiento de superficies de albañilería u hormigón.
- Como mortero de pega para unir piezas de revestimiento prefabricadas (baldosas, pastelones, elementos cerámicos, etc.).
- Como mortero de relleno en unidades de albañilería armada o placas de fundación de estructuras metálicas o equipos.
- Como mortero proyectado para el recubrimiento y sustentación de superficies de suelo, roca, hormigón u otros materiales.
- Como mortero de inyección de fisuras y grietas en elementos de hormigón, roca u otros.
- Como material de reparación, especialmente en obras de hormigón.
- Como recubrimiento interior de tubos metálicos.
- Como morteros de tratamiento de juntas de hormigonado.

## **2.1.2 Materiales constituyentes del concreto**

### **2.1.2.1 Cemento**

El cemento se presenta en forma de polvo finísimo, de color gris, que mezclado con agua forma una pasta que endurece tanto bajo el agua como el aire. Por endurecer bajo el agua y por necesitar agua para su fraguado se le define como un aglomerante hidráulico.

#### **➤ Proceso de fabricación del cemento**

El componente principal del cemento es el clínker, el cual está compuesto por materias primas: calizas y arcillosos. Como materiales calizos: contienen principalmente carbonato cálcico, pueden usarse calizas, margas, conchas marinas, etc. Como materiales arcillosos: contienen principalmente óxidos de silicio o sílice de aluminio o alúmina, y de hierro, con una cierta cantidad de agua libre y de agua de cristalización, arcillas, pizarras, esquistos, escoria de alto horno, etc.

Algunos de estos materiales, por ejemplo las margas y la escoria, son a su vez calcáreos y arcillosos. Además hay impurezas, tales como carbonato de magnesio que lleva a veces la caliza y otros elementos Na, K, P, etc., estos en pequeñas cantidades.

La parte esencial de la fabricación del cemento es la calcinación, que consiste en un proceso de fusión incipiente en un horno rotatorio de las materias antes mencionadas, previa reducción y dosificación de estas. Lo primero, consiste en la reducción de estas a granos muy finos, con el fin de aumentar su superficie específica, de manera que puedan tener lugar en el horno las reacciones buscadas. Este proceso de reducción

de tamaño de las materias primas se puede hacer básicamente por dos procedimientos diferentes, que son el de vía seca y el de vía húmeda.

- Proceso de vía seca: la reducción de tamaño se hace por una serie de chancadoras y Molinos en los que
- se trituran y desmenuzan los materiales en seco. Si inicialmente las materias primas no están lo bastante secas, deben someterse a un pre-secamiento.
- Proceso de vía húmeda: se deslían los materiales en agua formando una suspensión que se espesa y eventualmente se le disminuye el contenido de agua por filtros al vacío antes de entrar en el horno. Esta vía necesita menos gastos de energía mecánica en la reducción de tamaño, pero mayores gastos térmicos, ya que es necesario evaporar en el horno una cantidad de agua mayor.

El emplear una vía u otra depende del tipo de materias primas.

El segundo proceso previo consiste en la dosificación necesaria para que las materias primas calcáreas y arcillosas estén en la proporción necesaria para obtener el clínquer de la composición requerida.

Mediante el tratamiento térmico, la mezcla cruda finamente molida de los materiales naturales no hidráulicos, calcita, cuarzo, arcillas y feldespatos, es transformada en una mezcla íntima de cuatro minerales principales hidráulicamente activos que se aprecian en la siguiente tabla.

**Tabla 2.1:** Compuestos mineralógicos principales del clínquer

| <b>Denominación</b>                 | <b>Mineral</b> | <b>Formula Química</b>   | <b>Abreviaturas</b>    |
|-------------------------------------|----------------|--|------------------------|
| <b>Silicato Tricálcico</b>          | Alita          | $3 \text{ Ca O} \cdot \text{SiO}_2$                                      | <b>C<sub>3</sub>S</b>  |
| <b>Silicato Dicálcico</b>           | Belita         | $2 \text{ Ca O} \cdot \text{SiO}_2$                                      | <b>C<sub>2</sub>S</b>  |
| <b>Aluminato Tricálcico</b>         | Alumina        | $3 \text{ Ca O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$                             | <b>C<sub>3</sub>A</b>  |
| <b>Ferro-Aluminato Tetracálcico</b> | Ferrita        | $4 \text{ Ca O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | <b>C<sub>4</sub>AF</b> |

Fuente: Gálvez, et al. (2007)

El tratamiento térmico de calentamiento y enfriamiento responsable para esta transformación se denomina clínquerización. En el proceso de formación de clínquer ocurre una serie de complejas reacciones en un rango amplio de temperaturas y durante el mismo coexisten frecuentemente mezclas complejas de productos reactantes

intermedios y finales. Aún después de alcanzada la temperatura máxima de aproximadamente 1.450°C, debe transcurrir un cierto tiempo antes que se produzca clínquer de una calidad aceptable.

**Tabla 2.2:** Secuencia de reacciones en un horno rotatorio.

| <b>Rango de Temperatura (°C)</b> | <b>Tipo de reacción</b>   |
|----------------------------------|---|
| <b>Calentamiento :</b>           |   |
| 20 – 100                         | Evaporación de H <sub>2</sub> O libre   |
| 100-300                          | Perdida del agua físicamente absorbida  |
| 400-900                          | Remoción de H <sub>2</sub> O estructural (grupos H <sub>2</sub> O y OH) de los minerales de arcilla |
| >500                             | Cambio de estructura en los minerales de sílice   |
| 600-900                          | Disociación de los carbonatos   |
| >800                             | Formación de belita, productos intermedios  |
| >1.250                           | Formación de alita  |
| >1.260                           | Formación de fase líquida (caldo de aluminato y ferrita)  |
| Aprox. 1.450                     | Se completa la reacción y recristalización de alita y belita  |
| <b>Enfriamiento:</b>             |   |
| 1.300-1.240                      | Cristalización de fase líquida  |

Fuente: Gálvez, et al. (2007)

Es importante el balance térmico del horno para obtener el mejor aprovechamiento del calor. Para ello, el aire para la combustión se pasa por el clínquer caliente con lo que se consigue la doble finalidad de aprovechar el calor y enfriar el clínquer. En la parte inicial del horno se ponen dispositivos para favorecer la transmisión térmica de los gases a la mezcla cruda. Además, los gases de escape se aprovechan incluso para calentar las materias primas antes de entrar en el horno. El clínquer sale formando bolitas de 3 a 29 mm. de diámetro y es necesario pulverizarlo.

### ➤ **Cemento Pórtland.**

Una vez ya formado el clínquer este se pulveriza mediante molinos de bola hasta convertirlo en polvo finísimo, adicionándole en esta etapa yeso CaSO<sub>4</sub> (yeso o anhidrita) de alrededor de un 5% de su peso. Así el producto obtenido se denomina Cemento Pórtland, que es el tipo de cemento más utilizado como ligante para la preparación de concreto. Es importante destacar que sino se le adicionara yeso al clínquer, el cemento, tendría un fraguado muy rápido, de esta manera el yeso se utiliza como regulador del fraguado. Los cementos Pórtland son de composición variable, pero comprendida entre ciertos límites. El análisis químico de un cemento se expresa por sus

óxidos. Sus proporciones en los cementos Pórtland corrientes suelen ser las que se indican en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3:** Proporción de Óxidos en cementos Pórtland.

| <b>Componente</b>              | <b>%</b>   | <b>Media %</b> |
|--------------------------------|------------|----------------|
| CaO                            | 59-67      | 64             |
| SiO <sub>2</sub>               | 17-25      | 21             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5-9        | 6.5            |
| Fe <sub>2</sub> O              | 1-5        | 2.5            |
| MgO                            | 1-4        | 2.5            |
| SO <sub>3</sub>                | 1-3        | 2.1            |
| Pérdida por calcinación.       | 0.6-2      | 1.3            |
| Residuo insoluble              | 0.008-0.02 | 0.01           |

Fuente: Gálvez, et al. (2007)

En la tabla anterior se encuentran los componentes principales de que hemos hablado: cal, sílice, alúmina, óxido de hierro. Estos componentes constituyen, en la composición media, el 94% del total. La magnesia (óxido de magnesio) no es un componente favorable, pero proviene de impurezas de algunas calizas. El SO<sub>3</sub> es del yeso que se añadió al clínker. Además de los óxidos citados, hay otros como Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, etc., en proporciones menores. El significado de la pérdida por calcinación y del residuo insoluble se explicará más adelante.

Como ya se ha visto, estos óxidos que da el análisis químico no se hallan libres, sino combinados en virtud de las reacciones producidas en el horno. Los cuatro óxidos principales forman los compuestos C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF. De la composición expresada por los óxidos y teniendo en cuenta sus pesos moleculares, se puede deducir la composición potencial de los cuatro minerales que constituyen principalmente el cemento Pórtland. Desde luego, estas proporciones son diferentes en cada cemento particular.

**Tabla 2.4:** Composición media de los minerales principales en cementos Pórtland corrientes

| <b>Mineral</b>    | <b>%</b> |
|-------------------|----------|
| C <sub>3</sub> S  | 48       |
| C <sub>2</sub> S  | 28       |
| C <sub>3</sub> A  | 12       |
| C <sub>4</sub> AF | 8        |

Fuente: Gálvez, et al. (2007)

Estos cuatro compuestos son identificables al microscopio como cuatro fases diferentes. Tienen distintas propiedades y de su proporción dependen por tanto las características principales de un cemento Pórtland. Los cuatro compuestos podrían considerarse aisladamente como cuatro cementos diferentes, pues todos ellos tienen la virtud de fraguar y endurecerse; pero esto lo hacen a distintas velocidades y alcanzando diferentes valores de resistencia.

### Propiedades de los minerales presentes en el cemento Pórtland

Como el fraguado y endurecimiento se producen por reacciones con el agua, que son exotérmicas, su distinta velocidad está relacionada directamente con el calor de hidratación liberado.

El aluminato tricálcico tiene mucho calor de fraguado, es de reacción rápida. De él depende la resistencia del hormigón a un día. Es atacable por los sulfatos y de su mayor proporción depende que el cemento sea más vulnerable a ese ataque químico, por ejemplo, por el agua de mar. El silicato tricálcico le sigue en rapidez. De él principalmente depende la resistencia de 3 a 28 días. Calor de hidratación alto, pero no tanto como el C<sub>3</sub>A.

El silicato dicálcico es más lento que los anteriores y tiene menos calor de hidratación. El C<sub>4</sub>AF tiene débiles propiedades aglomerantes.

**Tabla 2.5:** Propiedades de los minerales principales presentes en el cemento Pórtland

| <b>Minerales Principales</b> | <b>C<sub>3</sub>S</b> | <b>C<sub>2</sub>S</b> | <b>C<sub>3</sub>A</b> | <b>C<sub>4</sub>AF</b> |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Velocidad de reacción</b> | Media                 | Lenta                 | Rápida                | Lenta                  |
| <b>Calor liberado</b>        | Medio                 | Poco                  | Mucho                 | Poco                   |
| <b>Valor conglomerante</b>   |                       |                       |                       |                        |
| <b>inicial</b>               | Bueno                 | Pobre                 | Bueno                 | Pobre                  |
| <b>Final</b>                 | Bueno                 | Bueno                 | Pobre                 | Pobre                  |
| <b>Reacción con sulfatos</b> | No                    | No                    | Si                    | No                     |

Fuente: Gálvez, et al. (2007)

### Propiedades de un cemento Pórtland conocida su composición mineralógica

Según su composición mineralógica se clasifican los cementos Pórtland norteamericanos en cinco tipos con las características y composición media que se indican a continuación, en porcentaje.

**Tabla 2.6:** Características de los tipos de cementos Pórtland (ASTM) según su composición de minerales principales

|                        | <b>I</b><br><b>Corriente</b> | <b>II</b><br><b>Moderado</b><br><b>Calor</b> | <b>III</b><br><b>Alta Resist.</b><br><b>Inicial</b> | <b>IV</b><br><b>Bajo calor</b> | <b>V</b><br><b>Resist. A los</b><br><b>sulfatos</b> |
|------------------------|------------------------------|--|---|--------------------------------|---|
| <b>C<sub>3</sub>S</b>  | 48                           | 43   | 57  | 20                             | 39  |
| <b>C<sub>2</sub>S</b>  | 28                           | 30   | 20  | 52                             | 33  |
| <b>C<sub>3</sub>A</b>  | 12                           | 7.5  | 11  | 6                              | 4.5   |
| <b>C<sub>4</sub>AF</b> | 8                            | 12   | 7   | 14                             | 16  |

Fuente: Gálvez, et al. (2007)

Obsérvese, por ejemplo, que el cemento resistente a los sulfatos es el que tiene menos C<sub>3</sub>A. El de bajo calor, es el que tiene menos C<sub>3</sub>S y poco C<sub>3</sub>A; y el de resistencia inicial, el que tiene más C<sub>3</sub>S y una cantidad no reducida de C<sub>3</sub>A. Otro factor que influye extraordinariamente en la velocidad de endurecimiento y en el calor de hidratación es la finura del cemento. En cuanto a la velocidad del fraguado, está siempre regulada por el yeso, debiéndose añadir más en los cementos más finos. El Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es responsable del tono gris del cemento. Por eso cuando se quiere fabricar cemento blanco hay que buscar materias primas que tengan muy poco Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y en lo posible también poco MgO. La magnesia (MgO), el SO<sub>3</sub> y la cal libre pueden producir expansiones diferidas que, al ocurrir en el hormigón ya endurecido, ocasionan su agrietamiento. Por tal razón se limita en las normas su contenido máximo y además se hace con el cemento un ensayo acelerado de expansión

El óxido de magnesio da el tono verdoso de algunos cementos. Por cal libre se entiende CaO que no ha reaccionado en la clinquerización. Esa cal se encuentra confinada dentro de una estructura mineral compacta lo que hace que no reaccione inmediatamente con el agua al mezclar el hormigón. Su hidratación se produce muy posteriormente, con el consiguiente aumento de volumen y el peligro de agrietamiento a que nos hemos referido. Los óxidos alcalinos Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O se encuentran en proporción total de 0,4% a 1,3%; con todo, pueden tener gran trascendencia en el comportamiento del cemento, ya que reaccionan con ciertos áridos produciendo expansiones y grietas en el hormigón. Por eso se recomienda que su proporción total, expresada como Na<sub>2</sub>O, sea menor que 0,6%. La reacción álcali-árido más conocida es la álcali-sílice, entre los

álcalis del hormigón álcalis (sodio y potasio) y ciertas rocas silíceas o minerales presentes en algunos áridos.

#### Pérdida por calcinación y residuo insoluble

La pérdida por calcinación o pérdida al fuego es la disminución relativa de peso del cemento al calentarlo a 1000°C. En ese calentamiento se desprende principalmente agua y CO<sub>2</sub>. El agua proviene de varios orígenes: En primer lugar en las fábricas a veces se rocía el clínquer con agua para enfriarlo, lo que le produce una muy pequeña hidratación superficial. En segundo lugar, la humedad del aire absorbida por el mismo clínquer. En tercer lugar, el agua que lleva el yeso, ya que éste no pasa por el horno en la fábrica de cemento, y lleva agua de cristalización, y posiblemente humedad.

El CO<sub>2</sub> proviene de absorción del aire. La pérdida por calcinación puede servir además como índice del estado de un cemento del cual se dude por haber tenido un almacenamiento inadecuado.

El residuo insoluble se refiere a la parte que no se disuelve en ácido clorhídrico. Los componentes de la porción arcillosa del crudo son insolubles en HCl, pero pasan a ser solubles después de haber reaccionado en el horno. Por lo tanto, el residuo insoluble es un índice para saber si la clínquerización ha sido completa o no.

#### **2.1.2.2 Agua de amasado**

El agua desempeña dos roles en su calidad de componente del concreto, el primero es que participa en el proceso de hidratación del cemento, la cual no puede tener lugar sin su presencia y luego otorga la trabajabilidad necesaria del concreto siendo determinante para definir su fluidez. En consecuencia, es un componente fundamental del concreto, ya que su presencia condiciona tanto el desarrollo de las propiedades en estado fresco, como en la etapa de endurecimiento (porosidad, retracción y resistencia)

#### Condiciones de calidad

Para su incorporación en el concreto, el agua debe presentar ciertas características de calidad, las cuales aparecen definidas en la NCh. 1498 y pueden resumirse en la forma siguiente:

- El uso de agua potable esta permitido sin necesidad de verificar su calidad.
- El agua de mar solo puede usarse en la preparación de hormigones de resistencia especificada inferior a 150 kg/cm<sup>2</sup>.

- El agua contenida de azúcares, en forma de sacarosa o glucosa, no puede ser empleada para la preparación de hormigones.

Las aguas de origen desconocido deben ser sometidas a análisis químico, debiendo atenerse su composición a los límites señalados en la norma respectiva. Generalmente se investiga lo siguiente:

- Origen: No son recomendables las aguas procedentes de desagües, relaves de minas, de alta montaña, de mar, residuales de industrias de azúcar o similares, de aceite, de ácidos, álcalis o cualquier agua que tenga olor o sabor desagradables.
- Contenidos en suspensión: No son recomendables las aguas que arrastran abundante material en suspensión, como pueden ser las aguas de canales o de pozo. Si no contienen exceso de sales disueltas, podrán emplearse si se adopta algún sistema de decantación que permita obtener agua sin turbidez.
- Contenidos disueltos: No son recomendables las aguas con gusto salobre o azucarado. Cuando se desconozca o se tenga dudas sobre aguas que tengan contenidos peligrosos de sales disueltas, deberá recurrirse a análisis en laboratorios especializados.

En resumen, el agua debe estar libre de sales, impurezas, sólidos en suspensión y materias orgánicas.

### 2.1.2.3 Hidratación del cemento

El fraguado y el endurecimiento del cemento se basan en la reacción de los compuestos anhidros del cemento con el agua. En el hormigón, el agente conglomerante no es el cemento en sí, sino la mezcla de cemento y agua. Las reacciones de hidratación ya empiezan a ocurrir durante el almacenamiento de clínquer, durante la molienda del clínquer con yeso y durante el almacenamiento del cemento. Esta hidratación incipiente puede inclusive cambiar las características físicas del cemento. La hidratación a gran escala y con cambios significativos en las características físicas se lleva a cabo durante la reacción del cemento con el agua en la mezcla del hormigón.

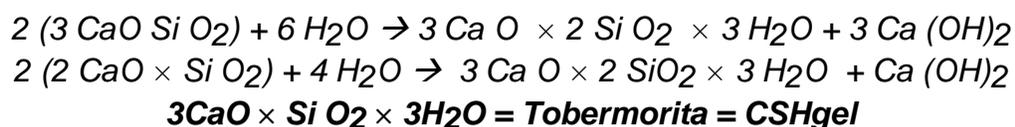
**Tabla 2.7:** Porcentaje de hidratación en condiciones normales

|  |        |
|--|--------|
| Almacenamiento del clínquer            | 0-1%   |
| Molienda de cemento                    | 0-1%   |
| Almacenamiento de cemento y transporte | 0-10%  |
| Mezcla de hormigón                     | 0-100% |

Fuente: Gálvez (2007).

Los compuestos del cemento se hidratan a distinta velocidad, iniciándose con el C3A y continuando posteriormente con C4AF, C3S y C2S. A partir de ese momento el proceso no es cabalmente conocido, existiendo teorías que suponen la precipitación de los compuestos hidratados, con la formación de cristales entreverados entre si que desarrollen fuerzas de adherencia, las que producen el endurecimiento de la pasta (Teoría cristaloidal de Le Chatelier) o alternativamente por el endurecimiento superficial de un gel formado a partir de dichos compuestos hidratados (Teoría coloidal de Michaelis), estimándose actualmente que el proceso presenta características mixtas.

La hidratación del cemento Pórtland es principalmente una hidrólisis de silicatos, que produce un hidrato de silicato de calcio liberando cal que se separa bajo la forma de hidróxido de calcio. Las reacciones más importantes son las de los silicatos tricálcico y dicálcico.



No se han considerado las reacciones del C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF y del yeso. En ellas la cantidad de agua necesaria es, en proporción, mayor que en las reacciones citadas; pero como esos componentes se hallan en menor cantidad que los silicatos, no influye considerablemente en la demanda de agua del cemento, que va a ser como máximo 28± 1% .

Esta es el agua que se combina químicamente; desde luego el concreto necesita una relación agua/cemento mayor que 0.28, pero ello es debido a la necesidad de darle trabajabilidad.

En el caso de los cementos puzolánicos, la cal Ca (OH)<sub>2</sub>, liberada en las reacciones anotadas, reacciona a su vez con la puzolana formando compuestos con propiedades conglomerantes. Además, la puzolana, al consumir la cal, desequilibra las reacciones anotadas y hace que se incline más la reacción hacia la derecha, formándose más tobermorita (CSH gel).

Aparte del CSH gel, el hidróxido de calcio es el componente principal del cemento hidratado. Se cree que el Ca (OH)<sub>2</sub> no contribuye a la resistencia y siendo una base fuerte, en el sentido químico de la palabra, protege al acero contra la corrosión electroquímica en los hormigones armados.

El hidróxido de calcio es ligeramente soluble en agua y puede ser sacado de la estructura si se mantiene el hormigón en contacto permanente con H<sub>2</sub>O corriente; esto aumenta la porosidad y reduce su resistencia.

El hidróxido de calcio reacciona lentamente con el CO<sub>2</sub> del aire para formar CaCO<sub>3</sub>. De este modo se destruye el efecto protector contra la corrosión del acero de

refuerzo. Este fenómeno se llama "carbonatación" y su importancia depende del contenido de cemento, relación agua / cemento y condiciones climatológicas.

Si se incrementa la velocidad de hidratación, sube el desarrollo de la resistencia a temprana edad, pero se perjudica la resistencia final. La hidratación lenta y retardada permite la formación de una estructura microcristalina (gel) de gran superficie, que da como resultado una buena resistencia. La reacción de hidratación es un proceso exotérmico, es decir, durante la reacción del cemento con el agua se libera calor. La cantidad de calor liberada es bastante importante y se llama "calor de hidratación". Debido a la baja conductibilidad del hormigón, éste funciona como aislante y dentro de una gran masa de hormigón la hidratación produce un gran aumento de la temperatura, hasta 50°C.

La gradiente de temperatura que se produce como consecuencia de este fenómeno puede ser causante de la formación de grietas en el hormigón.

#### **2.1.2.4 Áridos**

Los áridos son materiales pétreos, compuestos de partículas duras de forma y tamaño estables, que pueden ser de origen ígneo, sedimentario o metamórfico o artificial como escorias y arcillas expandidas.

Es el componente inerte del concreto, que representa entre un 65% y un 80% de su volumen y tiene dos funciones principales:

- Proveer una masa de partículas aptas para resistir la acción de cargas aplicadas, la abrasión, el paso de la humedad y la acción climática.
- Resistir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento y los cambios de humedad de la pasta de cemento.

Debe darse una gran atención a la elección y control ya que de sus características depende:

- a) Docilidad del concreto u hormigón fresco
- b) Resistencia del concreto u hormigón endurecido
- c) Durabilidad de las estructuras
- d) La economía de las mezclas

Los requisitos generales que deben cumplir los áridos para la fabricación de concreto u hormigón están contenidos en la norma chilena NCh 163. Of79. Aspectos que se deben tener en cuenta en el estudio de los áridos son:

- sus propiedades internas

- cualidades de la superficie
- propiedades en conjunto

Además se deben tener en cuenta condiciones que deben cumplir para una buena integración en el hormigón como son:

- condiciones de trabajabilidad
- condiciones de resistencia propia
- condiciones de estabilidad físico-químicas.

La granulometría de los áridos tiene una gran influencia sobre las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Para obtener la misma trabajabilidad, un árido de granulometría fina necesitará, por lo general, una mayor proporción de agua que uno de granulometría gruesa. El tamaño máximo del árido grueso estará de acuerdo con la naturaleza del trabajo.

En los áridos la forma de las partículas y su textura superficial influyen más a las propiedades del hormigón fresco que a las propiedades del hormigón endurecido. Las partículas de textura áspera o partículas alargadas y laminadas requieren más agua para producir un hormigón trabajable, que los áridos redondos o cúbicos.

En algunas áreas, los áridos con ciertos constituyentes químicos reaccionan con los álcalis del cemento. Esta reacción de árido-álcali (Reacción ASR), puede causar una expansión anormal y grietas en el hormigón. Es necesario que sean químicamente estables.

### Áridos para morteros

Los morteros están compuestos normalmente por un solo tipo de árido fino, o arena, de tamaño máximo no superior a 5 (mm.) En algunos casos especiales, la arena se utiliza separada en dos fracciones: una de granulometría gruesa y otra más fina.

En el caso de los morteros, la aplicación de los principios que rigen a los áridos no puede hacerse en forma discriminada y debe ser analizada con cuidado, tomando en cuenta dos consideraciones claves que distinguen a los morteros de los hormigones:

- La relación árido fino/cemento es generalmente distinta a la de los hormigones, lo cual implica que, especialmente en lo que concierne a los constituyentes aportados por el árido fino (por ejemplo granos finos de tamaño inferior a 0.080 (mm.), sales solubles), los valores normalizados para los hormigones pueden no ser aplicables. Constituyen en consecuencia, un punto de investigación futura.
- Las características del árido influyen significativamente en las características del mortero y, en consecuencia, dependen en forma importante de la función que éste vaya a desempeñar. (Cárcamo, 2006).

### 2.1.2.5 Aditivos

Según ASTM. aditivo es el material, además del cemento, agua y áridos, que se añade al hormigón o mortero inmediatamente antes o durante el mezclado.

El objeto de añadir aditivos es el de modificar, acentuar o conferir alguna propiedad que de por sí la mezcla no posee, y hacerla temporal o permanente durante su estado fresco o endurecido.

Se presenta en forma de polvo o líquido. Los aditivos líquidos se emplean diluidos en agua y los aditivos en polvo se prefiere sean agregados directamente al cemento. Se aplican en dosis pequeñísimas que varían de entre un 0,1% y un 5% del peso del cemento y su efecto es de índole físico, químico o físico-químico. Esta dosis empleada tiene directa relación con la magnitud del efecto, debiéndose en todo caso respetar los límites recomendados por el fabricante y el aporte de sustancias dañinas en el hormigón. Los aditivos se pueden clasificar como:

- Aditivos incorporadores de aire
- Aditivos plastificantes (reductores de agua)
- Aditivos retardadores
- Aditivos aceleradores
- Aditivos impermeabilizantes
- Aditivos expansivos.
- Misceláneos (agentes para lechadas de sellado y agentes formadores de gas).

El uso de aditivos esta condicionado a:

- a) Que se obtenga el resultado sin tener que variar sustancialmente la dosificación básica.
- b) Que el aditivo no tenga efectos negativos en otras propiedades del concreto.
- c) Que un análisis de esto justifique su empleo

El hormigón debe ser trabajable, terminable, resistente, durable, impermeable y resistente al desgaste. Estas cualidades se pueden obtener a menudo más conveniente y económicamente por medio del cálculo apropiado de la mezcla y la selección de materiales adecuados sin recurrir a aditivos, con excepción de los agentes incorporadores de aire cuando sean necesarios. Sin embargo, puede haber casos en que se requieran ciertas propiedades especiales, tales como: tiempo de fraguado prolongado, aceleración de la resistencia a corta edad, atrasar el desarrollo del calor de hidratación. En estos casos es aconsejable considerar e investigar ciertos aditivos, ya que su uso en el hormigón puede producir los efectos especiales deseados. En algunos

casos se puede desear propiedades que sólo son posibles de obtener con la ayuda de aditivos.

No obstante, no se puede considerar a ningún aditivo como sustituto de la buena práctica de hormigonado. La trabajabilidad de las mezclas y la calidad del hormigón se pueden mejorar por medio de ajustes en la granulometría de la mezcla de áridos y por medio del uso de agentes incorporadores de aire, humidificantes y dispersadores del cemento.

Las mezclas de ensayo siempre deben hacerse con el aditivo y los materiales de trabajo, ya que la acción de un aditivo está muy influenciada por la composición del cemento y por otros aditivos.

Antes de usar un aditivo se debe tener presente que:

- a) Todo empleo de aditivo presume un buen hormigón.
- b) Antes de decidir el empleo de un aditivo se debe verificar si es posible obtener la propiedad deseada mediante la modificación de los componentes del hormigón y las condiciones de la obra.
- c) Se debe considerar, además de las ventajas, sus inconvenientes, limitaciones, contraindicaciones y compatibilidades.
- d) El efecto que produce el aditivo se debe medir mediante ensayos de laboratorio y resultados de faenas.

Pese a que no se menciona, condiciones bastante similares en referencia a los aditivos se aplican también en el caso de los morteros, es importante destacar eso sí, que son de un carácter más limitado, referentes más que nada a mejorar las propiedades de morteros para relleno, autonivelantes, de inyección, constituyendo una parte fundamental de su tecnología. (Cárcamo, 2006)

## 2.2 Nanociencia y Nanotecnología

La Nanociencia es un área emergente de la ciencia, revolucionaria en diversos ámbitos (biología, medicina, ingeniería, construcción, etc.), que se ocupa del estudio de los materiales de muy pequeñas dimensiones. No puede denominarse química, física o biología dado que los científicos de este campo están estudiando un campo dimensional muy pequeño para una mejor comprensión del mundo que nos rodea. La nanociencia se define como una ciencia que se ocupa del estudio de fenómenos y manipulación de materiales a escala atómica cuyo tamaño es desde cientos a décimas de nanómetros.

El concepto de nanotecnología fue presentado en 1959 por el físico Richard Feynman, quien exploró la posibilidad de manipular el material en la escala de átomos individuales y moléculas, introduciendo la capacidad creciente de examinar y controlar el material a escalas nanométricas.

Es así como es posible definir la nanotecnología como el diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nanoescala.

Para comprender el potencial de esta tecnología es clave saber que las propiedades físicas y químicas de la materia cambian a escala nanométrica, lo cual se denomina efecto cuántico. La conductividad eléctrica, el color, la resistencia, la elasticidad, la reactividad, entre otras propiedades, se comportan de manera diferente que en los mismos elementos a mayor escala. Por lo tanto, científicos utilizan la nanotecnología para crear materiales, aparatos y sistemas novedosos y poco costosos con propiedades únicas (Euroresidentes, 2006).

El significado del prefijo "nano" es una dimensión: 10 elevado a -9.

- Esto es: 1 nanómetro = 0,000000001 metros.
- Es decir, un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro, o millonésima parte de un milímetro.
- También: 1 milímetro = 1.000.000 nanómetros (nm.).

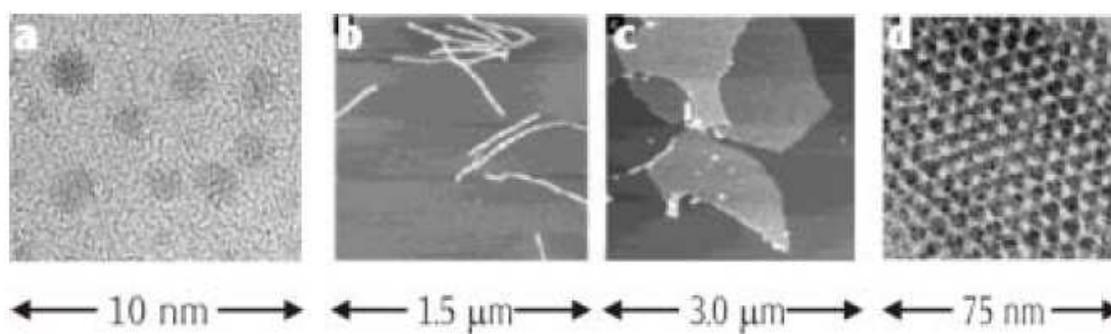
Como se mencionó anteriormente la nanociencia y nanotecnología tienen su fundamento en el estudio de los fenómenos ocurridos en la nanoescala, que dentro de esta investigación, relacionada con el área de materiales de ingeniería, involucra directamente el estudio de materiales nanométricos o nanomateriales.

## 2.2.1 Nanomateriales

### ¿Qué son los nanomateriales?

Los nanomateriales son una clase de materiales (sean cerámicos, metales, semiconductores, polímeros, o bien una combinación de estos), en donde sus dimensiones se encuentran entre 1 y 100nm. Estos presentan una transición entre moléculas y átomos, y un material con dimensiones de sólido volumétrico (bulk). Mientras que un material de orden micrométrico aun presenta propiedades similares a la de un sólido volumétrico (bulk), en los nanomateriales, debido a su tamaño reducido a unos cuantos nanómetros, se modifican sus propiedades que finalmente difieren del mismo material con dimensiones de sólido volumétrico, de las moléculas y los átomos. De acuerdo al número de dimensiones que se encuentren en el régimen nanométrico, los nanomateriales se pueden clasificar en cuatro tipos (Gutiérrez, 2005):

- a) Materiales de dimensión cero: las tres dimensiones se ubican en el régimen nanométrico, a esta corresponden las nanopartículas.
- b) De una dimensión, teniendo una longitud variable, conservan una sola dimensión en el régimen de nanómetros, como es el caso de nanoalambre y nanotubos.
- c) De dos dimensiones: con áreas de tamaño indefinido, mantienen su espesor en el orden e 1 a 100nm, como en el caso de películas delgadas.
- d) De tres dimensiones: en que los sólidos tridimensionales están formados por unidades nanométricas.



**Figura 2.1:** Clasificación de nanomateriales: a) 0-D, nanopartículas de oro; b) 1-D, fibras poliméricas; c) 2-D, películas poliméricas y d) 3-D superred obtenida por auto samblaje de nanopartículas de oro. (Fuente: Gutiérrez, 2005).

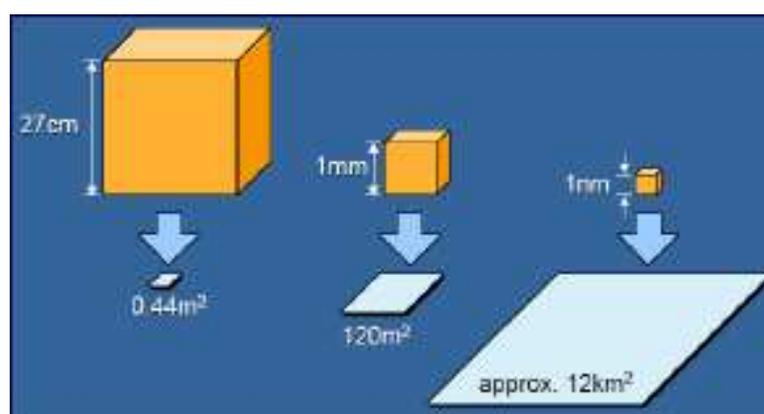
Aunque el interés por el estudio de los nanomateriales surgió con fuerza en las últimas décadas, estos ya existían desde hace varios siglos atrás. Las nanopartículas específicamente, han existido en el planeta por siglos, algunos ejemplos son partículas de humo y las nanopartículas dentro de bacterias. Más adelante en algunas

civilizaciones antiguas ya se utilizaban, aprovechando sus propiedades ópticas y medicinales.

### **Efectos producidos por las nanopartículas**

A medida que la dimensión de las partículas se reduce, sobre todo en el intervalo de 1 a 10nm los efectos de tamaño y de superficie son cada vez más notables. Entre el efecto de tamaño mas importantes, se ha determinado el confinamiento de los electrones, lo que implica una manifestación de efectos cuánticos en el material y que pueden percibirse a través de sus propiedades de conducción electrónica, magnéticas, etc. Es por esto que a este tipo de partículas se les ha conocido también como puntos cuánticos.

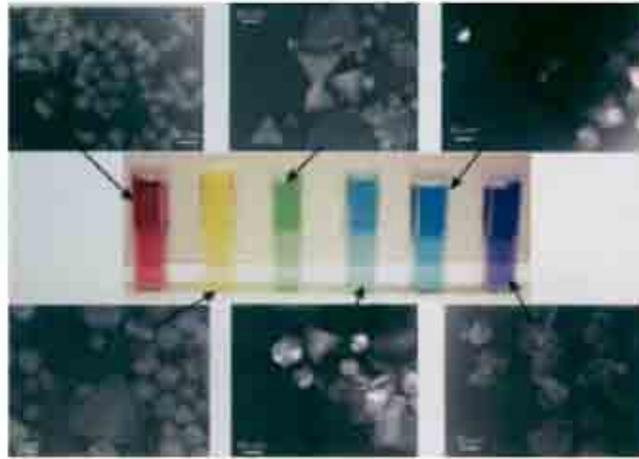
Por otra parte los efectos de superficie también son de gran importancia, ya que se tiene en las partículas pequeñas un incremento en áreas superficiales por unidad de volumen y en energías libre superficiales respecto a los sólidos volumétricos.



**Figura 2.2:** Incremento en áreas superficiales en materiales por la utilización nanopartículas. (Fuente: Gutiérrez, 2005).

Debido a que los átomos en la superficie de la nanopartícula están menos enlazados que el resto de sus átomos y su esfera de coordinación está incompleta, se incrementa su energía libre superficial, afectando las propiedades como temperatura de fusión de nanopartículas de Pt se reduce de 1773°C en un sólido volumétrico a 600°C en nanopartículas de 8nm en promedio.

Por otra parte la absorción óptica en nanopartículas también es un fenómeno de superficie que se modifica, y se puede modular dependiendo de las características de la partícula (composición, tamaño, protectores de superficie, etc.), como se presenta en el ejemplo de la figura 2.3, haciéndose evidente al encontrarse en una dispersión coloidal.



**Figura 2.3:** Dispersiones coloidales de nanopartículas metálicas. Obsérvese que el color de la dispersión depende de las características de las nanopartículas. (Fuente: Gutiérrez, 2005)

### **Aplicaciones de los nanomateriales**

Existen diversas aplicaciones de nanopartículas metálicas, cerámicas y poliméricas las cuales se mencionan a continuación:

- Medicina: gasas para quemaduras serias o heridas crónicas, contienen nanopartículas de plata. La plata es un bactericida, que en forma de nanopartículas incrementa el área superficial mejorando la eficiencia antibacteriana contra 150 tipos de microbios, incluyendo los resistentes a drogas. Crema para dolores musculares y adhesivos dentales, etc.
- Deportes: pelotas de golf que corrigen vibraciones o pequeños corrimientos, canalizando la energía recibida del palo de golf, mejor que las pelotas convencionales. Pelotas de tenis, recubiertas de nanopartículas para alargar su duración.
- Higiene: desinfectantes de grado militar, utilizado en aviones para combatir el problema del SARS (síndrome respiratorio agudo severo) a base de nanoemulsiones.
- Materiales para la construcción: recubrimientos super-hidrofóbicos, repelentes de mugre. Se emplea como recubrimientos de concreto, ladrillos y yeso. Es un aditivo a base de nanopartículas utilizado para reforzar el efecto hidrofóbico en materiales de construcciones, reduciendo la adhesión al agua y partículas de tierra al mínimo.

## 2.2.2 La llegada de la nanotecnología al concreto

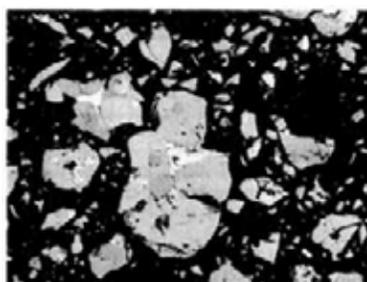
### 2.2.2.1 Concreto a escala nanométrica

El concreto es un material poroso, con diferentes tipos de poros, generados por los vacíos de aire que queda atrapado en el proceso de mezclado, estos vacíos pueden ser de gran tamaño, arriba de algunos milímetros de diámetro para los “poros capilares”, los cuales son esencialmente espacios ocupados por agua después del mezclado; hasta poros a escala nanométrica los cuales existen en algunos productos de hidratación generados por la reacción química cemento-agua. A esta nanoescala entonces, se produce el proceso de hidratación e interacción entre el calcio y silicatos, cuyo producto es en definitiva el que “pega” las diferentes capas de concreto y mortero, y lo convierte en una estructura monolítica, es por ello que se dice que “ambos (concreto y mortero) de alguna manera son materiales a nanoescala”.

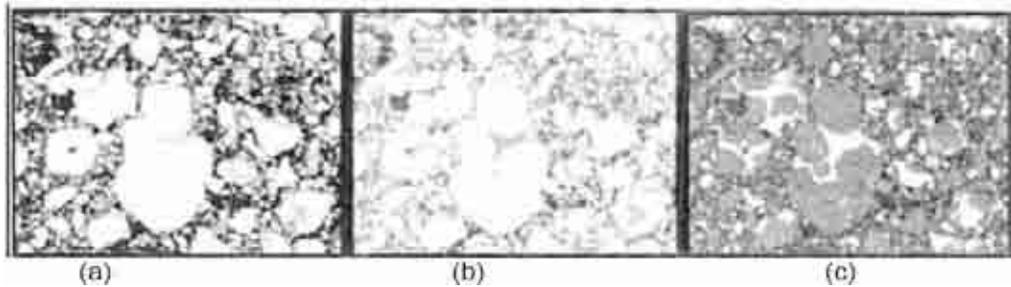
#### Conocimiento en detalle.

Hay principalmente dos modelos microestructurales que han sido desarrollados a escala de la pasta de cemento (micrómetros o menos) y a escala del concreto (milímetros).

Para la pasta de cemento, se usa un modelo celular automatizado, el cual opera mediante una imagen digital tridimensional de partículas de cemento en multifase. La información a partir de las partículas es obtenida mediante un microscopio de barrido y escaneo de neutrones y análisis de Rayos X. La Figura 2.5 muestra las distribuciones espaciales para: a) el calcio, b) el silicio, c) el aluminio. Se destaca que el aluminio solo aparece en las capas intersticiales, conectando principalmente los granos de calcio y silicio. Este modelo es válido para cualquier tipo de hidratación de cemento que se desarrolle correctamente. La información de los Rayos X es mostrada en la Figura 2.4 y es usada para identificar la distribución espacial de los componentes químicos de un cemento estándar a nivel de partículas.



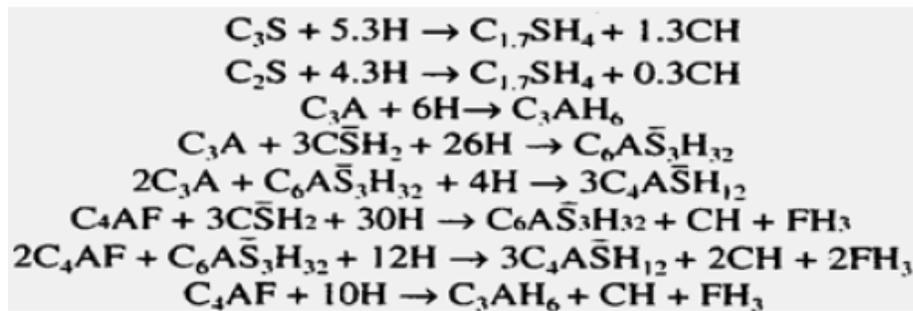
**Figura 2.4:** Una imagen del polvo de cemento dispersado en epoxi. El tamaño de las partículas ronda los 50  $\mu\text{m}$ . de ancho. La naturaleza de multifase de esta mezcla es apreciada de acuerdo a la diferente escala de grises. (Fuente: Cárcamo, 2006).



**Figura 2.5:** Diferentes imágenes de las mismas partículas de cemento. Es interesante notar como los diferentes químicos están ubicados en la microestructura, e incluso en el polvo de cemento. a) Imagen del calcio, b) imagen del silicio, c) imagen del aluminio. La escala de grises es mas fuerte cuando hay menor cantidad de los elementos de interés presente. Notar que el aluminio esta ubicado preferentemente en las regiones intersticiales entre los grupos de calcio-silicio. (Fuente: Cárcamo, 2006)

Algo de la compleja reacción química correspondiente a la hidratación del cemento es mostrado en la Figura 2.6, donde las reacciones principales entre las fases Silicato, Aluminato, Ferrita, Sulfato y el agua son presentados, usando notación química estándar para el cemento, esto es:

C= CaO, S= SiO<sub>2</sub>, H= H<sub>2</sub>O, F=FeO<sub>2</sub>, A= Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Figura 2.6:** Reacciones del modelo de cemento, de acuerdo a la notación química mencionada anteriormente. (Fuente: Cárcamo, 2006).

A escala milimétrica se han usado modelos para predecir de una manera exitosa la difusividad de iones en los espacios porosos del concreto (en este caso). La distribución de los agregados a escala de partículas es obtenida a partir de estos modelos, se puede apreciar de lo anterior que la matriz de pasta de cemento es alterada por la presencia de los agregados, los cuales son generalmente más porosos que la matriz de pasta.

Este tipo de modelación, usa partículas esféricas, los cuales son adecuados para algunas propiedades como la "difusión iónica", donde los agregados tienen cero propiedades al ser comparados con la matriz de pasta de cemento. En este caso, se aprecia que las formas hacen muy poca diferencia. Sin embargo, muchas otras propiedades tales como la reología del concreto en estado líquido y la elasticidad en estado sólido tienen una dependencia respecto a la forma de los agregados.

A escala nanométrica, el concreto ha sido objeto de trabajos de modelación a través de pruebas experimentales con bastantes similitudes entre las predicciones de

los modelos y los resultados experimentales. Un importante desarrollo en ésta área ha sido el uso de técnicas de Dinámica Molecular para analizar la interacción de varios iones con superficies resultantes del proceso de hidratación del cemento. Esta aplicación puede abrir el camino a la escala atómica, de manera de comprender y controlar a cabalidad las estructuras de concreto. Al igual que los criterios anteriores, podemos caracterizar al hormigón como un material poroso, debido a “burbujas” de aire, que son porosidades a escala nanométrica producidas por la reacción química cemento-agua. A partir de estos poros a nanoescala hay un control del producto de la hidratación calcio-silicato-hidratos la cual es el principal pegamento que une al concreto. (Cárcamo, 2006).

### **2.2.2.2 Concreto con nanosílice**

Como se menciona anteriormente un nanomaterial correctamente diseñado y desarrollado produce resultados mejores y más económicos que los materiales tradicionales, gracias a la estabilización y refuerzo de propiedades de la materia a un nivel mil veces más pequeño que el antiguo nivel: “micro” (0.000001 mt.).

#### **2.2.2.2.1 Estudios relacionados al concreto con nanopartículas de sílice**

Las propiedades mecánicas de morteros de cemento con nanopartículas de sílice han sido analizadas y los resultados experimentales mostraron aumentos en las resistencias a compresión y flexurales de morteros que contienen estas nanopartículas. Más aun, la resistencia de los morteros de cemento con nanopartículas fue mayor que la resistencia de los morteros con silicio en polvo. Además estudios SEM indican que las partículas de nanosílice proporcionaron el llenado de los poros y disminuyeron el contenido de hidróxido de calcio dentro de los productos de la hidratación. Son estos los efectos que producen la mejora en las propiedades mecánicas de los morteros de cemento con nanopartículas.

Estudios de laboratorio de grandes volúmenes de “cenizas volátiles” (fly ash) de hormigón de alta resistencia que incorporan nanosílice fueron realizados por investigadores, estos estudios de los procesos de hidratación confirman que la actividad puzolánica de la ceniza volátil puede ser significativamente mejorada por la aplicación de este material. Se concluyo que el uso de nanosílice llevo a aumentar la resistencia última de altos volúmenes de hormigón a temprana edad. El hormigón desarrollado con nanosílice tiene una resistencia un 81% superior al ser comparado al hormigón normal.

La resistencia del hormigón desarrollado tras dos años fue de 115,9 Mpa. (Más alta que la resistencia del concreto con cemento Pórtland de referencia que fue de 103,7 Mpa.).

También se han efectuado investigaciones en hormigones autocompactantes con aditivos minerales (caliza molida, cenizas volátiles y cenizas volátiles molidas). El nanosílice (5-50 nm.) con una dosis del 1 a 2% con respecto a la cantidad de cemento fue usada como agente modificador de la viscosidad. Una razón constante agua/cemento (A/C) de 0,58 fue usada en todas las mezclas, y un flujo de 780-800 mm. fue mantenido ajustando la dosificación de superplastificante basados en polímeros acrílicos. Para mantener el flujo especificado la dosis de superplastificante fue aumentada 0,21% para cada porcentaje de nanosílica utilizada. La adición de nanosílice hace la mezcla de hormigón mas cohesiva y reduce el “sangramiento” y la segregación.

Aunque las nanopartículas de sílice no afectan la resistencia a compresión del hormigón que contiene varios tipos de “cenizas volátiles”, la resistencia a compresión del hormigón que contiene caliza molida disminuyo ligeramente. El mejor desempeño fue mostrado para el hormigón con cenizas volátiles correspondiente a un 2% de nanosílica y 1,5% de superplastificante. Este concreto tiene una elevada resistencia a la compresión de 55 (MPa.) a una edad de 28 días con un comportamiento deseado en estado fresco, esto es: “bajo sangrado”, “buena cohesión”, “buen asentamiento de cono”. La investigación también muestra que la nanosílica no afecto la durabilidad del hormigón.

Una de las primeras mezclas nanoaditivas comerciales para hormigones y morteros, GAIA, fue desarrollada por ULMEN S.A. y SciTech Cognoscible para sustituir el polvo de sílice en las mezclas de hormigón, que cuenta con certificación ISO 14001 “Sistema de manejo medioambiental”. El producto esta disponible en forma liquida y facilita por lo tanto la distribución satisfactoria de las partículas de nanosílice en el hormigón. GAIA combina los efectos de disminución de la cantidad de agua y aumento del asentamiento de cono de la mezcla (mejora en la trabajabilidad). De acuerdo a Ferrada y sus colaboradores, las mezclas de hormigón con GAIA muestran perfecta trabajabilidad sin segregación o “sangrado”. Esto hace el diseño del concreto autocompactante una tarea sumamente fácil. En la Tabla 2.8 se muestra el efecto de GAIA en el comportamiento de las mezclas de hormigón.

**Tabla 2.8:** Efectos de GAIA Nanosílice en mezclas de hormigón.

| Parámetros de mezcla                       | Sin GAIA     | Con GAIA     |
|--|--------------|--------------|
| Tipo de cemento (EN-197)                   | II/A-P 42.5R | II/A-P 42.5R |
| Contenido de cemento (Kg./m <sup>3</sup> ) | 460          | 460          |
| Dosificación                               |              | 1,3%         |
| Contenido de aire                          | 2,7%         | 1,1%         |
| Asentamiento de cono (mm.)                 |              |              |
| Después de 5 minutos                       | 60           | 200          |
| Después de 30 minutos                      | 25           | 210          |
| Después de 60 minutos                      | 15           | 160          |
| Después de 90 minutos                      |              | 140          |
| Temperatura ambiente (°C)                  | 20           | 20           |
| Resistencia a la Compresión (MPa.)         |              |              |
| 1 día                                      | 22,7         | 68,2         |
| 7 días                                     | 32,7         | 77,3         |
| 28 días                                    | 45,2         | 91,7         |

Fuente: Cárcamo (2006).

La aplicación de GAIA a una dosis del 1,3% (en peso seco de cemento) proporciona casi un aumento al doble de la resistencia a la compresión del hormigón a edades de 7 y 28 días. La resistencia inicial del concreto es de 68,2 MPa., la cual es del orden de tres veces mas alta que el hormigón de referencia. A los 28 días la resistencia a la compresión del hormigón fabricado con GAIA muestra una dependencia normal respecto a la razón agua-cemento (A/C); y en base a pruebas efectuadas es posible predecir la resistencia a los 28 días de los hormigones investigados.

#### **2.2.2.2 Nanosílice como aditivo**

GAIA Nanosílice, nombre comercial del aditivo, ha sido creada como producto principal, para ser usada directamente en el concreto u hormigón, es sílice en estado líquido, formada por partículas en estado nanométrico.

#### ¿Qué es la nanosílice?

La nanosílice consiste en nanopartículas de sílice modificadas químicamente para permitirles estar en solución, ser estables, tener aún mejores propiedades que la microsílice, y con la ventaja adicional de no contaminar; ni al medio ambiente ni a los operadores, y de carecer de sus desventajas de aglomeración y retracción. Aparte de su alta superficie efectiva de reacción, la clave de su gran desempeño en comparación con la microsílice, es su mayor reactividad química.

## Forma de uso

Sus dosis recomendadas están entre 0.2 y 2.1% en relación al peso del cemento. No requiere cuidados ni precauciones especiales y se trata como cualquier otro aditivo líquido para el hormigón. En caso de congelación, debe dejarse descongelar y agitar un poco.

**Tabla 2.9:** Propiedades Físicas y Químicas de Gaia Nanosílice

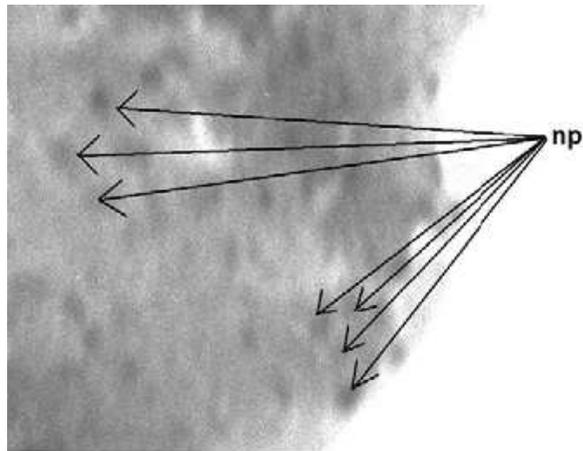
| <b>Propiedades Físicas y Químicas de Gaia Nanosílice</b> |   |
|--|---|
| <b>Aspecto</b>   | Líquido levemente viscoso.  |
| <b>Color</b>   | Verde claro   |
| <b>Densidad ( Kg./Lt)</b>                                | 1.03 ± 0.02   |
| <b>pH</b>  | 5 ± 1   |
| <b>Viscosidad (C.Ford)</b>                               | 13.0 ± 1 seg.   |
| <b>Vida útil</b>   | 6 meses en envase cerrado y almacenado en lugar fresco protegido del sol. |
| <b>Presentación</b>                                      | Bidon Plastico de 200 Kgs. Contenedor retornable de 1.000 Kg.             |

Fuente: Concretonline (2006).

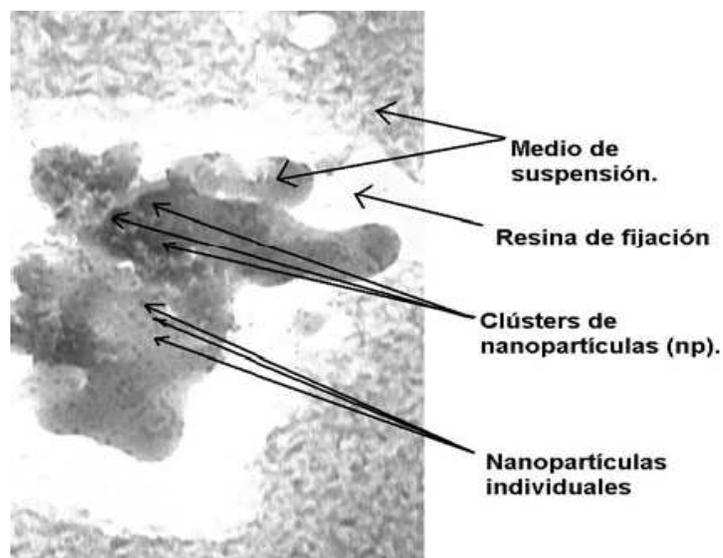
## Caracterización de la nanoestructura de GAIA Nanosílice.

Las nanopartículas de sílice, presentan distribuciones bastante homogéneas, son de color negro o muy oscuras, como una especie de puntos, poseen formas tetraédricas bastante bien definidas, con tamaños individuales que oscilan entre 4.73 (nm.) y 14.19 (nm.). Tiene la tendencia a agruparse en clústeres entre 3 y 5 nanopartículas, con tamaños grupales entre 16.55 (x3) y 35.47 (x5) (nm.), con formas cristalinas relativamente distorsionadas y con bordes bastante irregulares.

En las figuras 2.7 y 2.8 se aprecia en color claro a las sustancias poliméricas en las cuales se encuentran suspendidas las nanopartículas y en un tono un poco más oscuro al anterior a la Resina de fijación que se utiliza en laboratorio para la observación mas óptima de las muestras.



**Figura 2.7:** Detalle imagen microscopio electrónico (TEM), donde se señalan a las nanopartículas (np) individualmente dispersas en el medio de suspensión. (Fuente: Cárcamo, 2006)



**Figura 2.8:** Detalle general imagen obtenida de microscopio electrónico (TEM), donde se aprecian los distintos componentes de la Nanosílice. (Fuente: Cárcamo, 2006)

### ¿Cómo actúa el nanosílice en la concreto?

Cuando la sílice se mezcla con iones de calcio, sodio o potasio, como los productos provenientes de la reacción de hidratación del cemento, produce partículas de CSH (silicato de calcio hidratado), que es el “*pegamento*” del concreto, lo que mantiene cohesionado a todas sus partículas.

Al estar en tamaño nanométrico, Gaia produce partículas de CSH con un tamaño de entre 5nm y 250nm, nano-CSH, lo que mantiene cohesionado a todas sus partículas, reforzando la estructura del hormigón a un nivel mil veces más pequeño que el concreto tradicional, generando una alta superficie efectiva (GAIA tiene 1,000 m<sup>2</sup>/g frente a 20 m<sup>2</sup>/g de microsíllice), por lo que es posible reducir el uso de cemento, es decir nanosílice es en sí misma un productor de nanocemento.

Además no requiere de superplastificantes porque el nanosílice otorga plasticidad y trabajabilidad excepcional al concreto, lo que hace innecesario el uso de estos.

### Nanosílice, microsílice y sílice precipitada

La microsílice, la sílice precipitada, y la nanosílice, tienen un rango que puede llamarse “similar” en cuanto a tamaño de partículas, pero las dos primeras, al existir como una gran aglomeración de partículas y no como partículas aisladas, tienen una mucho menor área efectiva de superficie en comparación con la nanosílice. De allí la alta velocidad de reacción que presenta la nanosílice y las mayores resistencias que permite a 12 y 24 horas.

**Tabla 2.10:** Características generales de la nanosílice, microsílice y sílice precipitada.

| Tipo               | Densidad (g/mL) | Tamaño de partícula (nm) | Área específica de Superficie (m <sup>2</sup> /g) | Apariencia |
|--------------------|-----------------|--------------------------|---|------------|
| Nanosílice         | 1.15            | 3-150                    | 20-1000   | Líquido    |
| Sílice precipitada | 0.16            | 20-50                    | 20-100  | Polvo seco |
| Microsílice        | 0.3             | 200-1000                 | 15-20   | Polvo seco |

Fuente: Ferrada et al (2003).

Basándose en la bibliografía es posible establecer que al contrastar la microsílice con la nanosílice, la primera presenta una serie de estructuras no homogéneas en su composición y que en el momento de la reacción de hidratación del cemento al combinarse con el hidróxido de calcio formarán una serie de estructuras CSH (silicato de calcio hidratado) poco ordenadas. La nanosílice en cambio, presenta menor cantidad de estructuras componentes, sin embargo es un compuesto mucho mas puro y ordenado, con formas cristalinas más regulares que forman la misma o incluso mayor cantidad de estructuras CSH.

### Propiedades de GAIA Nanosílice

- Versátil: Desde altas resistencias, tanto a compresión como a tracción, a bajas dosis (1-1.5% en peso del cemento) hasta propiedades autocompactante a altas adiciones (2.5%)
- Posee una muy buena trabajabilidad, incluso a valores muy pequeños de la relación agua cemento (A/C) como 0.2. Como consecuencia de lo anterior, el hormigón “se coloca solo” —según los comentarios de los operadores. Esta trabajabilidad hace innecesario el uso de superplastificantes, excepto pequeñas dosis para los hormigones autocompactantes.
- Alta velocidad de reacción.
- Tiene más de 90% de rendimiento que las formulaciones de microsílice, cemento y superplastificantes para el hormigón.



**Figura 2.9:** Comparación de la cantidad de material necesario para obtener un hormigón H-70. (Fuente: Concretonline, 2006)

- Fácil homogenización. Permite a las plantas hormigoneras reducir los tiempos de mezclado y aumentar su producción.
- Tiene entre 0 y 1% de permeabilidad. (NCH 2262)
- Conserva el cono por tiempos superiores a una hora. (Con una relación A/C=0.5 y una dosis de 0.5% por peso del cemento conservó un círculo de 60 cm. por dos horas, con una pérdida de sólo 5%).
- Cumple la normativa ISO-14001. Es amistosa del medio ambiente y de la salud de los operarios de sílice.
- Mismo precio que usar microsílice tradicional con superplastificantes y/o fibras asociados.

### Aplicaciones

- Grouts.
- Lechadas para pernos (60-70 MPa. en 24 horas).
- Shotcrete.

- Hormigones autocompactantes.
- Hormigones prefabricados (30-50 Mpa. en 6-8 horas según requerimientos).
- Hormigón fast-track (40 MPa. a 4 horas).
- Hormigones de alta resistencia.
- Hormigones de alto desempeño.
- Hormigones ligeros de baja densidad.
- Lechadas para pozos petroleros.
- Pavimentos.
- Hormigones marinos.
- Puentes.
- Vigas pre y postensadas.
- Vigas al vapor.
- Y todas las aplicaciones tradicionales de microsilíce.

#### Caracterización de la microestructura de morteros de cemento con adición de nanosilíce

A mayor porcentaje de nanopartículas se tiene mayor consistencia y más aglomeración, con menos espacios entre los microconstituyentes del mortero lo que le da una morfología distinta en relación a una muestra patrón, que no tiene adiciones de nanosilíce. Esto que se aprecia a nivel superficial, tiene gran relación en cuanto al comportamiento (quizás no precisamente directa), con lo que ocurre al interior de las muestras, lo que implica mejores propiedades de los materiales ante la distribución de cargas, porosidad, microgrietas. Esto implica mayores resistencias a flexotracción y compresión por ejemplo, dada la menor existencia de vacíos por la mayor presencia de nanopartículas (nanocemento) lo que implica mayores dosis, mejor distribución de esfuerzos como la menor posibilidad de agrietamiento y la homogeneidad de la mezcla, entre otros. (Cárcamo, 2006).

## 2.3 Durabilidad del concreto

La durabilidad del concreto ha sido un tema importante por muchos años debido a su significancia que trasciende en el nivel de servicio del concreto o de las estructuras de concreto reforzado, además del gran impacto económico en el sector de la construcción.

El código de diseño ACI define la durabilidad del concreto de cemento Pórtland como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, la abrasión, o cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzca deterioro del concreto. La conclusión primordial que se desprende de la definición anterior, es que la durabilidad no es un concepto absoluto que dependa solo del diseño de mezcla, sino que esta en función del ambiente de exposición y las condiciones de trabajo a las cuales lo sometamos, punto en el cual se centrará esta investigación. En este sentido, no existe un concreto “durable” por si mismo, ya que las características físicas, químicas y mecánicas que pudieran ser adecuadas para ciertas circunstancias no necesariamente lo habilitan para seguir siendo “durable” bajo condiciones diferentes.

Tradicionalmente se asoció la durabilidad a las características resistentes del concreto y particularmente a su resistencia en compresión, pero las experiencias prácticas y el avance de la investigación en este campo han demostrado que es solo uno de los aspectos involucrados, pero no el único ni el suficiente para obtener un concreto durable. El problema de la durabilidad es sumamente complejo, en la medida en que cada situación de exposición y condición de servicio ameritan una especificación particular tanto para los materiales y diseño de mezcla, como para los aditivos, la técnica de producción y el proceso constructivo, por lo que es usual que en este campo las generalizaciones resulten nefastas.

Bryant Mather, uno de los pioneros en la investigación en la Tecnología del Concreto y en el área de la durabilidad indica en uno de sus trabajos: “Está demostrado científicamente que las estructuras de concreto se comportan inadecuadamente debido a que las especificaciones técnicas fueron deficientes o que éstas fueron correctas pero no se siguieron en la obra”. No se debe copiar o “adaptar” especificaciones técnicas locales y foráneas para proyectos y situaciones que muestren similitudes aparentes, pero que, sin embargo, desde el punto de vista de la tecnología del Concreto y la durabilidad, se requiere una evaluación y criterios particulares.

Se ha demostrado que las adiciones al cemento pueden ser utilizadas para reducir el calor asociado con la hidratación del cemento y reducir el potencial de fisuración térmica en elementos estructurales masivos. Estos materiales modifican la

micro-estructura del concreto y reducen su permeabilidad por lo que consecuentemente reducen la penetración de aguas y sales disueltas en el hormigón. La impermeabilidad del concreto reducirá varias formas de deterioro del mismo, tales como la corrosión del acero de refuerzo y el ataque de químicos. Las mayorías de las adiciones al cemento reducen la expansión interna del concreto debido a reacciones químicas tales como la reacción árido álcali y ataques de sulfatos. La combinación óptima de materiales varía para diferentes requisitos de desempeño y para el tipo de adición. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2006)

### **2.3.1 Factores que afectan la durabilidad del concreto**

Son diversos los factores que conducen la durabilidad del concreto, esta se puede determinar por agentes externos y agentes internos o propios de concreto. Los agentes externos son aquellos provenientes del medio en el cual se encuentre el elemento, que implican el ingreso de fluidos agresivos que se encuentran en su ambiente circundante, seguido de procesos físicos o químicos que atacan provocando una perturbación de su estructura y superficie, con frecuencia aportando al desarrollo de fuerzas expansivas y de interrupción. Los agentes de tipo interno o propios del concreto provocan un daño algo similar, influido principalmente por cambios de humedad, mal diseño o fabricación de las mezclas, errores de estalación, etc. Claramente, la capacidad del concreto para limitar estos procesos influye en la durabilidad y el grado de deterioro de él. Los factores que afectan la durabilidad del concreto, son aquellos que producen el deterioro o degradación del mismo.

A continuación se discute las principales causas que provocan el deterioro del hormigón y presenta recomendaciones acerca de cómo evitar estos daños. No se consideran factores que afecten la durabilidad de las armaduras embebidas en el concreto, ya que como esta investigación no comprende concretos u hormigones armados, sino que concretos con árido fino, mortero, por lo que no se realizará un análisis de ellos.

#### **2.3.1.1 Congelamiento y deshielo**

El congelamiento y deshielo, constituye un agente de deterioro que ocurre en los climas en que la temperatura desciende hasta provocar el congelamiento del agua contenida en los poros capilares del concreto.

En términos generales el fenómeno se caracteriza por introducir esfuerzos internos en el concreto que pueden provocar su fisuración reiterada y la consiguiente

desintegración. Este fenómeno, se da tanto a nivel de la pasta de cemento, como en los agregados de manera independiente, así como en la interacción de ambos por lo que su evaluación debe abordar cada uno de estos aspectos.

- *Efecto en la pasta de cemento*, existe dos teorías que explican el efecto en el concreto. La primera se denomina de “presión hidráulica”, que considera que dependiendo del grado de saturación de los poros capilares y poros del gel, la velocidad de congelación y la permeabilidad de la pasta, al congelarse el agua en los poros ésta aumenta de volumen y ejerce presión sobre el agua aún en estado líquido, ocasionando tensiones en la estructura resistente. Si estas tensiones superan los esfuerzos últimos de la pasta, se produce la rotura.

La segunda teoría llamada de “presión osmótica” asume las mismas consideraciones iniciales de la anterior pero supone que al congelarse el agua en los poros cambia la alcalinidad del agua aún en estado líquido, por lo que tiende a dirigirse hacia las zonas congeladas de alcalinidad menor para entrar en solución lo que genera en una presión osmótica del agua líquida sobre la sólida ocasionando presiones internas en la estructura resistente de la pasta con consecuencias similares al caso anterior.

Bajo ambas teorías al producirse el descongelamiento o deshielo, se liberan las tensiones y al repetirse este ciclo muchas veces se produce la rotura por fatiga de la estructura de la pasta, si es que no se produjo inicialmente.

- *Efecto en los agregados*. En los agregados existe evidencia de que por los tamaños mayores de los poros capilares se producen generalmente presiones hidráulicas y no osmóticas; con esfuerzos internos similares a los que ocurren en la pasta de cemento, existiendo indicios que el tamaño máximo tiene una influencia importante, estimándose que para cada tipo de material existe un tamaño máximo por debajo del cual se puede producir el congelamiento confinado dentro del concreto sin daño interno en los agregados. Por otro lado cuando menor sea la capacidad del agregado para absorber agua, menor será el efecto del congelamiento interno de la misma que tienen baja durabilidad ante la acción de ciclos de congelación, son aquellos con un grado de porosidad de moderado a alto, lo que les permite retener y mantener un grado de saturación relativamente alto, cuando se encuentran incorporados ya en el concreto.
- *Efecto entre la pasta y los agregados*, Existe la denominada “Teoría Elástica” que considera un efecto mixto de los agregados sobre la pasta; ya que al congelarse el agua dentro de ellos se deforman elásticamente sin romperse por tener una estructura más resistente que la del cemento y ejercen presión directa

sobre la pasta generando tensiones adicionales a las ocasionadas en el cemento independientemente. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2006)

### Control de la durabilidad frente al congelamiento y deshielo

#### - Aditivos incorporados de aire:

En concretos normales, existe un promedio de 1% de poros de aire atrapado, los cuales no son suficientes para evitar el deterioro del concreto cuando el agua llega a congelarse en los poros saturados del mismo. Ello es debido a que los poros de aire atrapado no se encuentran lo suficientemente cerca de todos los poros capilares, en los que el hielo puede formarse y por tanto no son una ayuda segura en el control de los esfuerzos resultantes.

El principio de los incorporadores de aire, consiste en introducir una estructura adicional de vacíos no interconectados, que permiten asimilar los desplazamientos generados por el congelamiento eliminando las tensiones. Para que sea realmente efectivo el control del efecto de congelamiento y deshielo, se requiere que la distancia máxima que debe existir entre las partículas de la pasta y los vacíos introducidos por el incorporador de aire, sea de 0.2 mm., al cual se le denomina "Factor de espaciamiento".

El aire incorporado, al aumentar la porosidad de la pasta, causa reducción en las resistencias mecánicas del concreto; pero el incremento de la trabajabilidad permite disminuir los contenidos de agua y agregado fino de mezcla, reduciendo así la pérdida de resistencia.

#### - Curado

No se puede pensar que sólo con los aditivos incorporadores de aire se soluciona el problema, si no le damos al concreto la posibilidad de desarrollar resistencia, de nada servirá la precaución anterior entre la fatiga que va produciendo la alternancia de esfuerzos en los ciclos de hielo y deshielo.

Para que el concreto tenga un desarrollo normal de resistencia en el tiempo, debe curarse, como referencia, a una temperatura de por lo menos 13°C para un elemento de 30cm. de espesor y 5°C para espesores del orden de 1.80m.; por lo que debe procurarse mantener la temperatura adecuada mediante elementos aislantes que impidan que pierden calor y/o se evapore el agua, o se congele hasta que halla desarrollado al menos 35 Kg/cm<sup>2</sup>.

Hay que recordar siempre el principio básico que se desprende de comprender el mecanismo de hidratación del cemento y que consiste en que las reacciones

químicas necesitan agua, espacio para desarrollar los productos de hidratación, cierta temperatura y tiempo.

Mientras se controle los factores mencionados mediante el curado, se asegurará el desarrollo completo de las propiedades del concreto y favoreceremos a la durabilidad.

En conclusión, el uso de los aditivos incorporadores de aire debe ir complementado con un buen curado que asegure el desarrollo de resistencia.

#### - Diseños de mezcla

Los diseños de mezcla deben ejecutarse buscando concretos con la menor permeabilidad posible, lo cual se logra reduciendo la relación agua/cemento a mínimo compatible con la trabajabilidad para lo cual el Código de Diseño ACI recomienda relaciones entre 0.45 y 0.50.

Los aditivos incorporadores de aire, tienen un efecto mínimo en combatir el congelamiento en los agregados, para lo cual es útil el ensayo de durabilidad de los agregados, que da una idea del comportamiento ante el intemperismo.

### **2.3.1.2 Abrasión**

Se define la resistencia a la abrasión como la habilidad de una superficie de concreto a resistir el desgaste por roce, frotamiento y fricción. Este fenómeno se origina de varias maneras, siendo las más comunes las atribuidas a las condiciones de servicio, como son el tránsito de peatones y vehículos sobre las veredas y losas, el efecto del viento cargado de partículas sólidas y el desgaste producido por el flujo continuo de agua.

En la mayoría de los casos, el desgaste por abrasión no ocasiona problemas estructurales, sin embargo puede traer consecuencias en el comportamiento bajo las condiciones de servicio o indirectamente propiciando el ataque de algún otro enemigo de la durabilidad (agresión química, corrosión, etc.), siendo esto último más evidente en el caso de las estructuras hidráulicas.

#### Factores que afectan la resistencia a la abrasión del concreto

La resistencia a la abrasión del hormigón es un fenómeno progresivo. Inicialmente la resistencia está muy relacionada con la resistencia a la compresión en la superficie de desgaste, y la mejor forma de juzgar el desgaste de un piso es en base a esta resistencia. Entonces el factor principal reside en qué tan resistente es desde el punto de vista estructural o mecánico, la superficie expuesta al desgaste. A medida que la pasta se desgasta los agregados finos y gruesos quedan expuestos; la abrasión y los

impactos provocarán una degradación adicional relacionada con agregados y la dureza de los agregados.

Se ha demostrado en base a ensayos y experiencias en obra que la resistencia a la compresión del hormigón es proporcional a su resistencia a la abrasión. Debido a que la abrasión ocurre en la superficie, es crítico maximizar la resistencia superficial. La resistencia se puede incrementar utilizando mezclas para espolvorear en seco y capas de acabado, técnicas de acabado y procedimientos de curado adecuados. No se debe confiar exclusivamente en los resultados de ensayos de compresión realizados sobre probetas cilíndricas, sino que se debería prestar particular atención a la instalación y acabado de la superficie del piso.

Para una mezcla de hormigón determinada, la resistencia a la compresión de la superficie se mejora:

- Evitando la segregación de los componentes
- Eliminando la exudación
- Estableciendo un adecuado cronograma para el acabado
- Minimizando la relación agua cemento superficial (prohibiendo agregar agua a la superficie para facilitar el acabado)
- Trabajando la superficie con un fratás duro
- Utilizando procedimientos de curado adecuados.

Una dosificación económica para lograr mayor resistencia a la compresión incluye el uso de una relación agua cemento mínima y agregados de tamaño adecuado. Se debe considerar la calidad de los agregados en la región de la superficie.

Se han desarrollado varias maneras de medir el desgaste o la resistencia a la abrasión, a nivel de laboratorio como a escala natural; pero los resultados son bastante relativos pues ninguna de ellas puede reproducir las condiciones reales del uso de las estructuras, ni dar una medida absoluta en términos numéricos que puede servir para comparar condiciones de uso o concretos similares; por lo tanto el mejor indicador es evaluar principalmente factores como la resistencia en compresión, las características de los agregados, el diseño de mezcla, la técnica constructiva y el curado. (ACI Comité 201 2R, 2001)

#### Recomendaciones para el control de la abrasión

Teniendo claros estos conceptos, es obvio que en la medida que desarrollemos las capacidades resistentes de la capa de concreto que soportará la abrasión, lograremos controlar el desgaste. Las siguientes medidas permitirán lograr una resistencia a la compresión adecuada, con lo cual se obtendrán superficies de hormigón resistentes a la abrasión:

- Baja relación agua-cemento en la superficie: Utilizar aditivos reductores del agua, una mezcla dosificada de manera de eliminar la exudación, o planificar el acabado de manera de evitar añadir agua durante el fratasado; la deshidratación al vacío puede ser una buena opción.
- Correcta graduación del agregado fino y el agregado grueso: el tamaño máximo del agregado grueso se debería seleccionar de manera de optimizar la trabajabilidad y minimizar el contenido de agua.
- Utilizar el menor asentamiento consistente con una correcta colocación y compactación y dosificar la mezcla de acuerdo con el asentamiento deseado y la resistencia requerida.
- El contenido de aire debería ser consistente con las condiciones de exposición. Para los pisos interiores no sujetos a congelamiento y deshielo es preferible que el contenido de aire sea menor o igual que 3%. Además de tener un efecto adverso sobre la resistencia, los contenidos de aire elevados pueden provocar la aparición de ampollas si el acabado no se realiza en el momento indicado. No se debería utilizar aire incorporado si se utilizan mezclas para espolvorearen seco, a menos que se sigan precauciones especiales.

### **2.3.1.3 Reacciones químicas en los agregados**

Las reacciones químicas en los agregados, pueden producir desintegración, afectando las estructuras de concreto, algunas de ellas pueden ser beneficiosas, pero otras pueden dañar gravemente el concreto provocando expansiones a nivel interno anormales, generando fisuramiento, ciertos desplazamientos de elementos en estructuras mayores y por ende una pérdida de resistencia.

Las reacciones químicas que se presentan en estos agregados están constituidos por: la reacción Álcali-Sílice, la reacción Carbonatos-Álcalis y otras reacciones.

#### **➤ Reacción Álcali-Sílice**

Se produce con algunos agregados del tipo ópalo, calcedonia, ciertas formas de cuarzo, cristobalita, tridimita, riolita, dacita, andesita o latita, también con vidrio o productos de la vitrificación criptocristalina y vidrios silicios sintéticos, que reaccionan con los hidratos de calcio del cemento ocasionando compuestos expansivos.

**Tabla 2.11:** Componentes silíceos reactivos que pueden estar presentes en los agregados

| <b>Sustancia reactiva</b>                               | <b>Composición química</b>  | <b>Naturaleza física</b>   |
|---|---|--|
| Ópalo   | SiO <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O  | Amorfa   |
| Calcedonia  | SiO <sub>2</sub>  | Microcristalina a criptocristalina; generalmente fibrosa   |
| Ciertas formas de cuarzo                                | SiO <sub>2</sub>  | (a) Microcristalina a criptocristalina;<br>(b) Cristalina, pero intensamente fracturada, bajo tensión y/o llena de inclusiones |
| Cristobalita  | SiO <sub>2</sub>  | Cristalina   |
| Tridimita   | SiO <sub>2</sub>  | Cristalina   |
| Riolita, dacita, latita o andesita                      | Silíceos, con proporciones menores de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                        | Vítrea o criptocristalina  |
| Vidrio o productos de la vitrificación criptocristalina | FeO <sub>2</sub> , tierras alcalinas y álcalis  | Materiales como la matriz de las rocas volcánicas o los fragmentos de las tufas  |
| Vidrios silíceos sintéticos                             | Silíceos, con proporciones menores de álcalis, alúmina, otras sustancias o todo lo anterior | Vítrea   |

Fuente: ACI Comité 201 2R (2001)

Las rocas más perjudiciales en términos de la reacción álcali-sílice (es decir, las rocas que contienen una o más de las sustancias listadas en la tabla anterior) son las siguientes:

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Cherts opalinos  | Andesitas y tufas     |
| Cherts calcedónicos  | Esquistos silíceos    |
| Cherts cuarcíticos   | Filitas               |
| Riolitas y tufas   | Concreciones opalinas |
| Dacitas y tufas  | Dolomitas silíceas    |
| Cuarzos y cuarcitas fracturados,<br>bajo tensión o llenos de inclusiones | Calizas silíceas      |

Una roca puede ser clasificada, por ejemplo, como una caliza silícea y aún así ser inocua si sus componentes silíceos son diferentes a los indicados en la tabla anterior. Hasta el año 1958 solo se reconocían los agregados mencionados anteriormente (Tabla 2.11). En forma posterior se fueron incorporando otras rocas a la lista de componentes reactivos conocidos, incluyendo las argilitas, las areniscas, las cuarcitas y los esquistos, además del cuarzo fracturado y bajo tensión. Este cuarzo bajo tensión típicamente se caracteriza por extinciones ondulatorias. Varias de estas rocas, incluyendo los gneis graníticos, las sub-areniscas metamorfoseadas, algunos cuarzos y gravas cuarcíticas, parecen reaccionar lentamente incluso con cementos con alto

contenido de álcalis, y su reactividad no fue reconocida hasta que las estructuras tuvieron más de veinte años de edad. Se ha demostrado que algunas rocas y minerales que no participan de la reacción álcali-sílice pero que pueden producir álcalis por deslave, pueden hacer reaccionar a los agregados reactivos.

Se han desarrollado varios métodos químicos, físicos y petrográficos para estimar el riesgo potencial de la reactividad de los agregados, siendo la mejor evaluación la evidencia práctica del empleo de los agregados en concreto sin problemas. Una de las dificultades para evaluar el riesgo consiste en que el desarrollo del fenómeno es lento, por lo que debe existir evidencia estadística de por lo menos 5 años para poder opinar sobre la habilidad práctica de algún agregado en particular sobre el que exista duda.

El producto inicial de la reacción en la superficie será un gel calcio-álcali-sílice no expansivo próximo al C-S-H. Para que la reacción continúe la cantidad de material reactivo debe ser despreciable o mayor que una cantidad pésima, dependiendo de la cantidad de álcali y de la fineza del material reactivo. La formación del producto no expansivo es deseable y sólo ocurrirá si las partículas reactivas son suficientemente numerosas o suficientemente finas.

Si la cantidad de sílice es importante con respecto a la superficie de los agregados reactivos, internamente se formará un gel álcali-sílice, en la interfase agregado-pasta, con ilimitado potencial de expansión, el cual absorberá agua y ejercerá fuerzas potencialmente destructivas., que rompe la estructura interna del concreto provocando fisuración y desintegración.

Es importante anotar que además de la reactividad potencial que pueden tener los agregados, deben darse otras condiciones para que se produzca la reacción, como son la calidad particular del agregado en cuestión, alto contenido de álcalis del cemento (superior al 6%), humedad relativa del orden del 80% y en el caso de climas cálidos con temperatura ambiente elevada, la reacción se acelera. Sin embargo se concluye que no es tan fácil que se conjuguen todos los factores a la vez, por lo que este tipo de reacciones no se da con mucha frecuencia.

#### Caracterización del daño en el concreto producto de la reacción álcali-sílice

Se caracteriza por los siguientes síntomas:

- Gran dilatación interna y total
- Grietas superficiales irregulares y muy anchas (hasta 35mm) y de poca profundidad (entre 150 y 400mm)

- Apariencia apagada y yesosa de las fracturas recientes
- Exudación gelatinosa con eflorescencias blancuzcas en la superficie y en el interior del concreto, especialmente en los huecos, junto a las fracciones reactivas de ripio y arena las cuales han de estar superficialmente alteradas.

### ➤ **Reacción Carbonatos-Álcalis**

Se produce en algunas rocas carbonatadas que participan en reacciones con los álcalis; en algunos casos estas reacciones producen expansión y fisuración perjudiciales. Las reacciones perjudiciales generalmente se asocian con las calizas arcillosas y dolomíticas que tienen características de textura inusuales, esta reacción se denomina reacción álcali-carbonato. Además de la reacción álcali-carbonato expansiva y perjudicial, también existe otro fenómeno asociado con algunas rocas carbonatadas. Debido a este fenómeno las zonas periféricas de las partículas de agregado que están en contacto con la pasta cementicia cambian y desarrollan bordes prominentes dentro de las partículas, lo cual altera significativamente la pasta que las rodea. La naturaleza de formación de estos bordes está asociada con un cambio en la distribución de sílice y carbonato entre la partícula de agregado y la pasta cementicia que la rodea. Los bordes parecen extenderse hacia el agregado en forma concéntrica, llegando a profundidades mayores a medida que transcurre el tiempo. Al ser atacados con ácido diluido, algunos bordes aparecen en relieve positivo mientras que otros aparecen en relieve negativo; de allí la denominación de bordes positivos y bordes negativos. A diferencia de las reacciones álcali-carbonato que provocan expansión y fisuración perjudiciales, es poco probable que la reacción álcali-carbonato formadora de bordes, constituya una reacción perjudicial en sí misma.

Se han informado algunos casos recientes de grandes expansiones estructurales que provocaron daños considerables (ACI Comité 201 2R, 2001).

#### Caracterización del daño en el concreto producto de la reacción álcali-sílice

El hormigón afectado se caracteriza por una red de fisuras irregulares o en malla, generalmente más desarrolladas en las áreas de la estructura en las cuales el hormigón tiene una provisión de humedad constante y renovable, como por ejemplo en las áreas próximas al nivel del agua de las pilas de los puentes, detrás de la parte de los muros de sostenimiento en contacto con el suelo, debajo de las losas de pavimento o en zonas de postes o columnas que podrían funcionar como "pabilos".

Una característica de la reacción álcali-carbonato que la diferencia de la reacción álcali-sílice es la ausencia general de gel de sílice exudando de las fisuras. Otros signos

que evidencian la severidad de la reacción son el cierre de las juntas de expansión y el posible aplastamiento del hormigón adyacente.

Para identificar la reactividad de los agregados existen una serie de exámenes y ensayos, como por ejemplo; el examen de textura, examen microscópico, examen visual y la aplicación de ciertos métodos en laboratorio como el método del cilindro de roca, reacción álcali-roca carbonatada en prismas de hormigón.

#### ➤ **Otras reacciones**

Otras reacciones químicas perjudiciales que involucran a los agregados incluyen la oxidación o hidratación de ciertos óxidos, sulfatos o sulfuros inestables que se produce una vez que los agregados son incorporados al hormigón. Los ejemplos incluyen la hidratación del óxido de magnesio, el óxido de calcio o el sulfato de calcio anhidro, o la oxidación de la pirita. Aparentemente se ha descubierto que los agregados compuestos por dolostona sana que son estables en el hormigón a temperaturas normales se pueden deteriorar debido a la oxidación de pequeñas cantidades de pirita si se los utiliza a temperaturas elevadas. Los agregados pueden estar contaminados con hierro metálico y este contaminante se podría oxidar. Además, hay otras reacciones que se pueden producir debido a la presencia de impurezas orgánicas tales como el humus o los azúcares. Al utilizar los agregados se debería tener en cuenta estas posibilidades e implementar medidas correctivas si fuera necesario. Generalmente realizando una cuidadosa inspección y análisis de los agregados es posible detectar la presencia de este tipo de impurezas reactivas y evitar su uso en el hormigón. Cabe destacar que las reacciones álcali-sílice y álcali-carbonato son más importantes que las demás reacciones descritas. (ACI Comité 201 2R, 2001)

#### **2.3.1.4 Ambiente químicamente agresivo.**

El concreto es un material que en general tiene un comportamiento satisfactorio ante diversos ambientes químicamente agresivos. El concepto básico reside en que el concreto es químicamente inalterable al ataque de agentes químicos que se hallan en estado sólido. Para que exista alguna posibilidad de agresión, el agente químico debe estar en solución en una cierta concentración y además tener la opción de ingresar en la estructura de la pasta durante un cierto tiempo, es decir debe haber un cierto flujo de la solución concentrada hacia el interior del concreto y este flujo debe mantenerse un tiempo suficiente para que se produzca la reacción.

Este marco de referencia reduce pues las posibilidades de ataque químico externo al concreto, sin embargo existen agentes que incrementan la posibilidad de deterioro como son: las temperaturas elevadas, velocidades de flujo altas, mucha absorción y permeabilidad, el curado deficiente y los ciclos de humedecimiento y secado. Los ambientes agresivos usuales están constituidos por el aire, agua y suelos contaminados que entran en contacto con las estructuras de concreto.

Se puede decir pues, que el concreto es uno de los materiales que demuestran mayor durabilidad frente a ambientes químicamente agresivos, ya que si se compara estadísticamente los casos de deterioro con aquellos en que mantiene sus condiciones iniciales pese a la agresividad, se concluye que estos casos son excepcionales. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2006)

En la Tabla 2.12 se resumen los efectos que producen en el hormigón algunos agentes químicos habituales. La Tabla 2.13 muestra los factores más importantes que afectan la capacidad del hormigón para resistir el deterioro

**Tabla 2.12:** Efecto de los agentes químicos de uso habitual en el hormigón

| VELOCIDAD DE ATAQUE A TEMPERATUR A AMBIENTE | ACIDOS INORGAN.                     | ACIDOS ORGAN.                 | SOLUCIONES ALCANINAS   | SOLUCIONES SALINAS   | OTROS   |
|---|-------------------------------------|-------------------------------|--|--|---|
| Rápida                                      | Clorhídrico<br>Nítrico<br>Sulfúrico | Acético<br>Fórmico<br>Láctico | –  | Cloruro de aluminio  | –   |
| Moderada                                    | Fosfórico                           | Tánico                        | Hidróxido de Sodio >20%  | Nitrato de amonio<br>Sulfato de amonio<br>Sulfato de sodio<br>Sulfato de magnesio<br>Sulfato de calcio | Bromo (gaseoso)<br>Licor de sulfato           |
| Lenta                                       | Carbónico                           | –                             | Hidróxido de Sodio 10% a 20%   | Cloruro de amonio<br>Cloruro de magnesio<br>Cloruro de sodio   | Cloro (gaseoso)<br>Agua de mar<br>Agua blanda |
| Despreciable                                | –                                   | Oxálico<br>Tartárico          | Hidróxido de Sodio <10%<br>Hipoclorito de sodio<br>Hidróxido de amonio | Cloruro de calcio<br>Cloruro de sodio<br>Nitrato de zinc<br>Cromato de Sodio                           | Amoniaco líquido                              |

Fuente: ACI Comité 201 2R (2001)

**Tabla 2.13:** Factores que afectan el ataque del hormigón por parte de los agentes químicos

| Factores que aceleran o agravan el ataque  | Factores que demoran o mitigan el ataque   |
|--|--|
| 1. Elevada porosidad debida a <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Elevada absorción de agua</li> <li>ii. Permeabilidad</li> <li>iii. Vacíos</li> </ul>                                 | 1. Hormigón denso obtenido mediante: <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Correcta dosificación de la mezcla</li> <li>ii. Contenido de agua unitario reducido</li> <li>iii. Mayor contenido de material cementicio</li> <li>iv. Incorporación de aire</li> <li>v. Compactación adecuada</li> <li>vi. Curado efectivo</li> </ul> |
| 2. Fisuras y separación debidas a: <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Concentración de tensiones</li> <li>ii. Choque térmico</li> </ul>   | 2. Hormigón denso obtenido mediante: <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Uso de armadura de tracción de tamaño adecuado y correctamente ubicada</li> <li>ii. Inclusión de puzolana para reducir el aumento de temperatura</li> <li>iii. Colocación de materiales adecuados en las juntas de contracción.</li> </ul>            |
| 3. Lixiviación y penetración de líquidos debido a: <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Flujo de líquidos</li> <li>ii. Formación de charcos</li> <li>iii. Presión hidráulica</li> </ul> | 3. Diseño estructural: <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Minimizar las áreas de contacto y turbulencia</li> <li>ii. Proveer membranas y sistemas con barreras protectoras para reducir la penetración</li> </ul>   |

Fuente: ACI Comité 201 2R (2001)

Cabe mencionar que la dosificación de la mezcla y el mezclado y procesamiento inicial del hormigón fresco determinaran su homogeneidad y densidad. En caso que los procedimientos de curado son defectuosos se producirán fallas y fisuras. La resistencia a la fisuración depende de la resistencia y capacidad de deformación.

El movimiento de las sustancias perjudiciales que transportan agua aumenta las reacciones que dependen tanto de la cantidad como de la velocidad del flujo.

Los hormigones que frecuentemente estarán expuestos a agentes químicos que se sabe producen un rápido deterioro del hormigón se deberían proteger con una barrera protectora resistente a dichos agentes químicos.

### **Control de la agresión química**

La manera más directa consiste en evitar construir en ambiente agresivo, pero esto no siempre puede llevarse a cabo, por lo que como regla general se debe procurar usar alguna barrera que evite el contacto de los cloruros y sulfatos en solución de concreto.

Esta protección puede llevarse a cabo con pinturas bituminosas, hechas a base de caucho o pinturas especialmente diseñadas para este tipo de agresión (normalmente de tipo epóxico), pero que resultan usualmente soluciones caras.

Otra medida es crear drenajes adecuados entre el concreto estructural y el suelo agresivo que corten el flujo de la solución impidiendo el contacto entre ambos. Una medida en ese sentido consiste en emplear rellenos granulares de Tamaño máximo no menor de 1" de granulometría abierta, que limita la posibilidad de flujo por capilaridad entre el concreto y el material de relleno.

Independientemente de lo anterior, lo básico para que el concreto reduzca las posibilidades de ser deteriorado por agresión química consiste en; que el diseño de mezcla sea adecuado, en cuanto a la relación agua cemento, tipos de agregados y tipos de cementos a utilizar de acuerdo a la normativa vigente.

Algunos de los factores que provocan, por su disponibilidad en el medio ambiente, la mayoría de casos de ataque químico al concreto están constituidos por el agua de mar, la sal del agua de mar, los ácidos, la carbonatación, cloruros y sulfatos.

### ➤ **Ataque por ácidos**

En general, el cemento Pórtland no tiene una buena resistencia a los ácidos; no obstante, puede tolerar algunos ácidos débiles, particularmente si la exposición es ocasional.

#### ¿De dónde provienen los ácidos que atacan al concreto?

Los productos de la combustión de numerosos combustibles contienen gases sulfurosos que se combinan con la humedad para formar ácido sulfúrico. Además, es posible que se acumulen aguas residuales en condiciones tales que provoquen la formación de ácidos. El agua de drenaje de ciertas minas y ciertas aguas industriales pueden contener o formar ácidos que atacan al hormigón. Las turbas, los suelos arcillosos y los esquistos aluminosos pueden contener sulfuro de hierro (pirita) que, al oxidarse, genera ácido sulfúrico. Mediante reacciones adicionales pueden producir sales de sulfato, las cuales generan ataques por sulfatos.

En ocasiones los arroyos de montaña son levemente ácidos debido a la presencia de dióxido de carbono libre en disolución. Generalmente, si el hormigón es de buena calidad y tiene una baja absorción, estas aguas sólo atacan su superficie. Algunas aguas minerales que contienen grandes cantidades ya sea de dióxido de carbono y/o sulfuro de hidrógeno en disolución pueden dañar severamente cualquier

hormigón. En el caso del sulfuro de hidrógeno, las bacterias que convierten este compuesto en ácido sulfúrico pueden tener un papel importante.

Los ácidos orgánicos que se originan en los silos utilizados para almacenar productos agrícolas o en instalaciones de industrias manufactureras o procesadoras tales como las cervecerías, lecherías, plantas de enlatado y molinos de pulpa de madera, pueden provocar daños superficiales. Esto puede representar una preocupación particularmente importante en el caso de las losas de piso, aún cuando la integridad estructural no resulte afectada.

#### ¿Qué efectos provocan los ácidos en el concreto?

El deterioro que los ácidos provocan en el concreto es fundamentalmente el resultado de una reacción entre estos compuestos químicos y el hidróxido de calcio del cemento Pórtland hidratado. Cuando se utilizan calizas o agregados dolomíticos, éstos también están sujetos al ataque por ácidos.

En la mayoría de los casos, la reacción química da por resultado la formación de compuestos de calcio solubles en agua que posteriormente son lixiviados por las soluciones acuosas. Los ácidos oxálico y fosfórico son excepciones, ya que las sales de calcio resultantes son insolubles en agua y no pueden ser fácilmente eliminadas de las superficies de hormigón. En el caso del ataque por ácido sulfúrico, el deterioro producido es mayor o acelerado, ya que el sulfato de calcio formado afectará al hormigón mediante el mecanismo de ataque por sulfatos descrito en forma posterior en este capítulo. Si a través de las fisuras o poros del hormigón pueden ingresar ácidos, cloruros u otras soluciones salinas agresivas, es posible que las armaduras de acero sufran corrosión la cual a su vez provocará fisuración y descantillado del hormigón.

Un hormigón denso con una baja relación agua cemento proporciona algún grado de protección contra el ataque por ácidos. Ciertos materiales puzolánicos, y los vapores de sílice en particular, aumentan la resistencia del hormigón a los ácidos. Sin embargo, en todos los casos el tiempo de exposición a los ácidos se debería minimizar tanto como sea posible y se debería evitar la inmersión. En estos casos se debería utilizar un sistema de barrera protectora o tratamiento adecuado. (ACI Comité 201 2R, 2001)

#### ➤ **Carbonatación**

Cuando un concreto o mortero está expuesto a dióxido de carbono se origina una reacción que produce carbonatos; esta reacción es acompañada por contracción. Virtualmente todos los elementos constitutivos del cemento Pórtland hidratado son susceptibles de carbonatación. Los resultados pueden ser beneficiosos o perjudiciales,

dependiendo del tiempo, la tasa y la extensión de la carbonatación y del ambiente al cual está expuesto el cemento. Por otra parte, una carbonatación intencional durante su producción puede mejorar la resistencia, dureza y estabilidad dimensional de los productos de hormigón. Sin embargo, en otros casos la carbonatación puede provocar el deterioro y una disminución del pH de la pasta cementicia, provocando la corrosión de las armaduras próximas a la superficie. La exposición al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante el proceso de endurecimiento puede afectar la superficie acabada de las losas, dejando una superficie blanda, polvorienta y menos resistente al agua. El uso de calefactores sin ventilación o la exposición a los gases de escape de las maquinarias o de otras fuentes durante el proceso de endurecimiento puede producir superficies altamente porosas susceptibles a los ataques químicos. La fuente de CO<sub>2</sub> puede ser la atmósfera o bien agua que transporta CO<sub>2</sub> en disolución.

La reacción del cemento Pórtland hidratado con el CO<sub>2</sub> del aire es generalmente un proceso lento. Este proceso depende fuertemente de la humedad relativa ambiente, la temperatura, la permeabilidad del hormigón y la concentración de CO<sub>2</sub>. Las mayores tasas de carbonatación se producen cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y 75%. Para humedad relativa menor que 25%, el grado de carbonatación que ocurre se considera insignificante. Si la humedad relativa es mayor que 75%, la humedad presente en los poros restringe la penetración de CO<sub>2</sub>. Los hormigones relativamente permeables sufren una carbonatación más rápida y extensa que los hormigones densos, bien compactados y curados.

Una menor relación agua cemento y una buena compactación reducen la permeabilidad y limitan la carbonatación a la superficie. En las áreas industriales, donde hay mayor concentración de CO<sub>2</sub> en el aire, las tasas de carbonatación pueden ser mayores.

El CO<sub>2</sub> absorbido por la lluvia ingresa al agua subterránea en forma de ácido carbónico. La putrefacción de la vegetación puede aportar CO<sub>2</sub> adicional, junto con ácido húmico, lo cual puede provocar elevados niveles de CO<sub>2</sub> libre. Aunque en general estas aguas son ácidas, su agresividad no puede ser determinada exclusivamente en base al pH. La reacción con los carbonatos presentes en el suelo produce un equilibrio con bicarbonato de calcio que puede resultar en soluciones de pH neutro pero que sin embargo contienen cantidades significativas de CO<sub>2</sub> agresivo. La tasa de ataque, similar a la del ataque por el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, depende de las propiedades del hormigón y de la concentración de CO<sub>2</sub> agresivo. Debido a la amplia variedad de condiciones en las construcciones subterráneas, en este momento no existe consenso en cuanto a establecer valores limitantes. Sin embargo, algunos estudios han concluido

que el agua que contiene más de 20 partes por millón (ppm.) de CO<sub>2</sub> agresivo pueden provocar la rápida carbonatación de la pasta cementicia hidratada. Por otra parte, las aguas que contienen 10 ppm. o menos de CO<sub>2</sub> agresivo pero que se mueven libremente también pueden provocar una carbonatación significativa. (ACI Comité 201 2R, 2001)

### ➤ **Exposición al agua de mar**

La concentración total de sales del agua de mar difiere en las distintas partes del mundo; en algunas regiones el agua de mar está menos diluida. Sin embargo, los elementos constitutivos del agua del mar son básicamente constantes. En las regiones frías y templadas la concentración es menor que en las regiones cálidas; la concentración es particularmente elevada en las regiones costeras poco profundas con tasas de evaporación diaria excesivas. Cuando se construyen estructuras de hormigón en áreas costeras reclamadas al mar, si las fundaciones se encuentran por debajo del nivel del agua salobre, la succión capilar y la evaporación pueden provocar súper saturación y cristalización en el hormigón por encima del nivel del terreno, lo cual provocaría tanto un ataque químico sobre el hormigón (sulfato) como la agravación de la corrosión del acero (cloruros). En las regiones de clima tropical la combinación de estos efectos perjudiciales puede provocar graves defectos en el hormigón en apenas unos pocos años.

### ¿Qué efectos del agua de mar en el concreto?

La reacción del concreto maduro con los iones sulfato del agua del mar es similar a la que ocurre con los iones sulfato presentes en el agua dulce o lixiviados de los suelos, pero sus efectos son diferentes. La concentración de iones sulfato en el agua de mar puede aumentar a niveles elevados debido a la acción capilar y evaporación bajo condiciones climáticas extremas. Sin embargo, la presencia de iones cloruro altera la magnitud y la naturaleza de la reacción química, de manera que un cemento con un determinado contenido de C<sub>3</sub>A calculado produce menos expansión que la que se anticiparía para el mismo cemento expuesto a agua dulce con el mismo contenido de iones sulfato.

En general las normas recomiendan hasta un 10% de contenido de C<sub>3</sub>A para concretos u hormigones permanentemente sumergidos en agua de mar (ASTM C 150, Corps of Engineers 1994, Asociación del Cemento Pórtland PCA), sin embargo existe investigadores como Verbeck y Regourd que han demostrado que puede haber una

diferencia considerable entre las composiciones calculada y medida del clínquer del hormigón, especialmente en cuanto al C3A y al C4AF. Por lo tanto, la interrelación entre el contenido de C3A medido y la resistencia al agua de mar podría también ser incierta. Existe un requisito fundamental, el de baja permeabilidad, para retrasar los efectos de los ataques por sulfatos y para lograr una protección adecuada de las armaduras con el mínimo recubrimiento de hormigón recomendado por las normativas. Esta baja permeabilidad requerida se obtiene utilizando hormigones con baja relación agua cemento, bien consolidados y adecuadamente curados. La permeabilidad de los hormigones elaborados con cantidades adecuadas de escoria de alto horno granulada o puzolana puede ser tan baja como 1/10 o 1/100 de la de un hormigón comparable de igual resistencia elaborado sin escoria o puzolana.

El hormigón se debería diseñar y construir de manera de minimizar los anchos de fisura, limitando así el acceso del agua de mar a las armaduras. (ACI Comité 201 2R, 2001)

Como se apreció, éste tipo de ataque químico comprende el ataque por cloruros y sulfatos, compuestos que también se encuentran en otros lugares por separado no tan solo en el agua de mar. A continuación se analizan en forma independiente.

### ➤ **Cloruros**

Los cloruros se hallan en el ambiente en las zonas cercanas al mar, en el agua marina, y en ciertos suelos y aguas contaminadas de manera natural o artificial.

Como se observa en la Tabla 2.12, los cloruros tienen una acción insignificante sobre el concreto desde el punto de vista de la agresión química directa, pero erradamente se le considera en muchas oportunidades causantes del deterioro que es producido por otros agentes.

En este sentido hay que tener perfectamente claro que el concepto de que los cloruros no tiene acción perjudicial directa sobre el concreto, sino a través de su participación en el mecanismo de la corrosión de metales embebidos en el concreto, produciéndose compuestos de hierro que al expandirse rompen la estructura de la pasta y agregados. El no entender a cabalidad este fenómeno lleva muchas veces a confusión pues con frecuencia se descartan materiales con cloruros para su empleo en concreto simple sin ser necesario.

Como nota interesante debemos comentar que para producir concreto no reforzado, se puede emplear incluso agua de mar, (como en efecto se hace en algunos

lugares del mundo) si la estructura en cuestión no estará sometida posteriormente a humedecimiento que produzca que entren en solución permanente los sulfatos que también contiene el agua marina. Empleado complementariamente algún cemento Puzolánico o resistente a los sulfatos, en los casos mas críticos se controlaría cualquier reacción de los sulfatos, ya que estos constituirían el único riesgo potencial de deterioro. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2006)

## 2.4 Ataque químico por sulfatos provenientes de fuentes externas al hormigón

Una de las formas más frecuentes de ataque químico al concreto endurecido es la acción de los sulfatos. Los sulfatos son sales que afectan la durabilidad del concreto siempre y cuando estén en solución, ya que estos en condición anhidra no producen ningún ataque, por lo general consisten en sulfatos de Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio. Muchas de estas sustancias se encuentran en forma de minerales, a continuación se da un listado de estos nombres y su composición general:

|  |   |
|--|---|
| anhidrita $\text{CaSO}_4$  | tenardita $\text{Na}_2\text{SO}_4$                    |
| basanita $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$   | mirabilita $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ |
| yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   | arcanita $\text{K}_2\text{SO}_4$                      |
| kierserita $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  | glauberita $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$      |
| epsomita $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   | langbeinita $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$    |
| taumasita $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_1 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ |   |

El ión sulfato se encuentra en el suelo. Normalmente en zonas áridas, se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario, y pese a que pueden no estar en muy alta concentración, si se producen ciclos de humedecimiento y secado sobre el concreto, la concentración puede incrementarse y causar deterioro. Además se encuentra en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas y en solución en agua de lluvia. El agua que se utiliza en las torres de enfriamiento de hormigón también puede ser una potencial fuente de ataque por sulfatos debido a la evaporación, particularmente si estos sistemas utilizan cantidades relativamente pequeñas de agua de reemplazo. También se encuentra en aguas contaminadas por desechos industriales, como industrias asociadas con la fabricación de químicos, baterías, aluminio, escorias del procesamiento del hierro, cenizas, etc. El agua de mar y los suelos costeros embebidos en agua de mar constituyen un tipo de exposición particular, que se explico con anterioridad.

### 2.4.1 ¿Qué componentes internos del concreto sean quizás inestables a la presencia de sulfatos?

Como se mencionó con anterioridad, para la fabricación del concreto se realiza una mezcla de agua, áridos finos o grueso (en el caso del motero árido fino), agua, aire, posibles aditivos, y un material conglomerante, que comúnmente corresponde al cemento. Este cemento tiene un compuesto principal, que es el clínquer, el cual se

obtiene de un proceso detallado anteriormente, el cual es triturado finamente y además se le incluyen adiciones de yeso para formar el cemento.

El análisis químico de un cemento se expresa por sus óxidos, estos óxidos no se hallan libres sino combinados. Los cuatro óxidos principales forman los compuestos que se aprecian en la siguiente tabla, junto a algunas de sus características, donde se aprecia que el compuesto mineralógico del cemento Pórtland, que es mas sensible a la acción de los sulfatos es el Aluminato tricálcico  $C_3A$ .

**Tabla 2.14:** Compuestos mineralógicos del cemento Pórtland

|  | Característica resistencia mecánica   | Hidratación |          | Observaciones  |
|--|---|-------------|----------|--|
|  |   | Velocidad   | Calor    |  |
| <b><math>C_3S</math>:<br/>Silicato-tricálcico</b>          | Desarrolla resistencias mecánicas a edades tempranas                                      | Rápida      | Alto     | Principal responsable resistencias mecánicas               |
| <b><math>C_2S</math>:<br/>Silicato-bicálcico</b>           | Desarrolla resistencias mecánicas a edades últimas  | Lenta       | Bajo     | Resistencias mecánicas a largo plazo                       |
| <b><math>C_3A</math>:<br/>Aluminato-tricálcico</b>         | Genera gran calor de hidratación y participa de resistencias mecánicas a edades tempranas | Muy rápida  | Muy alto | Responsable fraguado rápido.<br><b>Sensible a sulfatos</b> |
| <b><math>C_4AF</math>:<br/>Ferroaluminato-tetracálcico</b> | No desarrolla resistencias mecánicas  | Lenta       | Moderado | No aporta resistencia mecánica                             |

Fuente: Perales (2003)

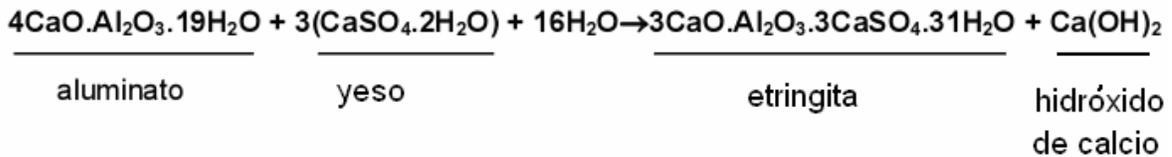
#### 2.4.2. Mecanismo de reacción

El sulfato en solución proveniente del medio exterior, ingresa al concreto por sus poros y microfisuras que pueda tener y se difunde en el concreto a través de ellos, poniéndose en contacto con el Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), hidratado, uno de los primeros compuestos formado durante la hidratación del clínquer contenido en todos los tipos de cemento y con el ión de calcio liberado por los procesos de hidratación del clínquer Pórtland, generando compuestos con acciones perjudiciales para el concreto. Todos los sulfatos causan el deterioro de concreto de cemento Pórtland pero el mecanismo y grado de ataque depende, entre otras cosas, de la clase de sulfato presente.

### Sulfato de calcio

La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferro aluminato tetracálcico, produciendo sulfoaluminato de calcio (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).

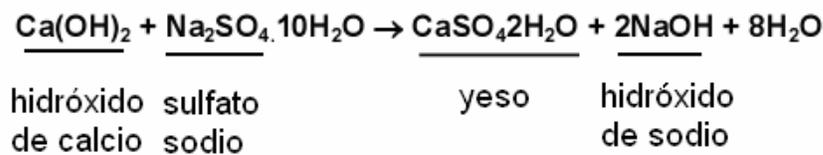
Reacción con sulfato de calcio:



### Sulfato de sodio

La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita.

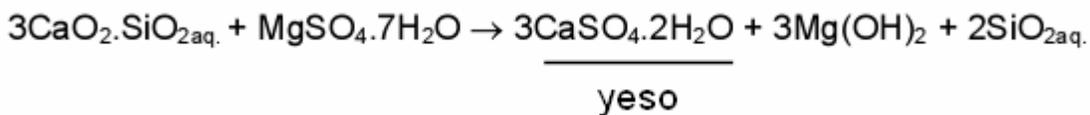
Reacción con sulfato de sodio:



### Sulfato de magnesio

La acción del sulfato de magnesio es la que produce un mayor daño, en cuanto actúa sobre todas las fases de la pasta de cemento, incluso los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el PH de las pastas de cemento. La reacción inicial se da con el aluminato tricálcico produciendo etringita e hidróxido de magnesio y también con el hidróxido de calcio para dar sulfato de calcio e hidróxido de magnesio.

Reacción con sulfato de magnesio:



**yeso + aluminato → etringita + .....**

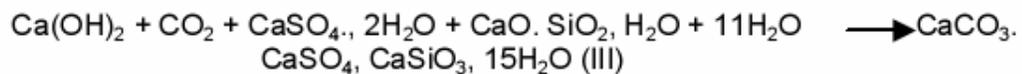
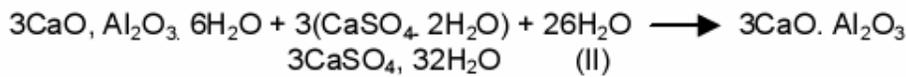
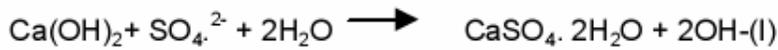
El efecto de las mezclas de sulfato es muchas veces imprevisible y no siempre se adiciona; por ejemplo, los sulfatos de sodio y magnesio, cuando se presentan conjuntamente reducen el ataque de cada sal actuando independientemente.

### Ataque químico - reacciones

Las reacciones destructivas en el concreto debidas a la presencia de soluciones de sulfato en el ambiente son fundamentalmente tres:

- Aquellas que llevan a la formación de yeso dihidratado (**CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O**)
- la que provoca la formación de etringita (**3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O**)
- aquella que lleva a la formación de taumasita (**CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub>·, CaSiO<sub>3</sub>, 15H<sub>2</sub>O**)

Según las siguientes reacciones:



El Hidróxido de Calcio, Ca (OH)<sub>2</sub> producto de la hidratación del silicato bicálcico del cemento, se transforma con incremento del volumen en el yeso bi-hidratado, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, según la reacción (I).

Mayor aún es el aumento del volumen que se verifica según la reacción (II) cuando el aluminato de calcio hidratado 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O se transforma en etringita.



**Figura 2.10:** formación de cristales de etringita en el concreto. (Fuente: Cárcamo, 2006)

La formación de la taumasita, reacción (III), es producto de condiciones particulares del ambiente, como puede ser la riqueza en anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), fuerte humedad relativa y clima frío, tiene un efecto mucho más dañino que los anteriores, llevando al concreto a un estado incoherente.

Debe distinguirse que el yeso secundario, que produce expansión y agrietamiento, difiere de la acción del yeso que se agrega al clínquer en la molienda, que no se encuentra en estado libre en el concreto endurecido. En efecto, la etringita que se forma durante el fraguado del cemento, se transforma rápidamente en monosulfoaluminato cálcico.

Es importante destacar que los sulfatos y los químicos en general raramente, si acaso lo hacen, atacan el concreto si se encuentran en una forma sólida o seca. Para

que resulte un ataque significativo en el concreto, los sulfatos deben estar en solución y por encima de alguna concentración mínima. (ASOCEM, 1992).

La severidad del ataque de sulfatos al concreto depende de lo siguiente:

- *Tipo de sulfatos.* Los sulfatos de magnesio y amonio son los más dañinos al concreto.
- *Concentración de sulfatos.* La presencia de sulfatos más solubles es más perjudicial al concreto. Además, la mayoría de las recomendaciones toman en cuenta la cantidad de sulfatos presente al clasificar la severidad del ataque.
- *Si la solución del sulfato está estancada o fluyendo.* La severidad del ataque se incrementa en el caso de las aguas que fluyen. Así, la naturaleza y el contacto entre el sulfato y el concreto son importantes. El ataque más intensivo tiene lugar en el concreto que está expuesto a ciclos de mojado y secado que en el concreto completa y continuamente sumergido en la solución.
- *Presión.* La fuerza del ataque aumenta debido a que las presiones tienden a forzar la solución del sulfato en el concreto.
- *Temperatura.* Al igual que sucede con cualquier reacción química, la velocidad de la reacción se incrementa con la temperatura.
- *Presencia de otros iones en la solución del sulfato.* Afectan la potencia del ataque. Un ejemplo típico es el agua de mar, que contiene sulfatos y cloruros. Generalmente, la presencia de iones de cloruro altera la extensión y la naturaleza de la reacción química, produciendo menor expansión en el concreto debido a los sulfatos en el agua de mar.

Como puede verse, la intensidad del ataque de sulfatos es una cuestión compleja influida por muchos factores. Sin embargo, en la práctica es difícil considerar todos los factores involucrados y en la mayoría de los casos, la severidad del ataque está relacionada principalmente con la concentración de sulfatos, y la manera de combatirlo se especifica de acuerdo con cada caso.

#### **2.4.2.1 Caracterización del ataque por sulfatos**

El ataque por sulfatos se caracteriza por:

- Cambio de coloración en la superficie, ya que el cemento va perdiendo su carácter conglomerante quedando por consiguiente los áridos libres de la unión que les proporciona la pasta. Inicialmente suele presentar aspecto poroso, cambio de color, eflorescencias o manchas.

- Aumento de volumen, dando por consiguiente, a una fuerte expansión degradando el conglomerante y dejando solo al árido.
- La aparición de fisuras entrecruzadas cuyo espesor va aumentando dando como resultado una fisuración irregular, causado por las tensiones que generan los productos de expansión. Esta aparición de fisuras facilita además la penetración de más sustancias nocivas a medida que progresa la degradación.
- Simultáneamente a la fisuración se va generando una delaminación con un curvado de las capas más externas del concreto.
- Pérdida del pegado entre la pasta de cemento y los agregados
- Degradación de concreto en que la matriz cementicia, se transforma en un material blando y sin cohesión.
- Desintegración de la masa de concreto

### **2.4.3 Factores que afectan la resistencia a sulfatos en el concreto**

El ataque de sulfatos al concreto tiene lugar cuando la solución de sulfato penetra en el concreto y reacciona químicamente con sus constituyentes, principalmente con la matriz de cemento. Así pues, los factores que afectan la resistencia a sulfatos del concreto no son solamente aquellos que influyen en la reacción química con la matriz de cemento, sino también aquellos que influyen en la permeabilidad y la calidad total del concreto.

- Cementos.

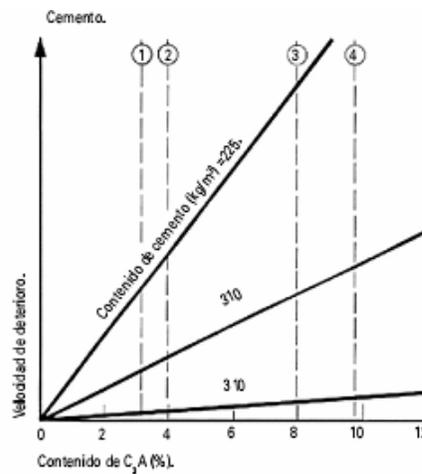
La relación entre la resistencia a sulfatos del cemento Pórtland y su contenido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) está bien establecida. El cemento Pórtland que contiene menos de 5% de  $C_3A$  ha sido clasificado como un resistente a sulfatos, y se usa como el criterio de especificación de muchos reglamentos y normas para el cemento en todo el mundo, ver tabla 2.6.

Los estudios han demostrado que los cementos que contienen potencialmente menos hidróxido de calcio en la hidratación se comportan bien en exposición de sulfatos.

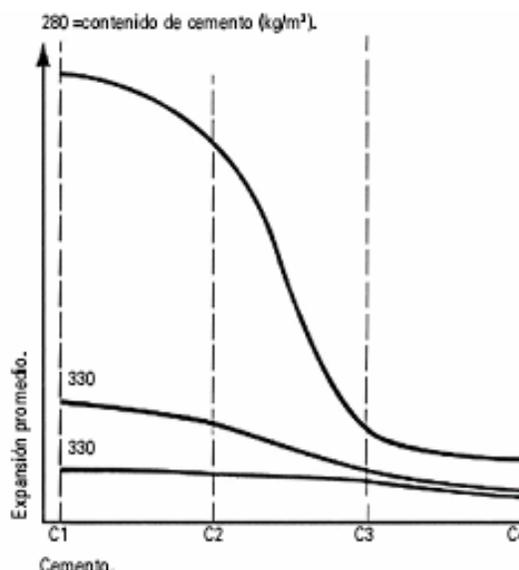
- Contenido de cemento del concreto.

Afecta significativamente su resistencia a sulfatos, sin importar la composición del cemento, tal como se hace evidente de las figuras 2.11 y 2.12. Los datos presentados en estas figuras representan un rango de cementos Pórtland y combinado. La velocidad de deterioro disminuye al incrementarse el contenido de cemento, aún en concretos hechos con cemento Pórtland ordinario. En otras palabras, para producir

concreto resistente a sulfatos, la utilización de un cemento resistente a sulfatos debe combinarse con el uso de un contenido de cemento que no esté por debajo de un mínimo. Esta conclusión se refleja en las recomendaciones para producir concreto resistente a sulfatos.



**Figura 2.11:** Efecto de diferentes cementos Pórtland y contenido de cemento en la velocidad de deterioro de concreto expuesto a suelos que contienen sulfatos. (Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, 2006)

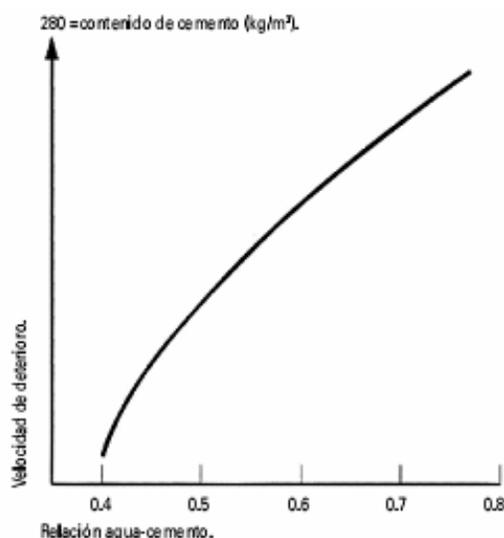


**Figura 2.12:** Efecto de diferentes cementos Pórtland y combinados y contenido de cemento, en la exposición de concreto expuesto a una solución de sulfatos. (Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, 2006).

- Relación agua-cemento.

La permeabilidad del concreto es un factor significativo que influye en su resistencia al ataque de sulfatos. Cuando se tiene materiales de buena calidad, proporcionamiento satisfactorio y una buena práctica, la permeabilidad del concreto es una función directa de su relación agua-cemento y del tiempo de curado. En otras palabras, siendo todos los otros factores iguales, la resistencia a sulfatos del concreto

se incrementa al disminuir su relación agua-cemento. Este efecto de la relación agua-cemento se muestra en la siguiente figura, basada en los datos obtenidos de pruebas de exposición.



**Figura 2.13:** Efecto de la relación agua-cemento sobre la velocidad de deterioro del concreto expuesto a sales que contienen sulfatos. (Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, 2006)

- Aditivos.

Hay muchos tipos de aditivos disponibles para su incorporación en el concreto para mejorar ciertas propiedades, para economizar o para ambas cosas. Generalmente, el efecto de los aditivos en las propiedades del concreto depende no sólo de su formulación y su interacción con el cemento, sino también de las variaciones o ajustes que provocan en las proporciones de la mezcla de concreto. De este modo, los aditivos que provocan una reducción en la relación agua-cemento y/o incrementan la trabajabilidad, pueden aumentar la resistencia del concreto a sulfatos, a condición de que no se usen para reducir su contenido de cemento. Está bien establecido que los aditivos que contienen cloruro de calcio afectan adversamente la resistencia del concreto a sulfatos.

- Práctica de construcción.

La colocación, compactación y curado del concreto son factores importantes para producir concreto de baja permeabilidad. Agregar más agua en el sitio durante la colocación del concreto para restablecer el revenimiento o para ayudar al acabado final, perjudicará la resistencia del concreto a sulfatos. Se requiere de compactación adecuada y curado apropiado para producir concreto denso con capilares discontinuos (baja permeabilidad). Dar un acabado al concreto para proporcionar una superficie densa, libre de agujeros y defectos, puede mejorar la resistencia a sulfatos.

- Diseño y detallado.

Las estructuras y los elementos apropiadamente diseñados y detallados deben proporcionar un refuerzo adecuado, y correctamente focalizado para minimizar el agrietamiento. Es importante el detallado para minimizar la inundación y/o las áreas de turbulencia para reducir la intensidad del ataque de sulfatos, aumentando así la resistencia del concreto a sulfatos.

Por lo antes expuesto, la resistencia del concreto a los sulfatos puede mejorarse significativamente produciendo un concreto impermeable y denso, hecho de cemento resistente a sulfatos, una baja relación de agua-cemento con suficiente contenido de cemento, y que sea apropiadamente colocado, compactado y curado.

Varias autoridades han clasificado la agresividad en un número de categorías de severidad progresiva. Considerando esta clasificación y los tipos de cemento actualmente disponibles. La tabla siguiente brinda recomendaciones para concreto expuesto a cinco clases de sulfatos de severidad progresiva.

**Tabla2.15:** Requisitos para concreto expuestos a soluciones con sulfatos

| TIPOS DE EXPOSICIÓN A LOS SULFATOS | SULFATOS ACUOSOLUBLES (SO <sub>4</sub> ) EN SUELOS (% en peso) | SULFATOS(SO <sub>4</sub> ) EN AGUA (ppm.) | TIPO DE CEMENTO RECOMENDADO                           | RELACION AGUA/CEMENTO RECOMENDADA concreto normal | F'c mínimo (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|------------------------------------|--|---|---|---|----------------------------------|
| Despreciable                       | 0 a 0.10   | 0 a 150                                   | —   | —   | —                                |
| Moderada                           | 0.10 a 0.20  | 150 a 1,500                               | II, IP(MS)<br>IS(MS), P(MS)<br>I(PM)(MS)<br>I(SM)(MS) | 0.50  | 280                              |
| Severa                             | 0.20 a 2.00  | 1,500 a 10,000                            | V   | 0.45  | 310                              |
| Muy severa                         | >2.00  | >10,000                                   | V más<br>Puzolana                                     | 0.45  | 310                              |

Fuente: ACI comité 318 S (2005).

## CAPITULO III

### EXPERIENCIAS DE LABORATORIO

#### 3.1 Descripción general de las experiencias a realizar

Se realiza un ensayo de inmersión de pequeños discos de concreto con árido fino (mortero) en una solución de sulfato, de tipo y concentración determinada. De éste ensayo se desprenden ciertos análisis, para la determinación de la influencia de las nanomoléculas de sílice en el concreto.

En forma previa a la inmersión de los discos de mortero, se realiza un secado especial hasta que los discos contengan 0% de humedad, obteniendo el peso seco de cada uno de ellos. Una vez sumergidos y transcurrido un tiempo determinado, las muestras se sacaran de la solución por grupos, en tres tiempos diferentes y se volverán a secar y pesar en estado seco, por lo que se estudiará deterioro en forma física por medio de la diferencia de peso o pérdida de masa que estos tengan.

Cuando haya finalizado este proceso se procederá a analizar la microestructura de los discos de mortero, por medio de microscopía electrónica, caracterizando el daño generado, observando la disposición de los materiales y la adecuación que estos tuvieron como consecuencia de haber estado en contacto con un medio agresivo.

También se analizará el PH de las soluciones en forma previa y posterior al retiro de las muestras, para poder apreciar los cambios en el grado de acidez.

Así se desprenden del ensayo de inmersión de discos de mortero en solución de sulfato los siguientes análisis:

- Análisis de pérdida de masa
- Análisis del PH de la solución de sulfato
- Análisis con microscopio electrónico

Luego se procederá a realizar una comparación de los resultados obtenidos del análisis de pérdida de masa, con los de una investigación anterior referente al estudio de resistencias mecánicas (flexotracción y compresión) y trabajabilidad de probetas de mortero, con las mismas dosificaciones y adiciones de nanosílice que las de esta investigación.

### 3.2 Discos de mortero a utilizar en el ensayo

Para la elaboración de los discos de mortero se utilizarán probetas de mortero que han sido confeccionadas en forma adicional en un estudio anterior correspondiente al análisis de resistencias mecánicas (flexo-tracción y compresión) y trabajabilidad de mortero con nanomoléculas de sílice, realizado por el alumno Luíís Cárcamo Pérez. Esto debido a que en esta investigación se pretende comparar los resultados obtenidos del análisis de pérdida de masa con los del trabajo anterior y ver la correlación de estos con la presente investigación.

El detalle de los ensayos normalizados de caracterización de áridos para fabricación de morteros utilizados en la elaboración de las probetas se encuentran en el **anexo A** de este trabajo.

#### Dosificación de probetas

En la investigación anterior se construyó 21 “probetas adicionales” cilíndricas de 7 cms. de alto y 2.8 cms. de diámetro en la siguiente configuración:

##### ❖ Para A/C 0,55:

- 2 “probetas adicionales” de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 0% en peso de cemento presente en la mezcla.
- 3 “probetas adicionales” de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 0.5% en peso de cemento presente en la mezcla.
- 2 “probetas adicionales” de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 1.0% en peso de cemento presente en la mezcla.
- 3 “probetas adicionales” de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 1.5% en peso de cemento presente en la mezcla.

##### ❖ Para A/C 0,65:

- 2 “probetas adicionales” de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 0% en peso de cemento presente en la mezcla.
- 3 “probetas adicionales” de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 0.5% en peso de cemento presente en la mezcla.
- 3 “probetas adicionales” de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 1.0% en peso de cemento presente en la mezcla.
- 3 “probetas adicionales” de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 1.5% en peso de cemento presente en la mezcla.

La dosificación de éstas “probetas adicionales” se efectuó según razón A/C (agua-cemento), basándose en “Manual del mortero”, capítulo 7.4 titulado “Dosificación de morteros para cumplir requisitos especificados”. El detalle de la dosificación se encuentra en el **anexo A**.

Materiales base:

- Cemento Melón Especial, grado corriente.
- Arena fina.
- Agua potable

Dosificación corregida mortero tipo A/C= 0.55:

**Tabla 3.1:** Dosificación corregida mortero tipo A/C 0.55

| MATERIAL | DOSIFICACION PARA<br>1 M <sup>3</sup> (1000 litros) |
|----------|---|
| Cemento  | 664 Kg.   |
| Agua     | 326 litros  |
| Arena    | 1085 Kg.  |

Fuente: Cárcamo (2006).

Dosificación corregida mortero tipo A/C= 0.65:

**Tabla 3.2:** Dosificación corregida mortero tipo A/C 0.65

| MATERIAL | DOSIFICACION PARA<br>1 M <sup>3</sup> (1000 litros) |
|----------|---|
| Cemento  | 553Kg.  |
| Agua     | 325 litros  |
| Arena    | 1182 Kg.  |

Fuente: Cárcamo (2006).

Las características y propiedades en cuanto a resistencias mecánicas (flexotracción y compresión) y trabajabilidad ya estudiadas de estas probetas se encuentran en el **anexo B**.

Es importante mencionar que estas probetas tienen una edad de 12 meses, siendo guardadas con protección de papel alu-plas y separadas por dosificación en bolsas Ziploc con cierre hermético para preservarlas y protegerlas del ambiente externo, evitando su contaminación y por ende la posible alteración de resultados.

### 3.2.1 Preparación Discos de Mortero

#### Materiales y equipos utilizar:

- Regla milimétrica
- Lápiz marcador
- Esmeril Angular (con disco incluido para cortar concreto)

Marca: DeWALT

Descripción: 4 ½" (115mm),

Potencia: 800 watts

Velocidad: 10.000 (rpm.)

- Tornillo sujetador

#### Procedimiento:

Se procede a marcar la altura de los discos en las “probetas adicionales” cilíndricas, colocarlos en el tornillo sujetador y luego a cortar los discos con el esmeril angular. Así, las 21 “probetas adicionales” de mortero se cortaron en discos cilíndricos de entre 1,5 y 1,8 cms. de altura y 2,8 cms. de diámetro, quedando 24 muestras o discos que serán utilizados en esta investigación, con la siguiente configuración:

Para dosificación A/C 0.55:

- 3 discos de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 0% en peso de cemento presente en la mezcla
- 3 discos de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 0.5% en peso de cemento presente en la mezcla
- 3 discos de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 1.0% en peso de cemento presente en la mezcla
- 3 discos de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 1.5% en peso de cemento presente en la mezcla

Para dosificación A/C 0.65:

- 3 discos de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 0% en peso de cemento presente en la mezcla
- 3 discos de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 0.5% en peso de cemento presente en la mezcla
- 3 discos de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 1.0% en peso de cemento presente en la mezcla
- 3 discos de mortero, con adición de GAIA Nanosílice de 1.5% en peso de cemento presente en la mezcla

### 3.3 Ensayo de Inmersión Concreto en Solución de Sulfato

#### **Materiales y equipos a utilizar:**

- Agua des-ionizada
- Sulfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) anhidro para análisis  
    Marca: Analytic  
    Concentración: 5000 ppm.  
    Peso molecular: 142.04 grs./mol
- Balanza digital de precisión
- Varilla de vidrio
- Vaso precipitado de 100ml.
- Matraz aforado 2lts.
- 6 recipientes de plástico transparentes con tapa (14 cms. x 14 cms. x 6 cms.)

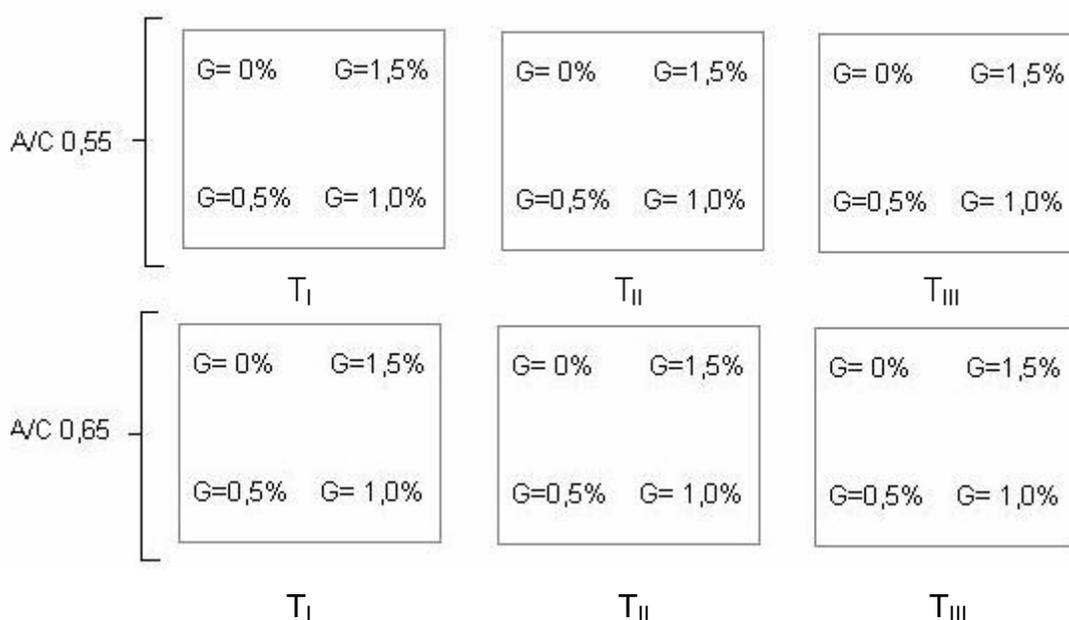
Es importante mencionar que el ensayo se realizará con sulfato de sodio, debido a que entre los tres sulfatos estudiados en el capítulo anterior éste corresponde al que causa un daño intermedio al concreto. Además, la concentración indicada se determina de acuerdo a lo indicado en la tabla 2.15 del mismo capítulo, considerando una concentración severa de sulfatos, en contacto con el concreto. Por lo que se tiene un agente agresor que provoca un daño intermedio, pero en una solución de concentración considerada severa, para el concreto.

#### **Preparación de solución**

Debido a que el reactivo sulfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) posee una concentración de 5000 ppm., por cada litro de solución se necesitan 5 grs. Para este ensayo se requieren 2 litros de solución por lo que se pesan en la balanza digital de precisión 10 grs. del reactivo. Este soluto se disuelve de a poco colocándolo en el vaso precipitado, agregando un poco de solvente (agua desionizada) y revolviendo en forma constante con la varilla de vidrio, ya que como este reactivo es anhidro al irse hidratando está la posibilidad de que se formen grumos y la solución quede poco homogénea. Luego se vierte el líquido en el matraz aforado de dos litros y se le va agregando solvente, hasta completar la cantidad requerida. Previamente se sacan todos los residuos que puedan quedar del vaso precipitado, donde se disolvió el reactivo (paredes, contorno, etc.), enjuagando bien para que no quede nada adherido. Luego cuando está aforado el matraz se tapa y se agita un tiempo considerable para que la solución quede homogénea.

## Metodología

Los recipientes plásticos deben ser lavados y secados. Luego son marcados con la posición de cada disco y el tiempo de sacado, con marcador permanente, ya que los discos se ordenaran en los recipientes de la siguiente manera:



**Figura 3.1:** Esquema ordenamiento de los recipientes y los discos en su interior identificados por el % de nanosílice “G” en peso de cemento que contiene cada uno de ellos, y además indicando el tiempo en que serán sacados de la solución. (Fuente: Elaboración propia)

Luego se introducen los discos en sus respectivas ubicaciones dentro de los recipientes y se procede a vaciar la solución en cada uno de ellos hasta que los discos queden completamente sumergidos. Posteriormente se marca el nivel de la solución en los recipientes, para poder tener un control de éste y que no se evapore y por último se tapan los recipientes para evitar la contaminación externa de su interior y que de esta forma no se alteren los resultados.

Este ensayo se realizó a temperatura y humedad constantes.



**Figura 3.2 y 3.3:** Discos introducidos en sus respectivos recipientes plásticos, sumergidos completamente, marcando el nivel de la solución en estos. (Fuente: Elaboración propia)

En forma posterior se sacaran las probetas en tres tiempos distintos  $T_I$ ,  $T_{II}$ ,  $T_{III}$ , que son determinados de acuerdo al primer cambio en las probetas, este cambio se

observó al día 13, ya que en la superficie de las muestras se formaron pequeñas manchas blancas, por lo que los tiempos de análisis quedaron determinados así:

$T_0 = 0$  días

$T_I = 13$  días

$T_{II} = 26$  días

$T_{III} = 39$  días



**Figura 3.4:** Muestra de manchas blancas en la superficie de disco de concreto con nanomoléculas de sílice, producto de la acción de sulfatos. (Fuente: Elaboración propia)

### 3.3.1 Análisis de diferencia de Peso

#### Materiales y equipos a utilizar

- Termómetro de precisión ( $0^{\circ}$  C- $200^{\circ}$  C)
- Pinzas
- Balanza de precisión digital
  - Marca: Swiss Quality
  - Modelo: Precisa 310M
  - Unidad de medida: gramos con una exactitud de tres decimales
  - Capacidad máxima: 310 grs.
- Balanza detectora de humedad
  - Marca: OHAUS
  - Modelo: 6010 H
  - Unidad de medida: gramos
  - Capacidad máxima: 10 grs.

#### Metodología

Una de las formas de medir la degradación que se utilizará en esta investigación es la comparación del peso 100% seco de los discos de mortero (0% de humedad)

antes de ser sometidos a la solución de sulfato, que es el agente agresor, y después de ser sometidos a ésta.

Primero se realiza un registro de cada disco de acuerdo a sus características de relación agua-cemento, porcentaje de adición de nanosílice en peso de cemento y tiempo en que será retirada de la solución, por ejemplo: A/C0.65 -1,5 -III, será la muestra con una relación agua cemento de 0.65, con una adición de nanosílice de 1,5% en porcentaje del peso de cemento, y que será extraída en el tiempo  $T_{III}$ .

Luego se pesan en la balanza de precisión registrando el peso de cada uno ellos, en tiempo  $t_0=0$ , antes de ser secados.

En forma posterior se comienzan a secar los discos ubicándolos en el plato de la balanza detectora de humedad en grupos de a cuatro, a una temperatura entre los 105°C y 125°C.



**Figura 3.5 y 3.6:** Secado discos de mortero mediante balanza detectora de humedad. (Fuente: Elaboración propia)

Luego, cada cierto tiempo los discos se toman de a uno con la ayuda de pinzas y se trasladan a la balanza de precisión, registrando el peso de cada uno de ellos. Esto debido a que no fue posible medir el peso de las muestras en la misma balanza detectora de humedad, ya que ésta solo tenía una capacidad de 10 grs. y las muestras pesan alrededor de 20 grs. cada una, por lo que la balanza se utilizó sólo para el secado de las muestras, pero no para el registro de su peso (por este motivo se decidió secarlas en grupos de a cuatro para agilizar el procedimiento que es bastante lento y pesarlas en una balanza de precisión).

En este caso se comenzó con dos intervalos de tiempo de 20 minutos, luego se consideraron dos intervalos de 10 minutos, finalizando con medidas a intervalos de cinco minutos cada uno, registrando los pesos para cada tiempo, continuando hasta que no se observaba ningún cambio entre una pesada y otra (para cada muestra), en al menos tres pesadas consecutivas, lo que significa que la muestra o disco se encontraba en estado 100% seco, para el tiempo  $T_0$ .

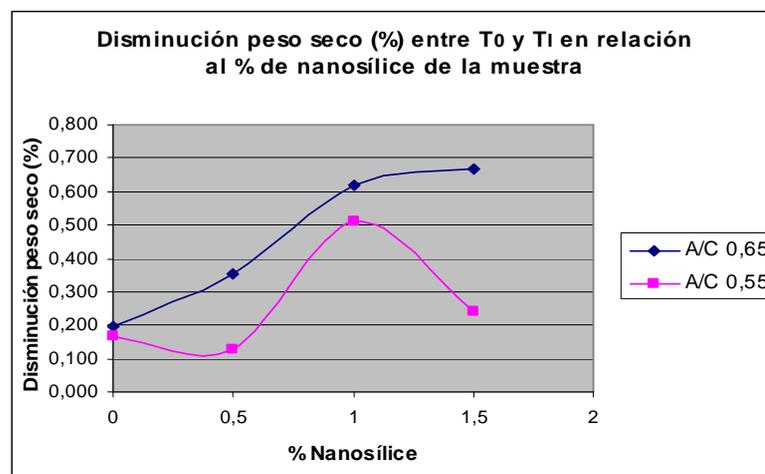
|                    |                         |                                   |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Tiempos de secado: | $t_1 = 20 \text{ min.}$ |                                   |
|                    | $t_2 = 40 \text{ min.}$ | $\Delta t_1 = 20 \text{ min.}$    |
|                    | $t_3 = 50 \text{ min.}$ | $\Delta t_2 = 20 \text{ min.}$    |
|                    | $t_4 = 60 \text{ min.}$ | $\Delta t_3 = 10 \text{ min.}$    |
|                    | $t_5 = 65 \text{ min.}$ | $\Delta t_4 = 10 \text{ min.}$    |
|                    | $t_6 = 70 \text{ min.}$ | $\Delta t_5 = 5 \text{ min}$      |
|                    | $t_7 = 75 \text{ min.}$ | $\Delta t_6 = 5 \text{ min ....}$ |

Luego se realiza el mismo procedimiento de secado para las muestras que se van sacando en los tiempos  $T_I$ ,  $T_{II}$  y  $T_{III}$ , obteniendo de esta forma los pesos secos para estos tiempos, datos suficientes para la elaboración de resultados.

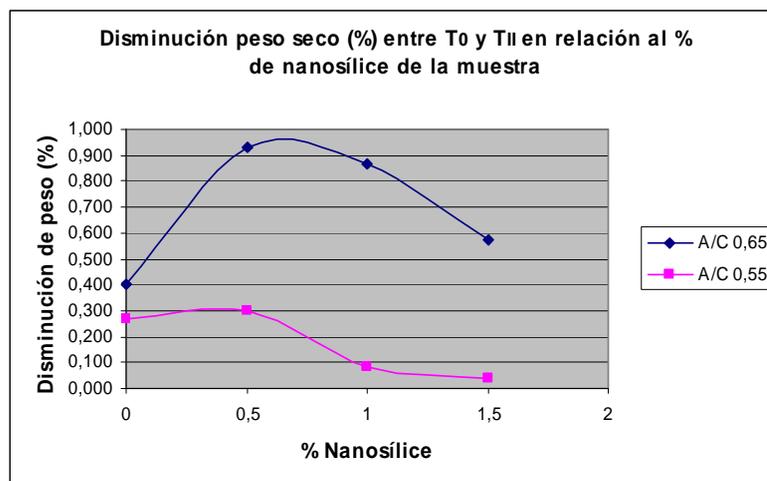
### 3.3.1.1 Resultados Obtenidos

#### Disminución de peso seco en relación al % de adición de nanosílice

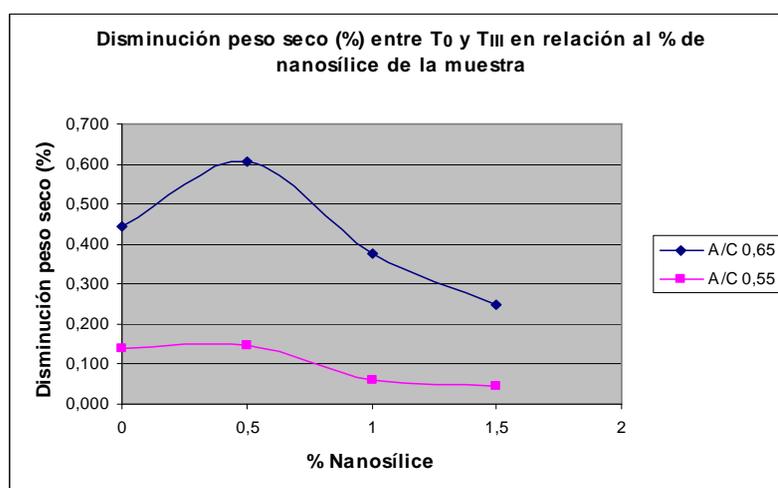
A continuación se entregan los resultados obtenidos, mediante gráficos, de acuerdo a la disminución de peso seco entre los tiempos en que se extrajeron las muestras de la solución ( $T_I$ ,  $T_{II}$  y  $T_{III}$ ) y el peso seco de las muestras antes de ser sometidas al ataque químico, correspondientes al tiempo  $T_0$ .



**Figura 3.7:** Gráfico disminución peso seco (%) entre  $T_0$  y  $T_I$  en relación al % de nanosílice de la muestra. (Fuente: Elaboración propia)



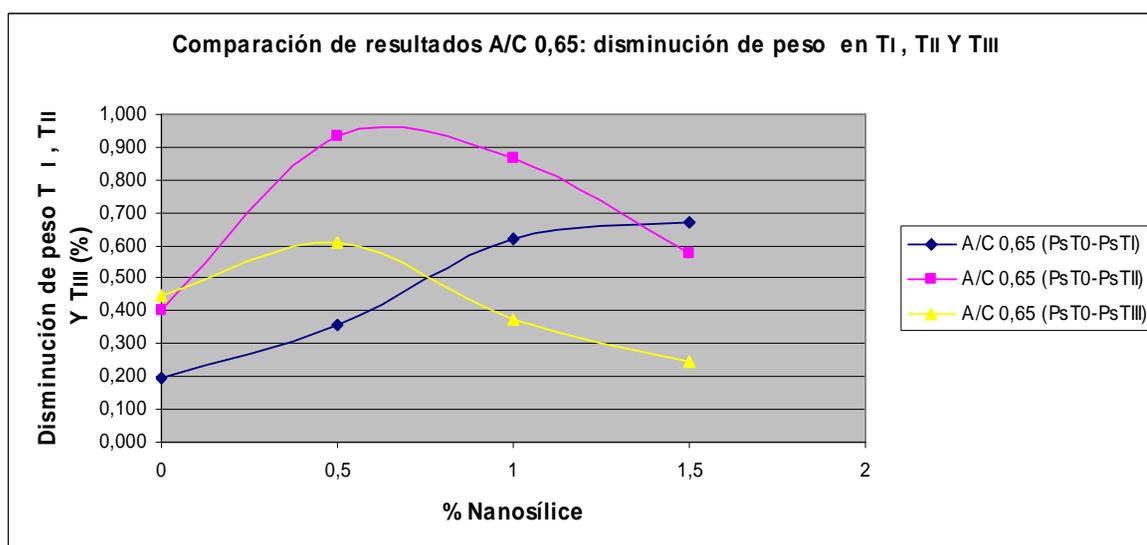
**Figura 3.8:** Gráfico disminución peso seco (%) entre T<sub>0</sub> y T<sub>II</sub> en relación al % de nanosílice de la muestra. (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 3.9:** Gráfico disminución peso seco (%) entre T<sub>0</sub> y T<sub>III</sub> en relación al % de nanosílice de la muestra. (Fuente: Elaboración propia)

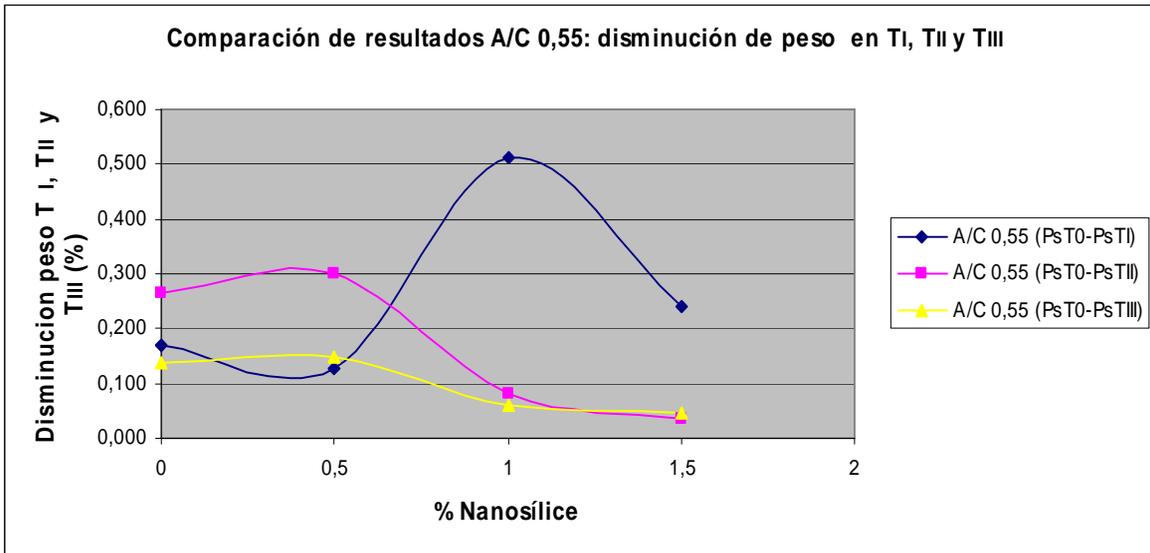
### Comparación de resultados

➤ Para A/C 0.65:



**Figura 3.10:** Gráfico comparación de resultados para A/C 0,65 en relación a la disminución de peso seco entre T<sub>I</sub>, T<sub>II</sub> y T<sub>III</sub> y T<sub>0</sub>. (Fuente: Elaboración propia)

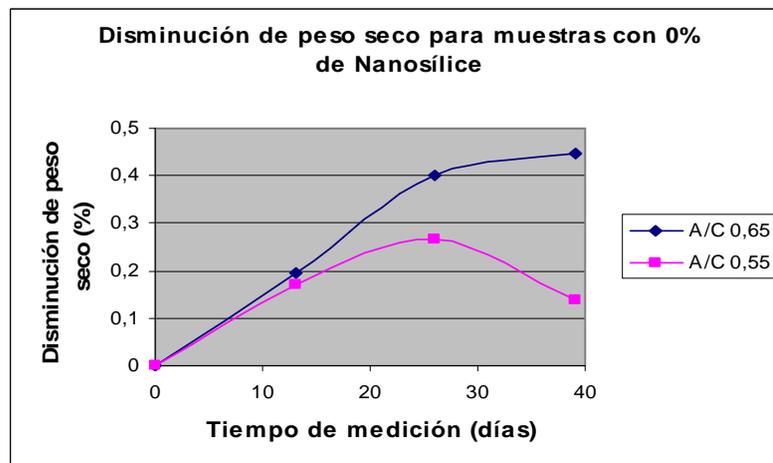
➤ Para A/C 0.55:



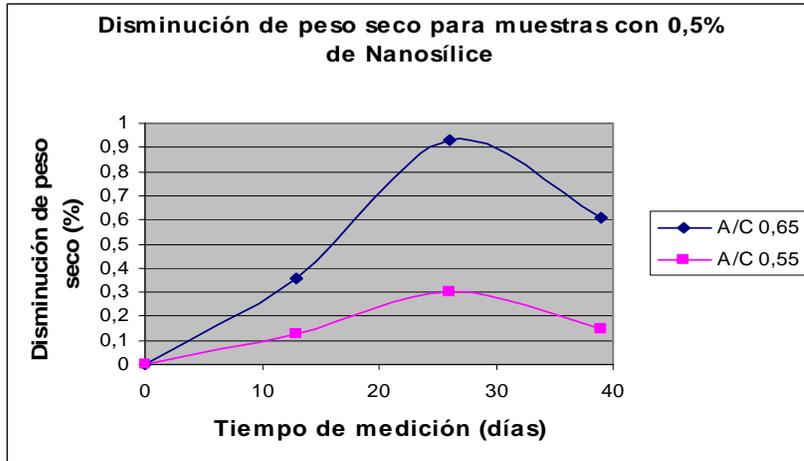
**Figura 3.11:** Gráfico comparación de resultados para A/C 0.55 en relación a la disminución de peso seco entre  $T_I$ ,  $T_{II}$  y  $T_{III}$  y  $T_0$ . (Fuente: Elaboración propia)

Disminución de peso seco en el tiempo para cada adición de nanosílice

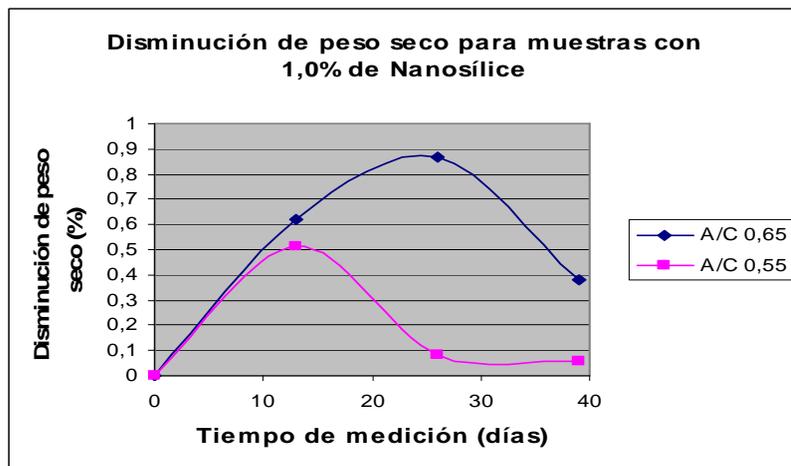
A continuación se entregan los resultados obtenidos, mediante gráficos, de acuerdo a la disminución de peso seco en el tiempo para cada adición de nanopartículas de sílice. Recordando que  $T_I$  corresponde a los 13 días de permanencia de los discos en la solución,  $T_{II}$  a 26 días y  $T_{III}$  corresponde a 39 días.



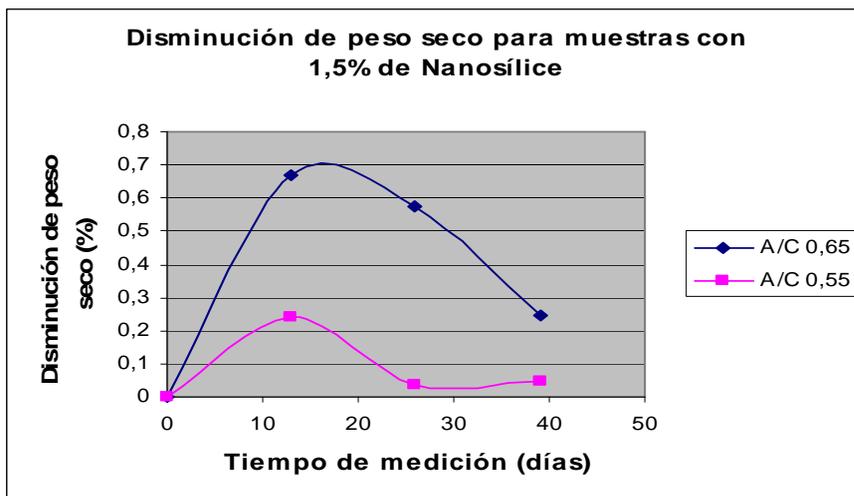
**Figura 3.12:** Gráfico disminución de peso seco en el tiempo para muestras sin adición de nanosílice. (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 3.13:** Gráfico disminución de peso seco en el tiempo para muestras con 0.5% de adición de nanosílice (respecto al peso de cemento usado). (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 3.14:** Gráfico disminución de peso seco en el tiempo para muestras con 1.0% de adición de nanosílice (respecto al peso de cemento usado). (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 3.15:** Gráfico disminución de peso seco en el tiempo para muestras con 1.5% de adición de nanosílice (respecto al peso de cemento usado). (Fuente: Elaboración propia)

Las tablas correspondientes a los gráficos presentados en este capítulo se encuentran en el **anexo C**.

### 3.3.1.2 Análisis descriptivo y discusión de resultados

#### **Análisis descriptivo de disminución de peso seco en relación al % de adición de nanosílice**

Se analizará los resultados de acuerdo a la disminución de peso seco de los discos de mortero, en cada uno de los tiempos  $T_I$ ,  $T_{II}$ ,  $T_{III}$ , en relación al peso seco de los mismos discos antes de ser sometidos a la solución de sulfato de sodio (agente agresor), pertenecientes al tiempo  $T_0$ .

a) Disminución de peso seco entre  $T_0$  y  $T_I$  (ver figura 3.7):

- Para A/C 0.65: en general existe un aumento en la pérdida de masa en relación a la incorporación de nanosílice en las muestras, el cual se representa de una forma cercana a la linealidad, es decir, que a medida que aumentan las adiciones de nanosílice, aumenta también la disminución de peso seco (aumenta la pérdida de masa).
- Para A/C 0.55: Si se analiza el comportamiento del concreto por tramos, se tiene lo siguiente:
  - entre 0% y 0.5% de adición de nanosílice, se aprecia una leve decaimiento en la curva, lo que indica que ha perdido una mayor cantidad de masa la muestra sin adición de nanosílice que la que tenía un 0.5% de ésta.
  - entre 0.5% y 1.0% de adición de nanosílice, se aprecia aproximadamente el doble de pérdida de masa para la muestra con 1.0% de nanopartículas y además esta pérdida es mayor que la muestra sin adición de nanosílice
  - para el tercer tramo entre 1.0% y 1.5% de adición de nanosílice, se aprecia una baja en la pérdida de masa, donde el disco con 1% de adición de nanopartículas presenta una mayor pérdida que la correspondiente a la muestra con 1,5% de adición de nanosílice, pero dentro de este tramo aunque la curva decae las disminuciones de peso son mayores que la muestra sin adición de nanosílice.

Es decir que aunque para A/C 0.55 es más irregular el comportamiento, en todos los casos a excepción del 0.5% de adición de nanosílice, se ve que las muestras con adición perdieron mayor cantidad de masa que la muestra sin nanosílice.

b) Disminución de peso seco entre  $T_0$  y  $T_{II}$  (ver figura 3.8):

Para A/C 0.65: Entre 0% y 0.5% de adición de nanosílice, se observa que hay mayor pérdida de masa en la muestra que contiene un 0.5% de adición de nanopartículas en relación a la muestra sin nanosílice, existiendo una pronunciada diferencia entre estos puntos. A partir de 0.5% de nanosílice se observa un decaimiento en la curva, lo que indica que a mayor cantidad de ésta adición existe una menor cantidad de pérdida de masa en las muestras. Además se evidencia en todos los discos de mortero con adición de nanosílice de 0.5% en adelante, que a pesar de que tuvieron un comportamiento esperado, han presentado un mayor deterioro que el que no tiene nanosílice.

- Para A/C 0.55: Entre 0% y 0.5% de adición de nanosílice, se ve una leve diferencia, indicando que hay un mayor deterioro en el caso de 0.5% que en la muestra sin adición. A partir de 0.5% de adición de nanosílice se aprecia un comportamiento similar al anterior, pero con un decaimiento más suave de la curva, indicando al final de esta una tendencia a ser constante. Todas las muestras con excepción de la que contiene 0.5% de nanosílice, presentan menos cantidad de masa que la muestra sin adición.

c) Disminución de peso seco entre  $T_0$  y  $T_{III}$  (ver figura 3.9):

- Para A/C 0.65: se ve una curva mas suave que tiende a comportamiento de A/C 0.55 en el tiempo anterior, con valores de disminución menores que en el tiempo anterior. Si se analiza entre 0% y 0.5% de adición de nanosílice se observa que el primero tiene menos deterioro que el segundo, pero existe un acercamiento importante entre estos dos puntos. Desde el 0.5% en adelante se aprecia que existe disminución a medida que aumenta el % de nanosílice, menores que en el tiempo anterior, pero la curva es más suave.
- Para A/C 0.55: se aprecia una curva similar a la analizada en forma previa, pero con valores menores y más suave en toda su extensión que tiende a ser constante en su fin.

### **Discusión de resultados:**

Se podría pensar que la situación dada para la disminución de peso seco entre  $T_0$  y  $T_I$  (figura 3.7) pone en duda el beneficio que otorga la nanosílice al concreto, en el sentido que se debería esperar que ésta proteja de algún modo a las muestras del medio agresivo. Esto se explica de la forma siguiente, ya que la teoría indica que al introducir nanopartículas en la formación de un material, existe un efecto de incremento notable del área superficial de éste por unidad de volumen, de alrededor de cinco millones de metros cuadrados en el caso del concreto con nanopartículas de sílice, lo que proporciona una mayor reactividad química, que provoca en una primera instancia,

haya una mayor pérdida de masa en las muestras a medida que se incrementa el porcentaje de nanosílice en ellas. Esto ocurre debido que al principio de la reacción de hidratación del cemento, tanto éste como la nanosílice son sustancias de tipo amorfo. A medida que transcurre el tiempo, comienzan a formarse nano cristales de CSH (CSH:  $C=CaO$ ,  $S=SiO_2$ ,  $H=H_2O$ ), silicatos de calcio hidratados y de acuerdo a las reacciones químicas estudiadas, parte de estos silicatos al tomar contacto con la solución de sulfato de sodio producen la formación de yeso y etringita.

Por otra parte, que el caso de A/C 0.55 sea más irregular se puede explicar por que al tener mayor cantidad de cemento, existe una menor presencia de vacíos entre las partículas y un material menos poroso, por lo que el agente agresor tiene un proceso de penetración más restringido y tal vez necesite de un mayor tiempo de acción en una primera instancia.

Al establecer la disminución de peso seco de los discos de mortero en relación al  $T_0$  y  $T_{II}$  (figura 3.8), la situación que ocurre en ambas razones de A/C desde el 0.5% de adición de nanosílice en adelante se puede considerar esperada, ya que a medida que el cemento se hidrata, las partículas de nanosílice se van combinando con los elementos del mortero, distribuyéndose en todos los huecos o espacios vacíos entre los agregados y las partículas de cemento, proporcionando de esta manera un concreto más cohesionado, mucho mas homogéneo, con menor porosidad, tamaño de poros y vacíos entre las partículas, es decir, un concreto con mejores características en forma interna y superficial, que ya actúa como un agente que dificulta la acción de los sulfatos en el tiempo, por encima de ser un agente que proporciona el aumento de reactividad química, que es lo que ocurrió en el tiempo anterior. Lo que ocurre entre 0% y 0.5% de adición de nanosílice, se expresa debido a que el ataque de la solución de sulfato de sodio aún se encuentra en proceso de transición entre lo explicado en el párrafo anterior (respecto de la reactividad) y lo que ocurre en este tiempo (que sería el comportamiento esperado).

En la disminución de peso seco de los discos de mortero en relación al  $T_0$  y  $T_{III}$  (figura 3.9), éste proceso de transición tiene una tendencia de comenzar a regularizarse a lo esperado, sin cambios tan abruptos entre un punto y otro para el caso de A/C 0.65 y una mínima diferencia en la disminución entre 0% y 0.5% de adición de nanosílice para A/C 0.55. Comportándose además de forma esperada al igual que en el tiempo anterior pero con menores disminuciones.

La transición se da en torno a este rango 0% y 0.5% de adición de nanosílice debido a que éste es justamente el intervalo donde las partículas se encuentran menos ordenadas, con mas espacios entre las partículas lo que genera menor homogeneidad

y aglomeración de constituyentes, en relación de las otras adiciones, lo que provoca que la transición sea un poco mas lenta entre estos puntos, en relación al resto.

Es de importancia destacar que para los tres tiempos se observó claramente que las muestras con A/C 0.65 tenían mayores disminuciones de peso seco, que las muestras con A/C 0.55, lo que se traduce en una mayor pérdida de material. Además las muestras con más cantidad de cemento (A/C 0.55) tuvieron un comportamiento mejor en relación a lo esperado, sobre todo en los casos de comparación de peso seco de muestras de  $T_0$  con  $T_{II}$  Y  $T_{III}$ .

De acuerdo a lo que la literatura indica el agente agresor que ataca al concreto, que en este caso corresponde una solución de sulfato de sodio de concentración severa, puede hacerlo por tres formas o mecanismos de infiltración, que definen la facilidad con que los agentes pueden entrar o salir de un medio semi-permeable como lo es el concreto:

- ❖ *Absorción.* el proceso por el cual el concreto capta una solución acuosa, la cual es atraída por medio de capilaridad. El grado con el cual el liquido entra es llamado absorberencia y depende del tamaño e interconexión de los poros capilares en el concreto y del grado de humedad que existe de la superficie.
- ❖ *Permeabilidad.* La siguiente propiedad caracteriza cuantitativamente la facilidad con la cual un fluido pasa, bajo la acción de una presión diferencial. Esta propiedad depende del grado de presión y del tamaño de interconexión de los poros capilares en el concreto.
- ❖ *La difusión.* el proceso por el cual un vapor, gas o el ión pueden pasar en el concreto bajo la acción de una cierta concentración. La difusión define el grado de movimiento del agente de acuerdo a la concentración de éste en la superficie del concreto, el tipo de agente que ingresa y cualquier reacción con la hidratación de la pasta de cemento, y el tamaño e interconexión de los poros capilares en el concreto.

Se puede apreciar que estos tres mecanismos de infiltración dependen en forma unánime del tamaño e interconexión de los poros que tenga el concreto, entonces es claro que a medida que el mortero aumenta su razón A/C, trae como consecuencias: aumento de espacios vacíos entre granos, más porosidad, poros de tamaños más grandes, etc., y se reduzcan las adiciones de nanosílice, que trae como consecuencias: menor homogeneidad y cohesividad, que se aumente la porosidad y tamaños de poros, etc., se facilite entonces la infiltración y por ende el ataque del agente químicamente agresivo, que en este caso es una solución de sulfato de sodio.

### **Análisis descriptivo de disminución de peso seco en el tiempo para cada adición de nanosílice**

a) Para muestras con A/C 0.65: se observa que los discos sin adición presentan una tendencia a seguir deteriorándose en el tiempo, cosa que mejora a medida que se van incluyendo adiciones, con 0.5% llega a un máximo estado de deterioro, cercano a los 26 días y luego esto disminuye. Esta disminución se ve aún mas acentuada al aumentar a un 1.0% de adición, donde es posible notar la máxima pérdida de peso, y se encuentra cercana a unos 24 o 25 días. Luego al ver adición de 1.5% de nanosílice el punto máximo de la curva se encuentra alrededor de los 15 días, desplazándose en forma notable y se acentúa la disminución de pérdida de peso después de este.

b) Para muestras con A/C 0.55: se observa que los discos sin adición tiene un máximo alrededor de los 26 días, que luego decae. Con 0.5% de adición de nanosílice hay un comportamiento similar llega a un máximo estado de deterioro, cercano a los 26 días y luego esto disminuye. Al aumentar a un 1.0% de ésta adición, la situación cambia, la máxima pérdida de peso se encuentra cercana a unos 13 días, que después comienza a decaer para tender a ser prácticamente constante después de los 26 días. Luego al ver adición de 1,5% de nanosílice, el comportamiento es similar al anterior, el punto máximo de la curva se encuentras alrededor de los 13 días, pero se reduce de manera considerable, a la mitad, para luego decaer y terminar en una tendencia constante.

### **Discusión de resultados:**

Se aprecia que el comportamiento de los discos de mortero con las distintas adiciones de nanosílice es el esperado de acuerdo con lo que plantea la teoría a mayor cantidad de nanosílice existe una disminución en la pérdida de material de las muestras a lo largo del tiempo, que además es acelerado a medida que se aumentan las adiciones de nanosílice, es decir, el proceso de deterioro además de finalizar con menores pérdidas de material se produce antes, que en las muestras sin adición.

La disminución en el deterioro se explica debido a que a mayor porcentaje de nanopartículas se genera a nivel superficial una mayor consistencia, más aglomeración y cohesión, con menos espacios entre los microconstituyentes del mortero lo que le da una morfología distinta en relación a sin adiciones de nanosílice, con partículas mucho mas ordenadas, una superficie mas homogénea, con menor porosidad y menor tamaño de poros, como se concluye de la caracterización del mortero con adiciones de nanosílice a través de microscopio electrónico (sección 4.3.6.1, Cárcamo, 2006), por lo que se disminuye en forma considerable el ataque de las soluciones de sulfatos y sus mecanismos de infiltración (explicados anteriormente), se ven mucho mas reducidos,

disminuyendo las posibilidades de ataque e imposibilitando que se concrete un daño de mayores proporciones.

Por otra parte, la rapidez del proceso se puede atribuir a lo explicado en relación al aumento de superficie potencialmente reactiva, lo que genera una celeridad en el proceso de deterioro, en el sentido que este proceso se da en forma anticipada.

De los resultados y discusiones anteriores se pondría recomendar entonces que para los tipos de relaciones A/C evaluados existiría una mejora en la durabilidad en relación a una disminución del deterioro causado por la acción de los sulfatos, en adiciones de nanosílice por sobre 0.5% en relación al peso de cemento, ya que si se utilizan adiciones por debajo de este rango no existen mejoras reales, en comparación de una muestra patrón sin adición. Se extrae también que para A/C 0.55 si se realizan adiciones por sobre un 1.0% de nanosílice no existe una disminución notable del deterioro (comparando lo que ocurre en 1.0% y 1.5% de adición de nanosílice), que justifique la utilización de un 1.5% de este aditivo, cosa que no ocurre en A/C 0.65 ya que los resultados indican que la utilización de 1.5% de aditivo sería necesaria.

De esta forma las mejoras en el material en cuanto a durabilidad en relación a una disminución del deterioro por acción de los sulfatos para A/C 0.55 con un 1.0% de adición de nanosílice es de un 60% y para A/C 0.65 con un 1.5% de ésta adición es de un 45%.

### **3.3.1.3 Comparación de resultados con propiedades mecánicas de flexotracción y compresión y propiedades de trabajabilidad**

Si se realiza una comparación entre las propiedades de resistencias mecánicas de flexotracción y compresión y de la propiedad de trabajabilidad, realizadas en una investigación anterior (Cárcamo, 2006), con respecto a la durabilidad de morteros con nanomoléculas de sílice en relación a la disminución de deterioro por acción de sulfatos, se aprecia que en todos los casos la nanosílice contribuyó a un mejoramiento en las características del material, donde se establecieron adiciones óptimas para cada una de ellas, como es posible apreciar en la siguiente tabla:

**Tabla 3.3:** Óptimas adiciones para propiedades de resistencias mecánicas, trabajabilidad y durabilidad en relación a la disminución de deterioro por acción de sulfatos

|             |                                   | Flexotracción | Compresión | Trabajabilidad | Durabilidad en relación a la disminución de deterioro por acción de sulfatos |
|-------------|-----------------------------------|---------------|------------|----------------|--|
| A/C<br>0.55 | Óptimo % de adición de nanosílice | 0.5 - 1.0     | 0.5        | 1.5            | 1.0  |
|             | Mejora                            | 5%            | 24%        | 85%            | 60%**  |
| A/C<br>0.65 | Óptimo % de adición de nanosílice | 1.0           | 0.5-1.0    | 1.0            | 1.5  |
|             | Mejora %                          | 15%           | 21%*       | 73%            | 45%**  |

\*corresponde al 0.5% de adición.

\*\*corresponde a mejora calculada para el tiempo  $T_{III}$ .

Fuente: elaboración propia

Aunque las adiciones óptimas son distintas no son excluyentes unas de otras, ya que en ningún caso se aprecia una desmejora o una perturbación negativa en el material por aumentos en la adición de nanosílice sobre el óptimo, sino que solo se consideran ineficientes. Además, si se comparan las propiedades del concreto endurecido, como son las resistencias mecánicas y la durabilidad, si bien la materia presenta reacciones dependientes, unas con otras, en todos sus niveles, tanto en los superficiales como los mas internos, el comportamiento de la superficie de un material y el de sus capas internas difieren bastante según la mayoría de los materiólogos, pues el ordenamiento atómico en ambos lugares es a veces muy distinto.

Es importante mencionar que en la mayoría de los casos existe una tendencia en la que: razón A/C 0.65 necesita una cantidad mayor o igual de nanosílice para alcanzar el óptimo, que A/C 0.55. Esto se explica ya que A/C 0.65 al tener mayor cantidad de agua, implica más espacios entre granos, se requiere mayor cantidad del aditivo para rellenar estos vacíos.

### 3.3.2 Análisis pH solución sulfato de sodio

#### Potencial hidrógeno

La palabra pH es la abreviatura de "pondus Hydrogenium". Esto significa literalmente el peso del hidrógeno. El pH es un indicador del número de iones de hidrógeno. Tomó forma cuando se descubrió que el agua estaba formada por protones e iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>). En 1909 el químico danés Sorensen definió el potencial

hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la actividad de los iones hidrógeno. Esto es:

$$\text{pH} = -\log_{10} [a_{\text{H}^+}]$$

Desde entonces, el término pH ha sido universalmente utilizado por la facilidad de su uso, evitando así el manejo de cifras largas y complejas. En disoluciones diluidas en lugar de utilizar la actividad del ión hidrógeno, se le puede aproximar utilizando la concentración molar del ión hidrógeno. Por ejemplo, una concentración de  $[\text{H}^+] = 1 \times 10^{-7} \text{ M}$  (0,0000001) es simplemente un pH de 7 ya que:

$$\text{pH} = -\log[10^{-7}] = 7$$

El pH no tiene unidades; se expresa simplemente por un número, típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo neutras aquellas con  $\text{pH} = 7$ , indica que el número de protones iguala al número de iones hidroxilo. Son ácidas las disoluciones con pH menores a 7, es decir, cuando el número de protones ( $\text{H}^+$ ) es mayor al número de iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) y básicas las que tienen pH mayores a 7, es decir, cuando el número de iones hidroxilo es mayor que el número de protones.

En disoluciones no acuosas, o fuera de condiciones normales de presión y temperatura, un pH de 7 puede no ser el neutro. El pH al cual la disolución es neutra estará relacionado con la constante de disociación del disolvente en el que se trabaje.

El valor del pH se puede medir de forma precisa mediante un pH-metro, un instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (generalmente de plata/cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ión hidrógeno. También se puede medir de forma aproximada el pH de una disolución empleando *indicadores*, ácidos o bases débiles que presentan diferente color según el pH. Generalmente se emplea *papel indicador*, que se trata de papel impregnado de una mezcla de indicadores.

A pesar de que muchos potenciómetros tienen escalas con valores que van desde 1 hasta 14, los valores de pH pueden ser menores que 1 y mayores que 14.

### **Materiales y equipos a utilizar**

- pH-metro digital
  - Marca: WTW (Wissenschaftlich Technische Werkstätten)
  - Modelo: Inolab pH 720
- Vaso precipitado 50 ml.

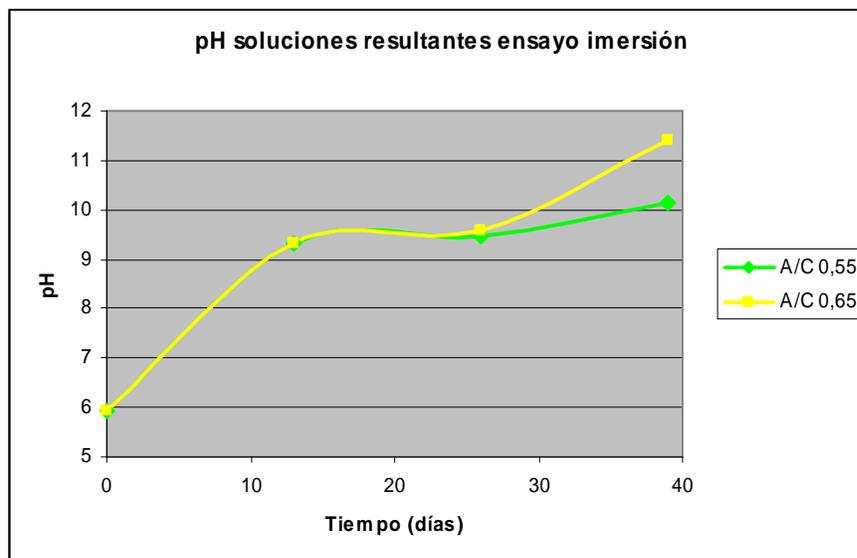
## Metodología

Una vez calibrado el equipo por el operador, se procede a limpiar el sensor detector de pH de posibles residuos que hayan quedado producto de mediciones anteriores. Luego se procede a llenar el vaso precipitado, que debe estar limpio, con la solución que se desea medir y se introduce el sensor, a partir de este momento se debe esperar hasta que el valor de pH que aparece en la pantalla del pH-metro sea constante por un par de minutos. De esta forma se obtiene el valor del pH para las siguientes soluciones:

- ❖ Solución de sulfato de sodio utilizada como medio agresivo en el ensayo de inmersión
- ❖ Soluciones resultantes del ensayo de inmersión, es decir, aquellas que quedan en los recipientes una vez retirados los discos de morteros en los tiempos  $T_I = 13$  días,  $T_{II} = 26$  días y  $T_{III} = 39$  días.

### 3.3.2.1 Resultados Obtenidos

A continuación se muestra los resultados obtenidos de la medición realizada con el pH-metro a cada una de las soluciones mencionadas en forma anterior, destacando que el valor de pH indicado para los 0 días es el que corresponde a la solución de sulfato de sodio utilizada como medio agresivo en el ensayo de inmersión.



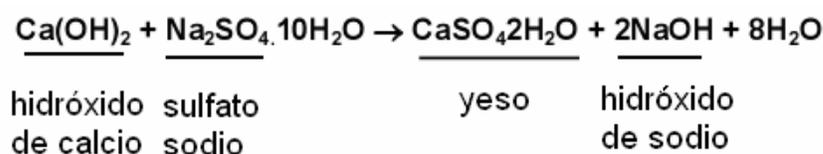
**Figura 3.16:** Gráfico pH soluciones utilizadas en el ensayo de inmersión en relación al día en que fueron sacados los discos de mortero. (Fuente: elaboración propia)

Las tablas correspondientes a los gráficos presentados en este capítulo se encuentran en el **anexo C**.

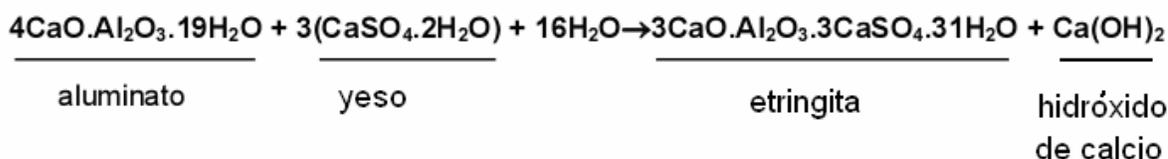
### 3.3.2.2 Análisis descriptivo y discusión de resultados

Es evidente el aumento de pH de las soluciones en ambas dosificaciones a través del tiempo. Comienza de forma brusca en los primeros 13 días para luego aumentar en forma más suave en los días posteriores, que es mayor para A/C 0.65 a partir del día 26, terminando en el día 39 con un valor de pH mayor que para A/C 0.55.

De acuerdo a la teoría revisada se puede apreciar que la reacción química del ataque de soluciones de sulfato de sodio al concreto es doble, primero el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del silicato bicálcico del cemento, reacciona con el sulfato de sodio generando yeso o sulfato de calcio (secundario) e hidróxido de sodio.



El yeso a su vez, que en su mayoría es secundario ataca al aluminato tricálcico formando etringita e hidróxido de calcio.



De estas reacciones quedan entonces los siguientes compuestos: yeso e hidróxido de sodio (de la primera) y etringita e hidróxido de calcio (de la segunda). El yeso que no alcanzó a reaccionar con el aluminato y la etringita resultantes son compuestos poco solubles (estado prácticamente sólido), en cambio, los hidróxidos de sodio y calcio, son bases muy solubles, que explican el aumento de pH en las soluciones a través del tiempo. La solución inicial de sulfato de sodio que es ácida (pH 5.92) toma contacto con los hidróxidos, provenientes de las reacciones químicas descritas, los que van modificando su pH. Comienza a aumentar la cantidad de iones hidroxilos, llegando a un pH neutro alrededor de los 4 días, luego sigue aumentando a medida que aumenta la cantidad de hidróxidos en el tiempo, transformándose en una solución básica, por sobre pH = 7, terminando a los 39 días con pH = 10.15 para A/C 0.55 y pH = 11.42 para A/C 0.65 (más de 100.000 veces más básico que cuando aun no tenia contacto con los discos de mortero).

Esta diferencia en el valor del pH a los 39 días entre ambas dosificaciones, que expresa un mayor valor de pH para A/C 0.65, se explica ya que al aumentar la cantidad de agua en la mezcla se produce un aumento de espacios vacíos, mayor porosidad y poros de tamaños más grandes, lo que facilita el ingreso del agente químicamente

agresivo en el concreto a través de los mecanismos de infiltración (absorción, permeabilidad y difusión), generando reacciones químicas en mayor cantidad de zonas, lo que se traduce en una mayor cantidad de compuestos básicos resultantes, capaces de diluirse en la solución.

### **3.3.3 Análisis microscopia electrónica**

#### Microscopio Electrónico de Barrido (SEM o MEB)

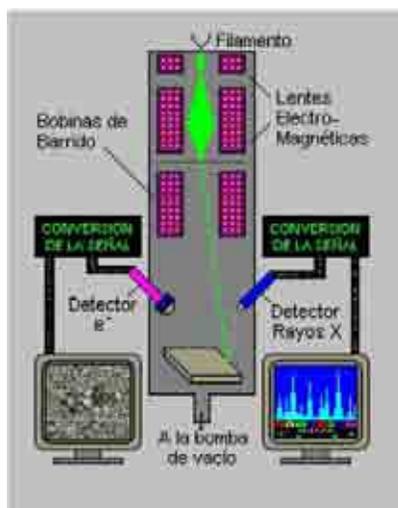
El microscopio electrónico de barrido (SEM o MEB) es el mejor método adaptado al estudio de la morfología de las superficies. A diferencia de un microscopio óptico que utiliza fotones del espectro visible, la imagen entregada por el SEM se genera por la interacción de un haz de electrones que "barre" un área determinada sobre la superficie de la muestra.

La parte principal de un microscopio electrónico de barrido es la denominada columna de electrones la cual lleva alojados en su interior los siguientes elementos:

- Un cañón de electrones con un filamento que actúa como emisor o fuente de iluminación, por analogía con un sistema óptico.
- Un sistema de lentes electromagnéticas encargado de focalizar y reducir a un diámetro muy pequeño el haz de electrones producido por el filamento.
- Un sistema de barrido que hace recorrer el haz de electrones ya focalizado por la superficie de la muestra.
- Uno o varios sistemas de detección que permiten captar el resultado de la interacción del haz de electrones con la muestra y transformarlo en una señal eléctrica.
- Una salida conectada a una o varias bombas que producen el vacío necesario para que el conjunto funcione adecuadamente.

Además, el microscopio posee diversos sistemas que permiten observar las señales eléctricas procedentes de los detectores, en forma de imágenes en un monitor de TV, fotografía, espectro de elementos, etc. En la siguiente imagen se han dibujado dos detectores, que son los que se utilizarán en esta investigación. Uno, el de electrones secundarios, que son los electrones arrancados a la propia muestra por la acción del haz incidente. Con esta señal obtenemos en un monitor una imagen de la muestra, muy parecida a la visión del ojo humano debido a la gran profundidad de foco de esta señal. El otro detector, de rayos X, captura este tipo de señal, con la que obtenemos un espectro de elementos, es decir un análisis químico elemental de la

muestra. La técnica esencialmente consiste en hacer incidir en la muestra un haz de electrones. Este bombardeo de electrones provoca la aparición de diferentes señales que, captadas con detectores adecuados, nos proporcionan información acerca de la naturaleza de la muestra



**Figura 3.17:** Microscopio electrónico de barrido, junto al detector de electrones secundarios y detector de rayos X. (Fuente: Tecnológico de monterrey, 2007)

La señal de electrones secundarios proporciona una imagen de la morfología superficial de la muestra. La señal de rayos X proporciona espectros e imágenes acerca de la composición de elementos químicos en la muestra.

### Electrones Secundarios

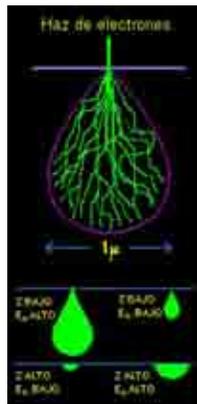
La señal de electrones secundarios es la que se emplea normalmente para obtener una imagen de la muestra. Es la señal que nos proporciona una imagen más real de la superficie que estamos estudiando, se considera un electrón secundario aquel que emerge de la superficie de la muestra con una energía inferior a 50 eV (electronvoltios).

### Microanálisis de Rayos X por Dispersión de Energías

La resolución espacial de los electrones secundarios es mucho mejor que la de los RX. Como resultado de esto, una característica de la muestra lo suficientemente grande para ser observada con la señal de secundarios puede no ser suficientemente grande como para contener todo el volumen de interacción del que emanan los RX. Con frecuencia, el haz de electrones al penetrar en la muestra causa la emisión de RX desde regiones de la superficie o de regiones cercanas, que tienen diferente composición que las del punto de incidencia del haz.

En la figura vemos las diferentes formas que puede tomar el volumen de interacción dependiendo de los valores del número atómico y de la energía del haz.

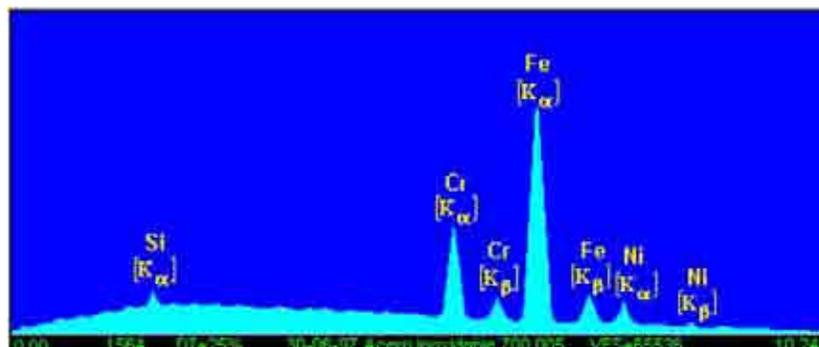
Existen métodos para calcular aproximadamente el diámetro de este volumen, pero se puede asegurar que en el mejor de los casos este diámetro no es menor de una micra.



**Figura 3.18:** Diferentes formas que puede tomar el volumen de interacción dependiendo de los valores del número atómico y de la energía del haz. (Fuente: Tecnológico de monterrey, 2007).

La adquisición de un espectro de RX consiste en recoger durante un determinado tiempo, normalmente del orden de minutos, los fotones de RX que proceden de la muestra, clasificándolos según su energía.

Como puede verse en la figura, un espectro de dispersión de energías se presenta usualmente como un histograma en donde el eje horizontal son unidades de energía, en Kiloelectronvoltios (KeV), en este caso de 0.00 a 10.240, y el eje vertical número de cuentas o intensidad, en este caso 65536 cuentas la altura total de la escala, que se va autoajustando a medida que crece el número de cuentas de la energía del pico más alto.



**Figura 3.19:** Ejemplo de microanálisis por dispersión de rayos X representado por medio de un espectro que detecta elementos metálicos en diferentes niveles de energía. (Fuente: Tecnológico de monterrey, 2007).

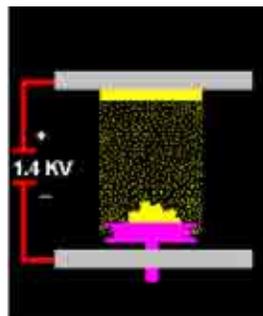
Por último, una vez adquirido este espectro, con la ayuda de patrones o sin ellos y mediante el software adecuado (en este caso INCA analyzer) se puede realizar de forma automática el análisis cualitativo, es decir, la identificación de picos y el análisis cuantitativo o calculo de la concentración de los diferentes elementos.

### Preparación de las muestras

La preparación de muestras es, en general, sencilla. Los requisitos indispensables que deben cumplir son ausencia de líquidos, es decir, la muestra tiene que estar seca y además debe ser conductora de la corriente eléctrica. Este último requisito se cumple en los metales pero no así en otro tipo de materiales, como es el caso del concreto, que es un material cerámico, por lo que para hacer a la muestra conductora se la recubre de una capa de algún material conductor tal como el carbón o el oro. Este recubrimiento ha de ser suficientemente grueso como para que circule la corriente eléctrica que se deposita en la muestra y suficientemente delgado para que no enmascare o tape las características superficiales de interés (en el caso del oro se utiliza un espesor de 50 Å)

### Técnica de recubrimiento con oro

Cuando el propósito del análisis de una muestra no incluye la obtención de un espectro de RX, un elemento que se utiliza frecuentemente para recubrir la superficie es el oro. El gráfico muestra esquemáticamente lo que se conoce como "sputtering". Consiste en una fuente de alimentación en corriente continua regulable de 1 a 3 KV conectada por una parte a una tarjeta de oro u oro-paladio y por otra parte al porta muestras. El conjunto va acoplado a una bomba de vacío. La introducción de aire del ambiente externo o argón (en caso de existir mayor recursos) en la campana de vacío provoca que estos átomos introducidos impacten en la tarjeta de oro y se desprendan átomos de dicha tarjeta que son atraídos hacia la muestra en la cual quedan depositados proporcionando un espesor de recubrimiento que depende del tiempo de exposición.



**Figura 3.20:** Técnica de recubrimiento con oro, sputtering, representada esquemáticamente. (Fuente: Tecnológico de monterrey, 2007).

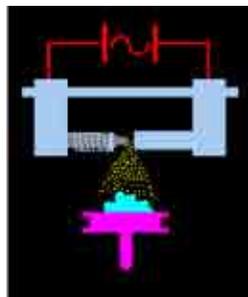


**Figura 3.21 y 3.22:** Máquina utilizada para el recubrimiento de las muestras con oro, llamada máquina sombreadora de oro. (Fuente: Elaboración propia).

### Técnica de recubrimiento con carbono

En el caso de precisarse un análisis elemental en una muestra no conductora es necesario recubrir la superficie de un elemento lo más transparente posible a los RX. Este elemento es el carbono.

Uno de los tipos de metalizadores de carbono se muestra esquemáticamente en el gráfico. Consiste en dos electrodos conectados a una fuente de corriente alterna de bajo voltaje y alta intensidad entre los que se intercala una barra de carbono terminada en una punta afilada. Al pasar la corriente, la punta de la barra se va evaporando, de forma que rocía la muestra con una fina capa de carbono. La punta va acoplada a un muelle que la mantiene en todo momento en contacto con el otro electrodo. Todo el conjunto está encerrado en vacío con el fin de facilitar la deposición de la película de carbono sobre la muestra.



**Figura3.23:** Técnica de recubrimiento con carbono representada esquemáticamente. (Fuente: Tecnológico de monterrey, 2007).



**Figura 3.24 y 3.25:** A la izquierda resultado preparación muestra con oro. A la derecha resultado preparación muestra con carbón. (Fuente: Elaboración propia).

### 3.3.2.1 Análisis y caracterización de muestras a través de microscopía electrónica

Para el desarrollo de esta experiencia tomaron pequeñas muestras de concreto; dos de los discos que fueron utilizados en el ensayo de inmersión en solución de sulfato de sodio, considerando el que sufrió un menor ataque (muestra “buena”) y aquel que sufrió un mayor ataque (muestra “mala”) respecto del análisis de pérdida de peso y además dos muestras control, de las mismas características que las anteriores, pero que no han sido sometidas a ningún tipo de ensayo (muestra “control buena” y muestra “control mala”). La descripción de ellos se aprecia en la siguiente tabla.

**Tabla 3.4:** Características muestras analizadas a través del microscopio electrónico.

| Muestra              | A/C  | G: Nanosílice % | Tiempo inmersión solución Na SO <sub>4</sub> (días) | Disminución Peso Seco % |
|----------------------|------|-----------------|---|-------------------------|
| <b>Buena</b>         | 0.55 | 1.5             | 26  | 0,036                   |
| <b>Mala</b>          | 0.65 | 0.5             | 26  | 0,931                   |
| <b>Control buena</b> | 0.55 | 1.5             | 0   | -                       |
| <b>Control mala</b>  | 0.65 | 0.5             | 0   | -                       |

Fuente: elaboración propia

Se realizaron los siguientes procedimientos:

- ❖ Toma de imágenes de la superficie de las muestras, determinado la morfología de ellas.
- ❖ Microanálisis químico por energía dispersiva de rayos X.

En este análisis es de esperar que se perciba la acción de los sulfatos entre las muestras ensayadas y las control, es decir, que las primeras muestren alguna diferencia en cuanto a su microestructura y compuestos, en relación a la acción agresiva que generaría la solución de sulfatos (medio) en las muestras ensayadas. Además, la muestra “mala” debería tener un deterioro mayor que la “buena”, ya que la nanosílice debería actuar como un elemento que contribuye o protege al concreto de la acción del medio.

**Parte I:** Imágenes por microscopio electrónico de barrido, determinando la morfología o forma superficial de las muestras.

**Muestra “control buena”**

**Figura 3.26:** Imagen muestra “control buena” con un aumento de 1000X

**Figura 3.27:** Imagen muestra “control buena” con un aumento de 5000X

**Figura 3.28:** Imagen muestra “control buena” con un aumento de 12000X

**Muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena”**

**Figura 3.29:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena” con un aumento de 1000X

**Figura 3.30:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena” con un aumento de 5000X

**Figura 3.31:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena” con un aumento de 12000X

**Muestra “control mala”**

**Figura 3.32:** Imagen muestra “control mala” con un aumento de 1000X

**Figura 3.33:** Imagen muestra “control mala” con un aumento de 5000X

**Figura 3.34:** Imagen muestra “control mala” con un aumento de 12000X

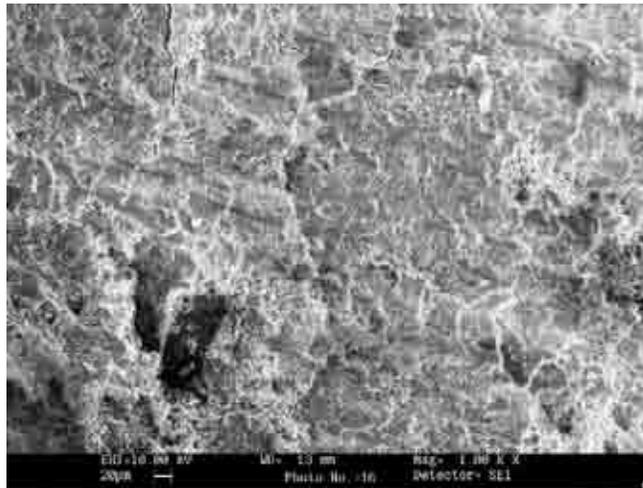
**Muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala”**

**Figura 3.35:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 1000X

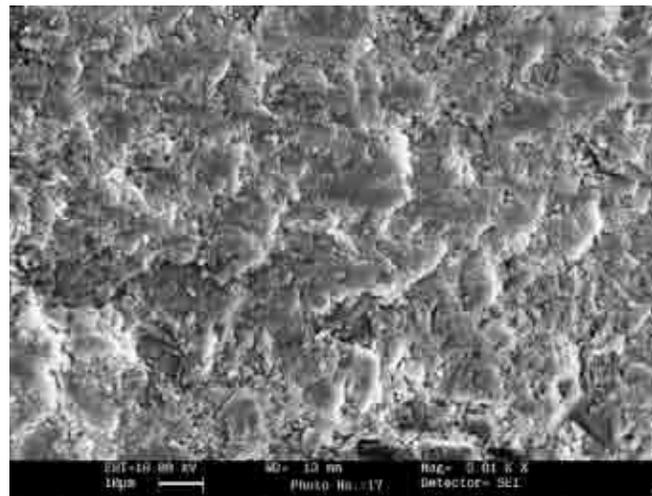
**Figura 3.36:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 5000X

**Figura 3.37:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 12000X

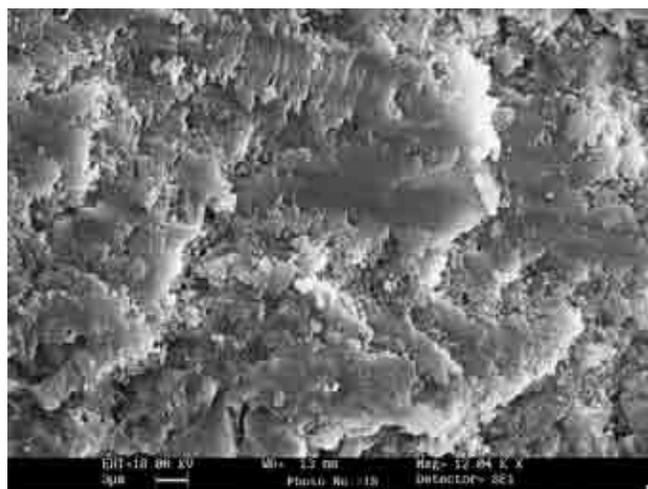
### Muestra “control buena”



**Figura 3.26:** Imagen muestra “control buena” con un aumento de 1000X. Se aprecia morfología de superficie con microconstituyentes del concreto, principalmente aluminato tricálcico, silicatos bicálcico y tricálcico, carbonatos. (Fuente: elaboración propia)

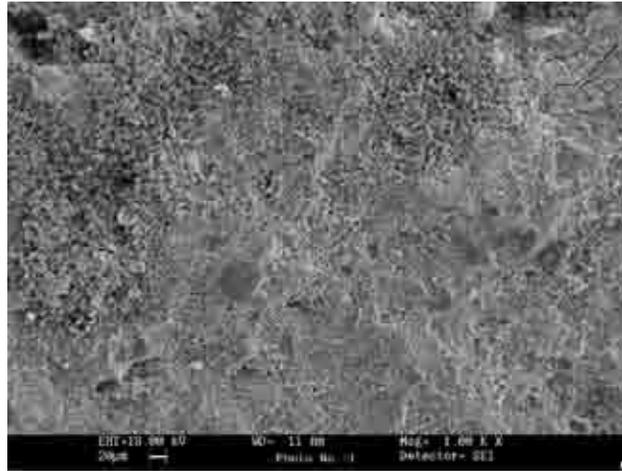


**Figura 3.27:** Imagen muestra “control buena” con un aumento de 5000X Detalle morfología imagen anterior. (Fuente: elaboración propia)

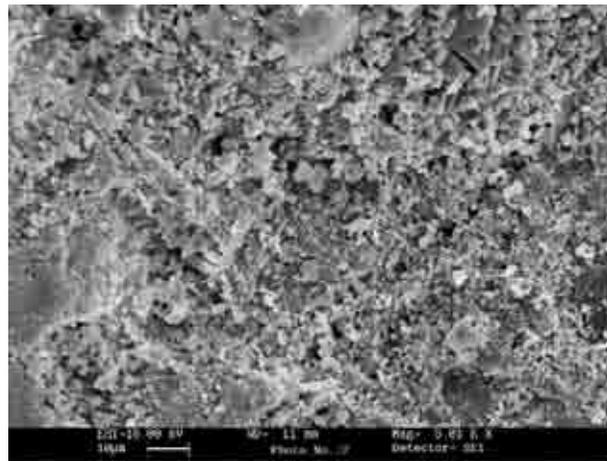


**Figura 3.28:** Imagen muestra “control buena” con un aumento de 12000X. Se aprecian los cristales constituyentes del concreto, zonas con aglomeración de partículas (gránulos) sobre cristales. (Fuente: elaboración propia)

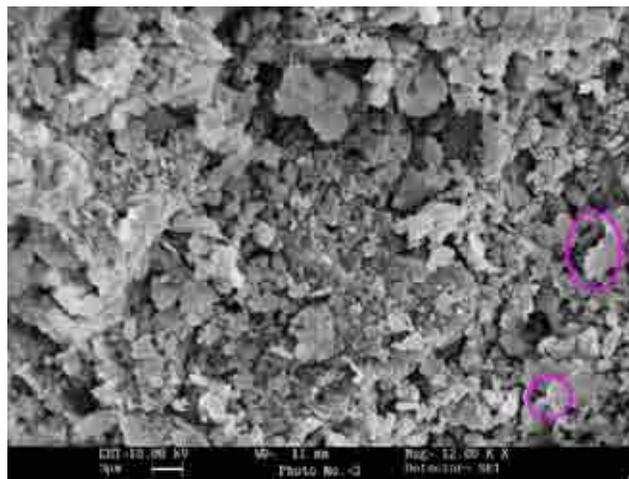
### Muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena”



**Figura 3.29:** 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 (derecha arriba). (Fuente: elaboración propia)

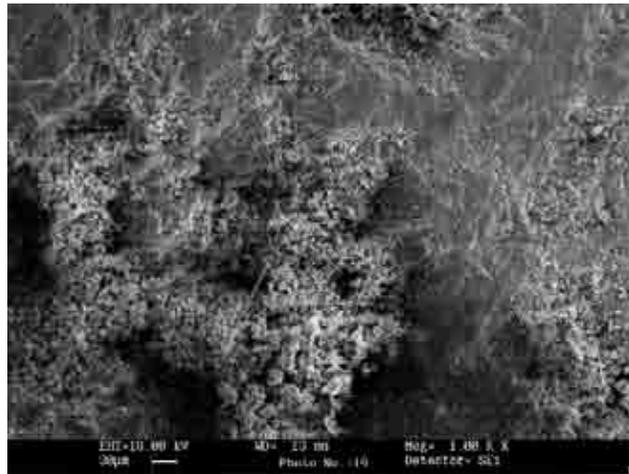


**Figura 3.30:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena” con un aumento de 5000X. Muestra poco atacada superficialmente, cristales pierden forma en bordes. Gránulos dispersos. (Fuente: elaboración propia)

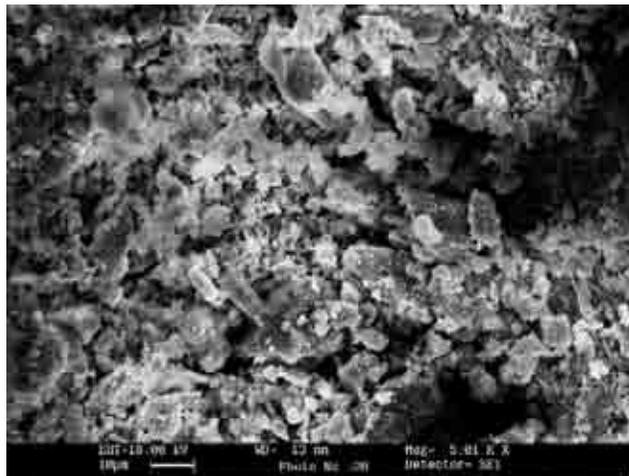


**Figura 3.31:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena” con un aumento de 12000X. Detalle de superficie, se ven desadherencias entre granos, deterioro puntual zonas oscuras (parte superior) con cambio de coloración gris por efecto de solución y aparición insipiente de etringita en bordes de granos (marcada por círculos). (Fuente: elaboración propia)

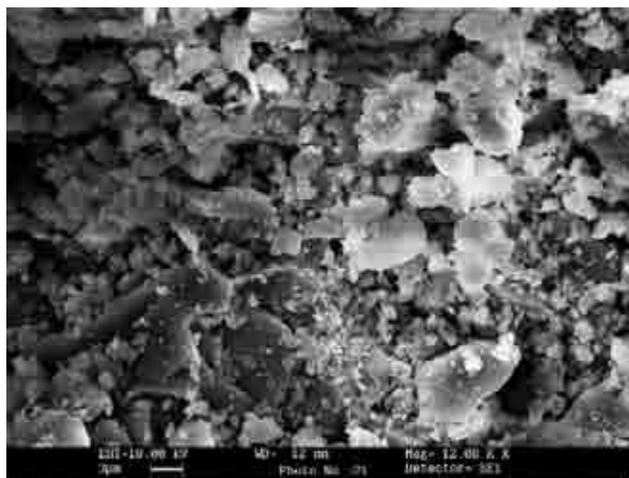
## Muestra Control mala



**Figura 3.32:** Imagen muestra “control mala” con un aumento de 1000X. Superficie con morfología heterogénea e irregular. (Fuente: elaboración propia)

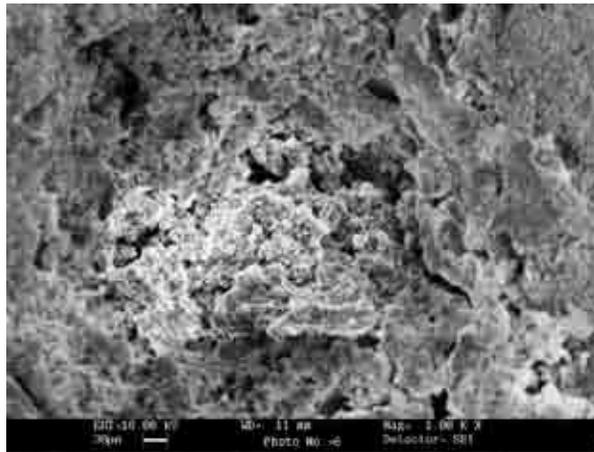


**Figura 3.33:** Imagen muestra “control mala” con un aumento de 5000X. Detalles microconstituyentes muestra de concreto, principalmente aluminato tricálcico, silicatos bicálcico y tricálcico, carbonatos. (Fuente: elaboración propia)

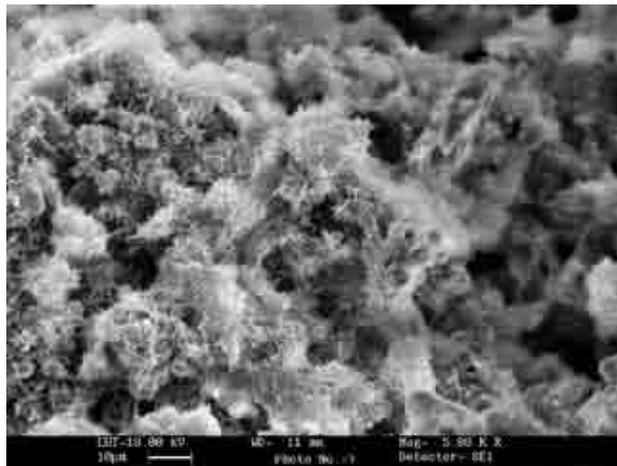


**Figura 3.34:** Imagen muestra “control mala” con un aumento de 12000X. Se observan cristales del concreto y pequeños gránulos dispersos sobre la superficie. (Fuente: elaboración propia)

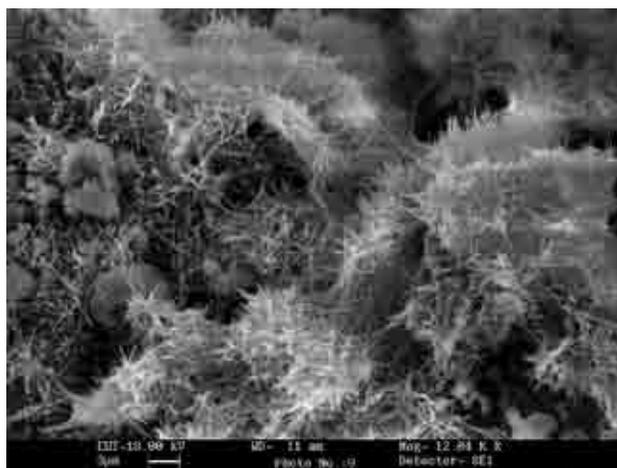
### Muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala”



**Figura 3.35:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 1000X. Detalle ataque por sulfatos (ver figura D.1 y D.2 en anexo D), con acción en profundidad, remoción de microconstituyentes, cristales sin forma y cubiertos por partículas. (Fuente: elaboración propia)



**Figura 3.36:** 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: elaboración propia)

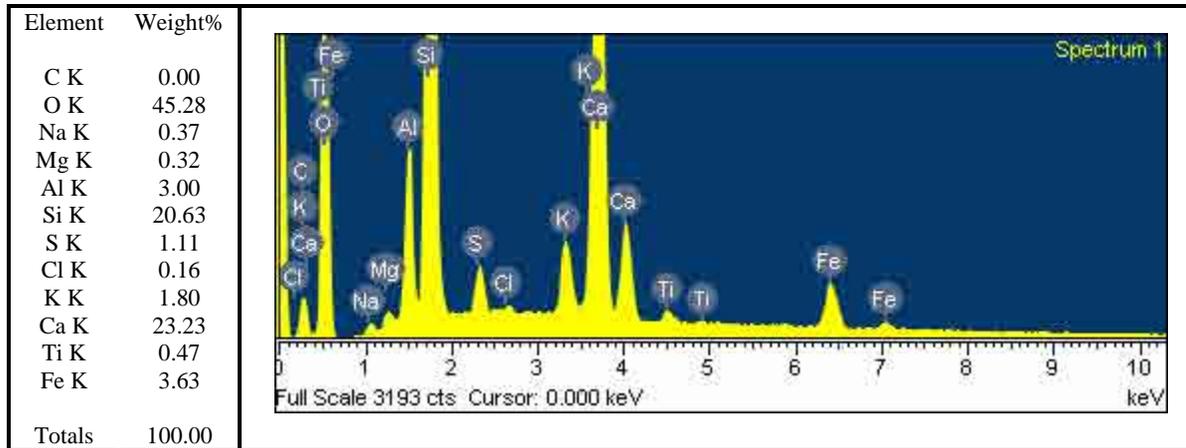


**Figura 3.37:** Imagen de muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 12000X. Detalle imagen anterior con etringita que cubre la mayor parte de la superficie en distintos sustratos. (Fuente: elaboración propia)

## Parte II: Microanálisis químico por energía dispersiva de rayos X.

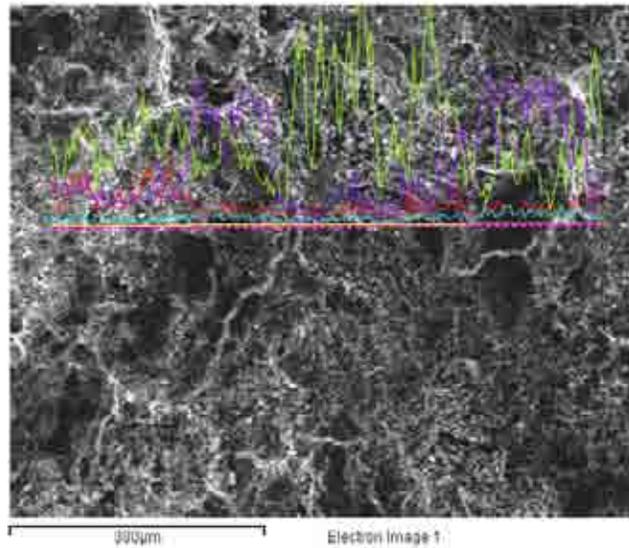
### Muestra “control buena”

#### Microanálisis

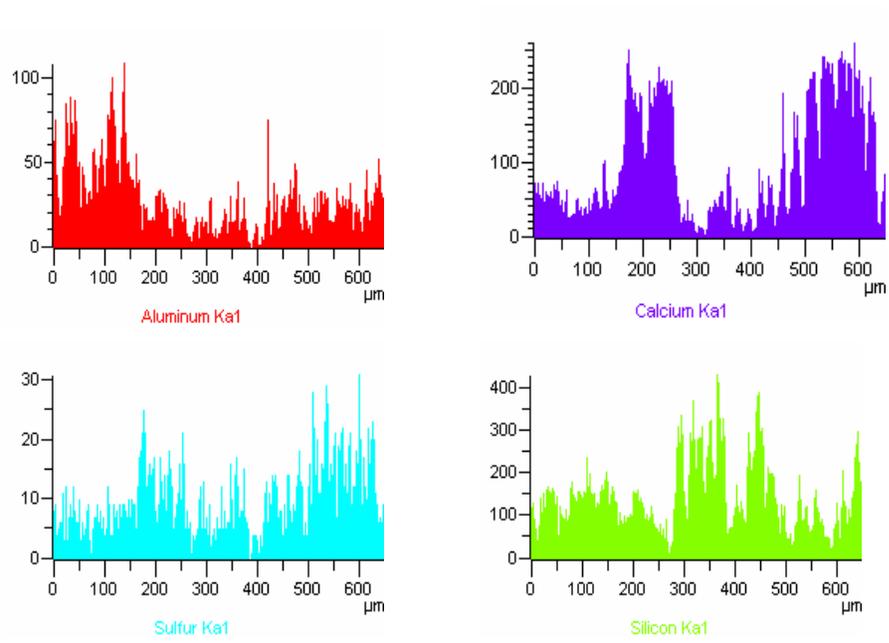


**Figura 3.38:** Microanálisis muestra “control buena” EDAX 1. Concreto caracterizado por cristales constituidos químicamente por Mg, Al, Si, K, Ca, Ti y Fe.

#### Linescan

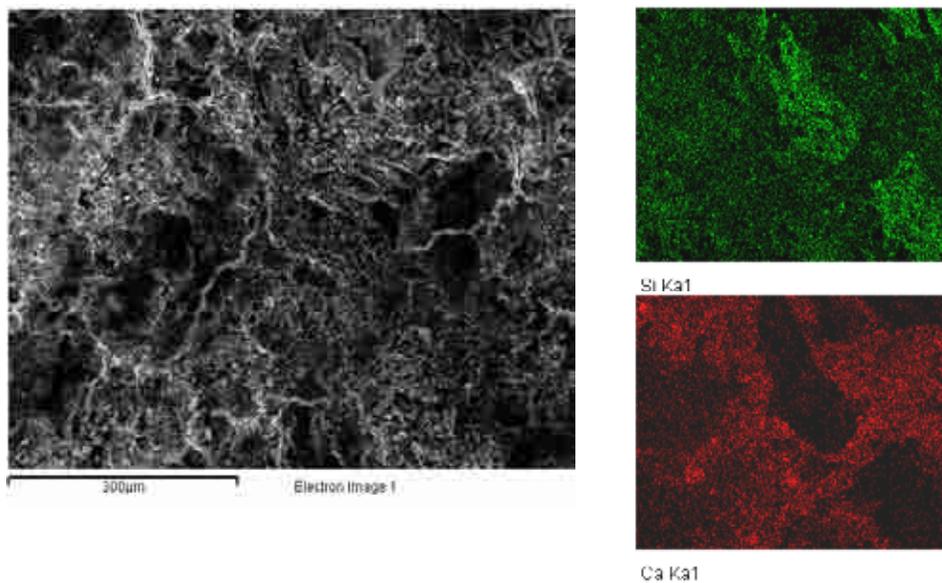


**Figura 3.39:** Linescan realizado a muestra “control buena” EDAX 2. Análisis químico en una línea por energía dispersiva, colores indican distribución de fases y constituyentes encontrados en línea trazada sobre la muestra (600 μm).



**Figura 3.40:** Gráficos correspondientes a cada elemento químico encontrado en la imagen anterior (EDAX 2). Cristales de aluminio, calcio, azufre, y silicatos.

## Mapping



**Figura 3.41:** Distribución mapping elementos químicos en la superficie de la muestra "control buena". Cristales oscuros ricos en silicio (óxidos). El calcio en forma de carbonatos y distribución de cristales en casi toda la superficie

## Muestra “control mala”

### Microanálisis

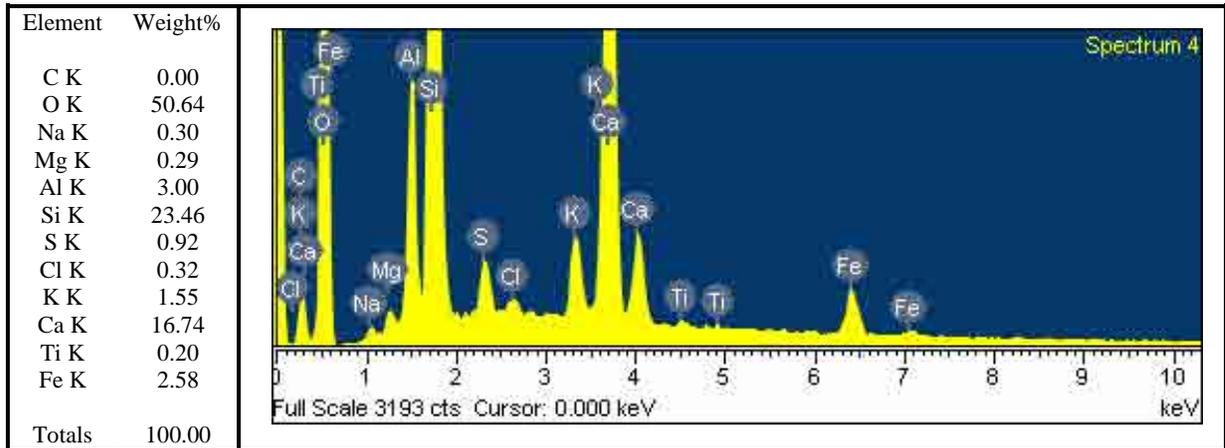


Figura 3.42: Microanálisis muestra “control mala” EDAX 3.

### Linescan

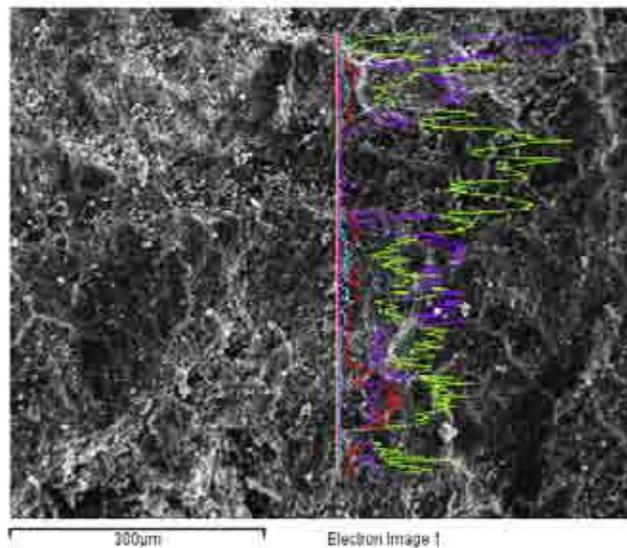
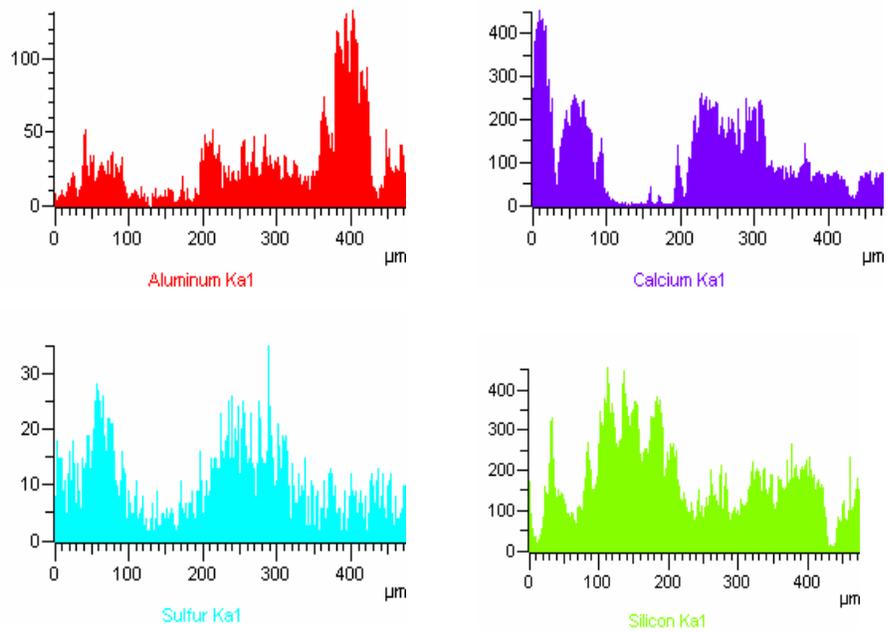
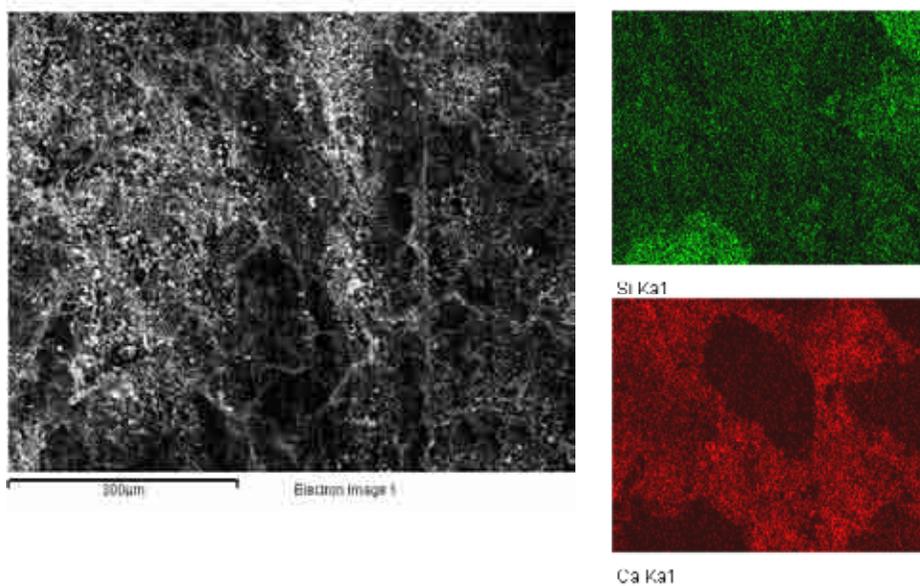


Figura 3.43: Linescan realizado a muestra “control mala” EDAX 4, análisis químico en una línea por energía dispersiva, colores indican distribución de fases y constituyentes encontrados en una línea vertical (400 µm) trazada sobre la muestra.



**Figura 3.44:** Gráficos correspondientes a cada elemento químico encontrado en la imagen anterior (EDAX 4). Zona central rica en sílice y azufre. La sílice esta en toda la superficie

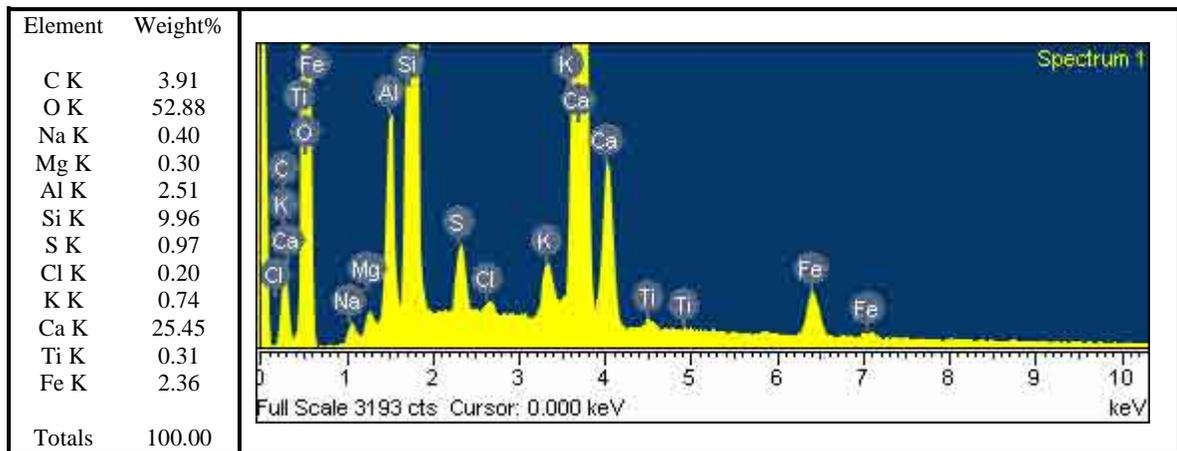
### Mapping



**Figura 3.45:** Distribución mapping elementos químicos en la superficie muestra “control mala”. La zona blanca o clara de la muestra corresponde a hidróxido de calcio. La zona más oscura corresponde a la presencia de microestructura de sílice.

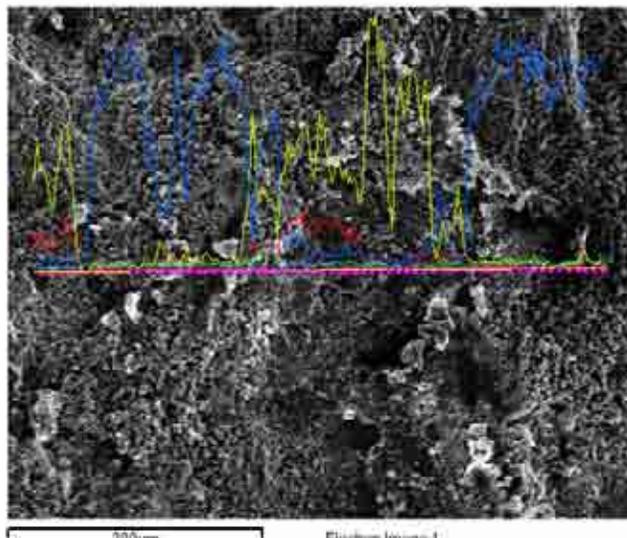
## Muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “buena”

### Microanálisis

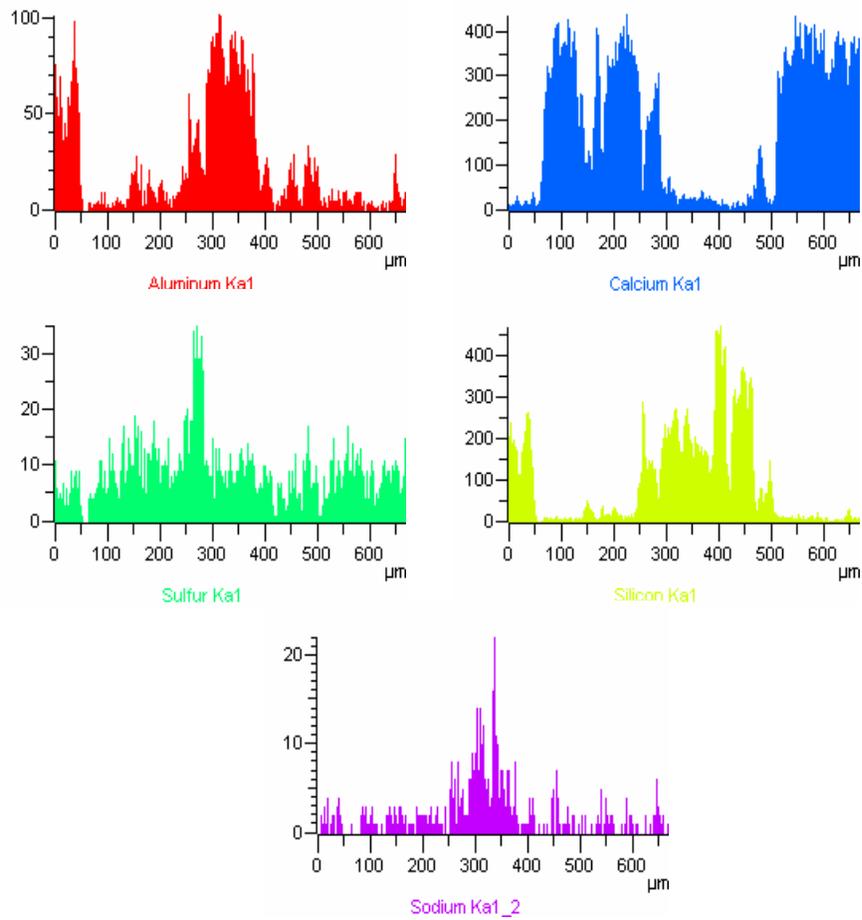


**Figura 3.46:** Microanálisis muestra “buena” EDAX 5. concreto caracterizado por cristales constituidos químicamente por Mg, Al, Si, K, Ca, Ti y Fe. Por acción del medio se tiene Na, S y Cl.

### Linescan

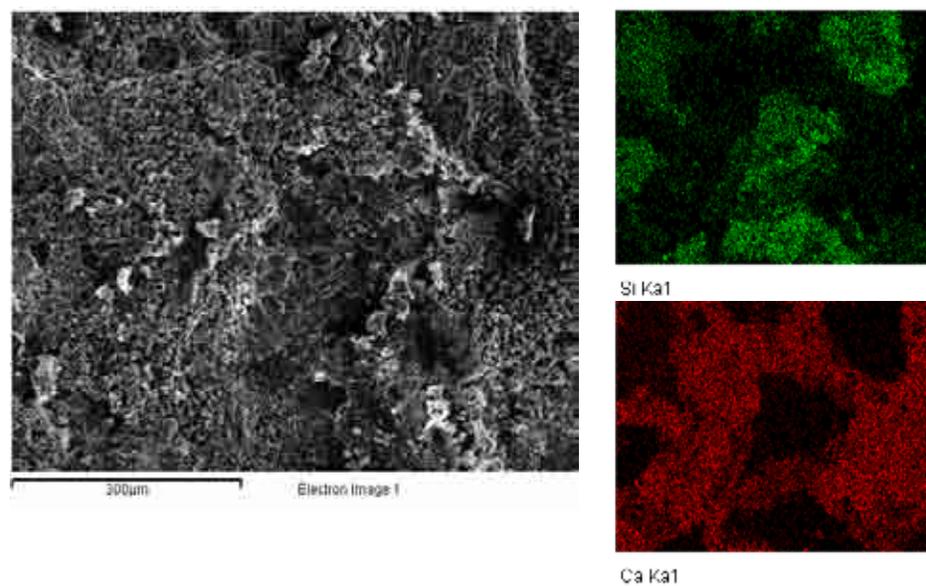


**Figura 3.47:** Linescan realizado a muestra “buena” EDAX 6, análisis químico en una línea por energía dispersiva, colores indican distribución de fases y constituyentes encontrados en una línea horizontal (600 µm) trazada sobre la muestra.



**Figura 3.48:** Gráficos correspondientes a elementos químicos encontrados en la imagen anterior (EDAX 6). Se tienen microconstituyentes complejos de Al, Si y S en superficie de concreto atacado. Los carbonatos (extremo) están mas libres. Además la macrofotografía muestra disolución o disminución de hidróxido de calcio en el concreto.

## Mapping



**Figura 3.49:** Distribución mapping elementos químicos en la superficie muestra “buena”. Productos claros son hidróxido de calcio. Zonas oscuras fase silicio.

## Muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala”

### Microanálisis

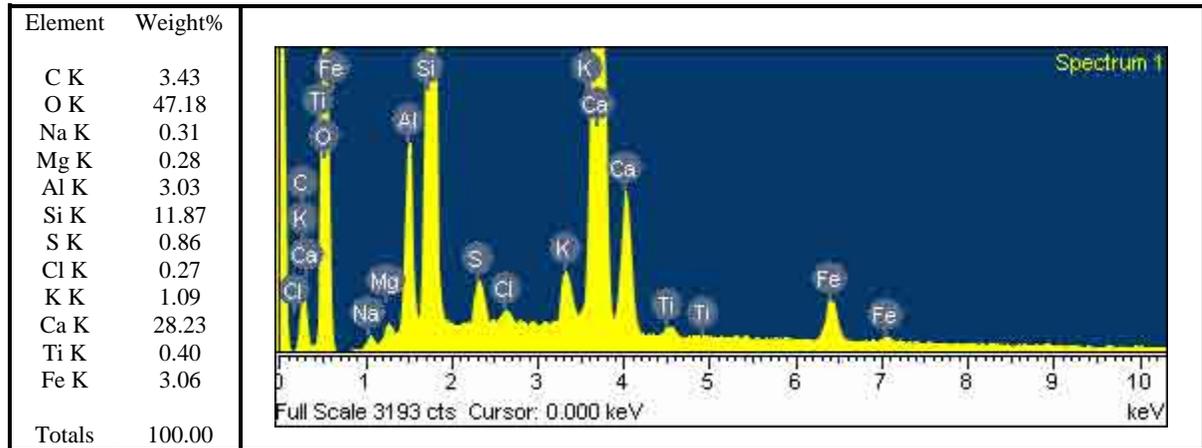


Figura 3.50: Microanálisis muestra “mala” EDAX 7.

### Linescan

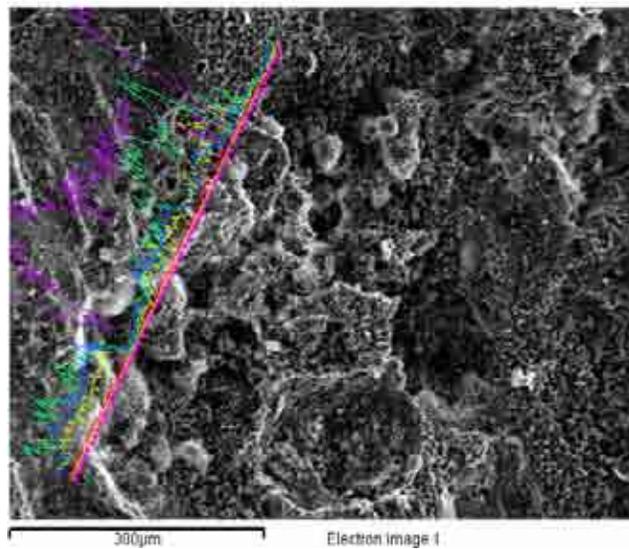
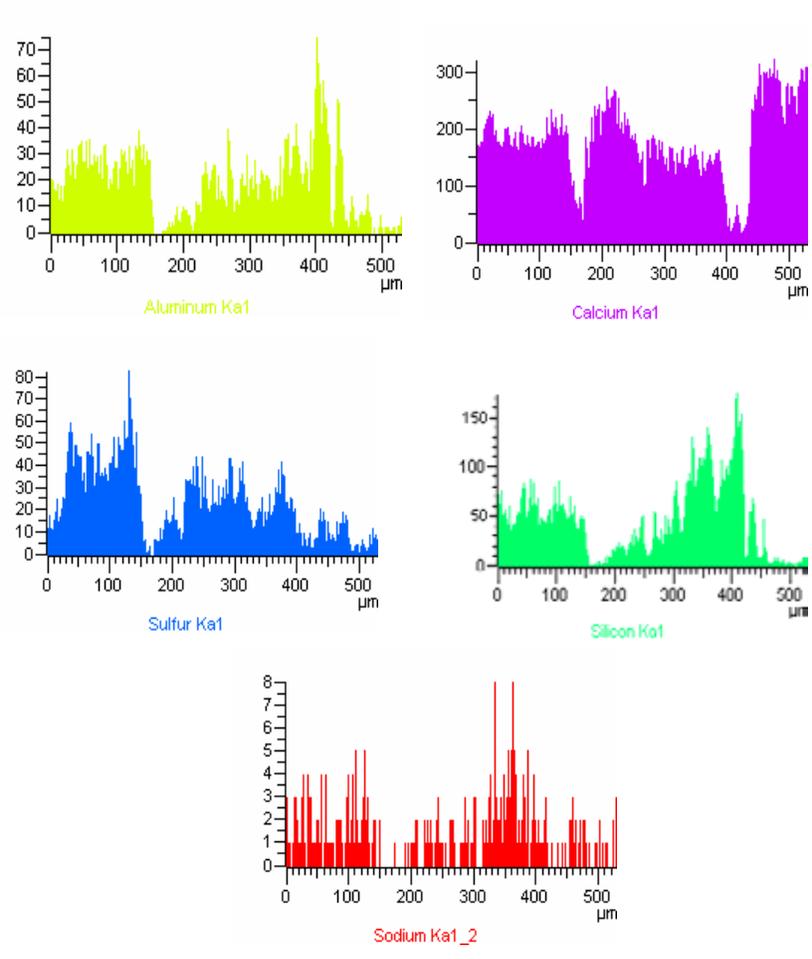
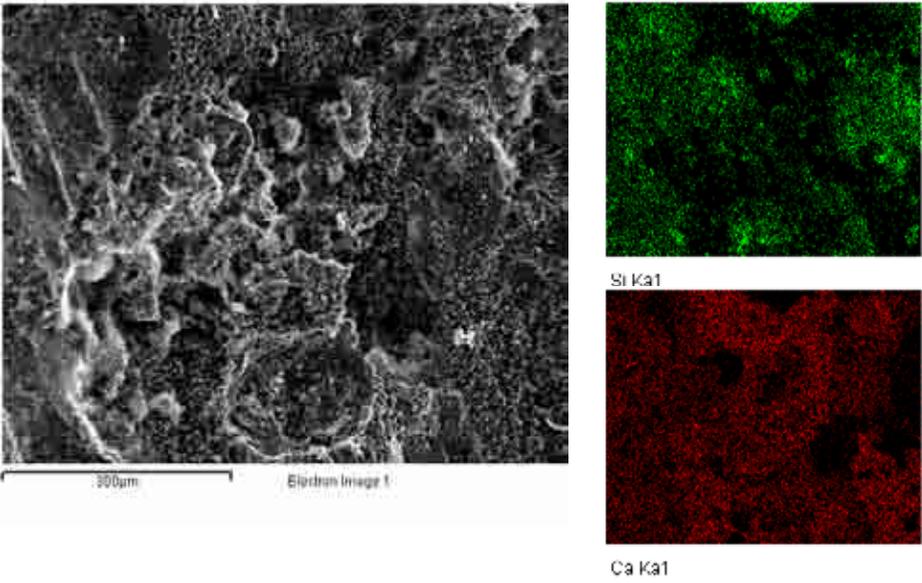


Figura 3.51: Linescan realizado a muestra “mala” EDAX 8. Análisis químico en una línea por energía dispersiva, colores indican distribución de fases y constituyentes encontrados en una línea diagonal (600 µm) trazada sobre la muestra.



**Figura 3.52:** Gráficos correspondientes a elementos químicos encontrados en la imagen anterior (EDAX 8). Na y S están distribuidos en toda la superficie. Se observa hidróxido de calcio en partes blancas de la línea trazada.

**Mapping**



**Figura 3.53:** Distribución mapping elementos químicos en la superficie muestra “mala”. El calcio esta en toda la microestructura de la muestra (color claro), las zonas oscuras corresponden a sílice.

### **Análisis descriptivo de imágenes por microscopio electrónico de barrido**

Si se compara las muestras ensayadas con las controles, se aprecia que:

- a) La muestra “buena” evidencia espacios vacíos entre sus granos, quedando con desadherencia en los estratos superficiales y un deterioro puntual en algunas zonas, con una incipiente aparición de etringita, en comparación con su muestra control.
- b) La muestra “mala” sufrió transformaciones más importantes y profundas, se aprecia la remoción de microconstituyentes del concreto (1000X y 5000X); al ampliar la imagen se ve la aparición no uniforme en gran parte de la superficie de etringita (ver detalle de ésta en anexo D), con variados grados de crecimiento, transformando los distintos sustratos y dejando cristales amorfos, en relación a su respectiva muestra control.

Al evaluar las imágenes de las muestras control, es posible observar que:

- a) En la muestra “control buena” existen menores espacios libres entre los cristales constituyentes del concreto y es posible observarlos con una ampliación mayor de la imagen (12000X) es posible observarlos.
- b) En cambio en la muestra “control mala” se aprecia que los microconstituyentes se encuentran de forma irregular y heterogénea, con espacios mayores entre ellos.

En relación a las muestras ensayadas:

- a) La muestra “buena” aún mantiene zonas densas en gránulos con algunas depresiones y desadherencias en sustratos superficiales y algunos deterioros puntuales, con aparición insipiente de etringita.
- b) Lo anterior no sucede en la “muestra mala”, ya que se aprecia una acción profunda de la solución de sulfato en el concreto, con deterioro mas profundo, con remoción de microconstituyentes. Al ampliar la imagen (5000X y 12000X) se aprecia la presencia masiva de etringita en distintos sustratos con variados grados de crecimiento y una notable deformación de los cristales.

La caracterización efectuada de la morfología de los cuatro tipos de muestras, permite caracterizar la fijación de las nanopartículas en la mezcla de concreto y la acción sobre ellas del electrolito utilizado en la degradación.

### **Discusión de resultados**

Al revisar la descripción de las imágenes de las muestras ensayadas versus las control, se evidencia un cambio morfológico entre ellas, lo que indica que existió una acción o ataque del medio químico en las muestras de concreto. Entonces se reafirma

la hipótesis que la solución de sulfato de sodio, genera un efecto perjudicial para el concreto, puesto que en la muestra “buena” se aprecia que las partículas se encuentran mas distantes unas de otras, con mayor discontinuidad, mas cantidad de poros y de mayor tamaño y etringita incipiente; y en el caso de la muestra “mala” el daño es mas profundo, se caracteriza por formación masiva etringita (ver reacciones en la discusión siguiente), con cristales de mayor tamaño que la muestra control, generando por lo tanto pérdida de masa, corroborándose que el mecanismo de acción y reacción química del sulfato de sodio, expuesto en la literatura, se desarrollo en forma completa.

Por otra parte, que la muestra “control buena” (1.5% adición de nanosílice, A/C 0.55) tenga menores espacios entre granos, más regulares y homogéneos que la muestra “control mala” (0.5% de adición de nanosílice, A/C 0.65), es esperable principalmente por dos motivos:

- Tiene menor razón A/C
- Mayor cantidad de nanosílice

Ambos factores inciden en la morfología superficial del concreto, ya que al tener mayor cantidad de cemento se reducen los espacios de vacíos entre los microconstituyentes, existe por tanto menor porosidad y tamaños de poros, lo que implica una mayor cohesión.

Tener mas adición de nanosílice se traduce en un aumento del nano-C-S-H generado en la hidratación del cemento, por lo que existe un mayor efecto de relleno entre las partículas o espacios vacíos, teniendo como optimo 1.5% de adición para A/C 0.55 según investigación desarrollada en forma previa a esta (ver anexo B e imagen 4.26 Cárcamo, 2006), que se traduce en una morfología de mayor aglomeración y cohesión de estas.

En cuanto a la comparación de las muestras ensayadas, la muestra “buena”, si bien es afectada por la solución agresiva, lo está en menor grado que la muestra “mala”. Ello se evidencia en la presencia de la formación general de etringita con varios grados de desarrollo, lo que indicaría que la reacción química del ataque por sulfatos se ha completado en varias zonas y en distintos niveles. Esto era de esperar, ya que esta muestra “mala” se encontraría menos protegida ante la acción de sulfatos (menos nanosílice y mayor A/C), que concuerda con lo extraído del el análisis de pérdida de masa.

Ahora bien, el gran beneficio que aportaría la mayor adición de nanosílice, es que obstaculiza el ingreso de la solución de sulfato de sodio, relleno físicamente los espacios vacíos (menor superficie expuesta) independientemente del tamaño de estos, reduciendo la cantidad y tamaño de poros y su tamaño. Por ende la posibilidad que la

solución de sulfato ataque químicamente al concreto, modificando algunos de sus microconstituyentes por cristales amorfos alterando las propiedades físico-químicas del concreto.

### **Estudio del microanálisis químico de las muestras experimentales por energía dispersiva de rayos X**

En el microanálisis se hace una comparación de las muestras control y las ensayadas (ver tabla 3.6), donde se analizan los elementos más importantes de acuerdo a las reacciones químicas que se desarrollan.

Se observa la aparición de carbono (C), variaciones leves de sodio (Na), disminución de aluminio (Al) en la muestra buena y aumento sutil en la mala, en el elemento silicio (Si) se aprecia una baja de alrededor de un 50%, lo que ocurre también con el azufre (S) pero en menor porcentaje, luego se aprecia crecimiento en las cantidades de calcio (Ca), siendo más importante en el caso de la muestra mala.

Es importante mencionar que éste análisis no es un patrón para determinar las cantidades presentes en la muestra, sino que solo es capaz de detectar la presencia de elementos, con posibilidad de seleccionarlos, entregando porcentajes en peso de estos elementos seleccionados, solo en el punto de la muestra en que el haz de electrones incidió, pero que es representativo de lo ocurrido en la microestructura del material.

**Tabla 3.5:** Resumen elementos químicos constituyentes de los cristales presentes en las muestras de concreto, en relación al porcentaje en peso que estos tienen en cada zona analizada.

| Elemento | Peso (%)      |        |              |        |
|----------|---------------|--------|--------------|--------|
|          | Control buena | Buena  | Control mala | Mala   |
| C K      | 0.00          | 3.91   | 0.00         | 3.43   |
| O K      | 45.28         | 52.88  | 50.64        | 47.18  |
| Na K     | 0.37          | 0.40   | 0.30         | 0.31   |
| Mg K     | 0.32          | 0.30   | 0.29         | 0.28   |
| Al K     | 3.00          | 2.51   | 3.00         | 3.03   |
| Si K     | 20.63         | 9.96   | 23.46        | 11.87  |
| S K      | 1.11          | 0.97   | 0.92         | 0.86   |
| Cl K     | 0.16          | 0.20   | 0.32         | 0.27   |
| K K      | 1.80          | 0.74   | 1.55         | 1.09   |
| Ca K     | 23.23         | 25.45  | 16.74        | 28.23  |
| Ti K     | 0.47          | 0.31   | 0.20         | 0.40   |
| Fe K     | 3.63          | 2.36   | 2.58         | 3.06   |
| Totales  | 100.00        | 100.00 | 100.00       | 100.00 |

Fuente: elaboración propia

Los linescan (análisis químico a lo largo de una línea) realizados, revelan en las muestras ensayadas la presencia de sodio y azufre en toda la línea de análisis, disminuciones en sílice que llega a niveles casi nulos en ciertos tramos, y aumentos en calcio, sobretodo en la muestra ensayada “mala” (donde éste se mantiene constante en casi toda la extensión de la línea). En todas las muestras hay presencia de aluminio.

En los mapping (distribución química de elementos en una superficie) se observan las respectivas imágenes a color la presencia de elementos calcio y silicio, determinando que las zonas oscuras corresponden a silicio y las zonas claras a calcio en zonas bien determinadas de las muestras.

### **Discusión de resultados**

La aparición de carbono podría deberse a la presencia de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), disuelto en la solución de sulfato que ha adquirido iones de calcio en el tiempo. El  $\text{CO}_2$  proveniente del ambiente ingresa a la solución formando ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), el cual al tomar contacto con el calcio forma carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) que queda atrapado en los poros de la superficie de la muestra al evaporarse el solvente.

Las diferencias apreciables de elementos químicos, se explican de acuerdo a las reacciones químicas generadas, producto de la acción de la solución de sulfato sodio en el concreto ya que: este reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento (hidratación del silicato bicálcico específicamente), formando sulfato de calcio (yeso) e hidróxido de sodio, a su vez el sulfato de calcio (yeso) ataca al aluminato tricálcico formando etringita e hidróxido de calcio. La formación de estos compuestos (yeso y etringita) que son compuestos con alto contenido de calcio, generan un deterioro del concreto, ya que al formarse cristales de mayor tamaño se provoca la expansión del concreto, su desintegración, la formación de microfisuras y por ende pérdida de material, como se determinó en el análisis de pérdida de masa.

Esto además, es sustentado por los mapping realizados que muestran que las zonas ricas en calcio se encuentran bien deterioradas, no así las que son ricas en sílice. Por la disminución de sílice se podría pensar entonces, que estas reacciones han generado una disolución o desprendimiento de los microconstituyentes del concreto ocasionando su disminución, que contrasta con el aumento de los elementos ricos en calcio, ya que aparentemente la etringita bien desarrollada queda en el concreto, sin separarse de él, lo cual puede ser atribuible a su morfología que se presenta como cristales llenos de aristas.

En cuanto a las variaciones de sodio se deben a que este elemento entra como sulfato y sale como hidróxido de sodio de acuerdo a lo que indican las reacciones.

Por su parte, la baja de aluminio en la muestra buena podría ocurrir por los cristales de etringita que se han formado (son muy pequeños e incipientes), teniendo la posibilidad de desprenderse fácilmente del concreto. En la muestra mala, el aluminio prácticamente se mantiene, por la forma de los cristales de etringita que están más desarrollados, por lo que estos pueden quedar atrapados entre los poros.



## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES

Los discos de mortero ensayados han experimentado un deterioro producto de la acción de un medio químicamente agresivo de solución de sulfato de sodio que afecta su durabilidad, ya que en todos ellos existen cambios físico-químicos, lo que indica que los mecanismos de acción y reacciones químicas generadas por ésta acción que se exponen en la literatura se han desarrollado en forma completa. Esto se sustenta también en el análisis de pH donde se aprecia que en soluciones resultantes del ensayo de inmersión existe un aumento de este indicador (soluciones más básicas) debido al ingreso de iones hidroxilo o bases solubles en la solución, obtenidos del concreto.

En general existe un menor deterioro en los discos con A/C 0.55 que en los que tienen A/C 0.65, ya que los mecanismos de infiltración, dependen del tamaño e interconexión de los poros que tenga el concreto y al aumentar razón A/C del concreto éstos aumentan, por lo que crecen las posibilidades de que el agente químicamente agresivo ingrese al concreto y lo ataque.

❖ En relación al análisis de pérdida de masa:

- La nanosílice tiene un efecto que se desarrolla en dos etapas. En la primera de ellas este nanomaterial genera una mayor reactividad química ya que produce un aumento de la superficie potencialmente reactiva del concreto, que se manifiesta por una celeridad en el proceso deterioro, ya que éste se da en forma anticipada en probetas con mayores cantidades de nanosílice. A medida que transcurre el tiempo en una segunda etapa, este aditivo tiene un efecto que dificulta la acción del medio agresivo, obstaculizando los mecanismos de infiltración, reflejado en una menor pérdida de masa en discos con mayores adiciones.
- Al aumentar las adiciones el proceso de deterioro además de finalizar con menores pérdidas de material se produce antes, que en las muestras con menor adición y en las que no tienen nanosílice.
- Para los tipos de relaciones A/C evaluados existiría una mejora (menor deterioro) en adiciones de nanosílice por sobre 0.5% en relación al peso de cemento. Los valores óptimos para cada tipo de adición serían: para A/C 0.55 con un 1.0% de adición, pierde un 60% menos de masa en relación a una muestra sin adición y para A/C 0.65 con un 1.5% de adición esta mejora es de un 45%.

- ❖ En relación Comparación de resultados con propiedades mecánicas y propiedades de trabajabilidad:
  - Aunque las adiciones óptimas son distintas no son excluyentes unas de otras, ya que en ningún caso se aprecia una desmejora en el material por aumentos en la adición de nanosílice sobre el óptimo, sino que solo se consideran ineficientes.
  - En la mayoría de los casos existe una tendencia donde: la razón A/C 0.65 necesita una cantidad mayor o igual de nanosílice para alcanzar el óptimo, que A/C 0.55.
  
- ❖ En relación al análisis de microscopia electrónica
  - El daño o deterioro por la acción de solución de sulfato de sodio se caracteriza por cambios o alteraciones físico-químicas en el concreto: superficie irregulares y heterogéneas, modificación de los microconstituyentes del concreto por elementos ricos en calcio en zonas mas afectadas, formación de etringita en la superficie con cristales amorfos en diferentes grados de desarrollo, los de mayor tamaño provocan expansión en el concreto, su desintegración, la formación de microfisuras y por ende desprendimiento de sus cristales microconstituyentes.
  - La muestra que presentó un deterioro profundo e importante es la que tiene una cantidad menor de nanosílice: muestra “mala”, no así la que contiene cantidad de nanosílice mayor ya que los cambios físico-químicos son leves.

### **Conclusiones finales**

Las muestras con mayor contenido de nanosílice evidenciaron un comportamiento mejor en cuanto a que se vieron menos afectadas o alteradas física y químicamente por el agente agresivo solución de sulfato de sodio.

Es posible establecer que gran beneficio que aportaría la mayor adición de nanosílice en cuanto a la durabilidad del concreto frente a la acción de un agente químicamente agresivo, es que obstaculiza y restringe su ingreso, rellenando los espacios vacíos independientemente del tamaño de estos (de la razón A/C), mejorando la morfología superficial del concreto y por ende la posibilidad de que la solución de sulfato penetre a través de los mecanismos de infiltración y ataque al concreto.

Sería interesante continuar ésta línea de investigación y poder estudiar con mayor detalle, aumentando la cantidad de muestras, ambas etapas de acción de la nanosílice descritas anteriormente. Así como también establecer qué cantidad de nanosílice sería necesaria para que la muestra con A/C 0.65 iguale la resistencia al deterioro por ataque químico de una muestra con A/C 0.55 con adición cercana al óptimo. Otra investigación es ver la acción del sulfato de magnesio en el concreto, ya

que éste es un tipo de sulfato más agresivo que el utilizado en este trabajo y que además genera la formación de otro tipo de cristales. También es interesante ver que ocurre con la resistencia a flexo-tracción y flexo-compresión de probetas con distintas adiciones de nanosílice que han sido sometidas a la acción de sulfatos.

## BIBLIOGRAFIA

- ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 2001. Guía para la durabilidad del hormigón. Reporte ACI Comité 318S. Estados Unidos. 495p.
- ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 2005. Requisitos de reglamento para concreto estructural. Reporte ACI Comité 201.2R. Estados Unidos. 59p.
- ASOCEM: Asociación de Productores de Cemento. 1992. Desarreglos del concreto por la acción de ión sulfato. Lima, Perú. (Disponible en: [www.asocem.org.pe/.../concreto/desarreglos%20del%20concreto%20por%20la%20agresion%20de%20ion%20sulfato.pdf](http://www.asocem.org.pe/.../concreto/desarreglos%20del%20concreto%20por%20la%20agresion%20de%20ion%20sulfato.pdf). Consultado el: 8 de enero de 2007)
- CARCAMO, L. 2006. Revisión, análisis y aplicación de la nanotecnología en la generación y mejora de materiales constructivos. Estudios de morteros de cemento con adiciones de nanosílice. Tesis. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Ciencias de la Ingeniería. 216p.
- COGNOSCIBLE TECHNOLOGIES. 2006, Mayo. Nanotecnología aplicada al concreto. Santiago, Chile. (Disponible en: <http://www.cognoscibletechnologies.com/descubrimientosyaplicacionesencontradas.htm>. Consultado el: 27 de Agosto de 2006).
- CONCRETONLINE. 2006. Gaia Nanosílice. Madrid, España. (Disponible en: <http://www.concretonline.com/pdf/Gaia1.pdf>. Consultado el: 27 de Agosto de 2006).
- CONCRETONLINE. 2006. Por primera vez un nanoproducto reemplaza por completo a un material largamente usado en el hormigón. Madrid, España. (Disponible en: <http://www.concretonline.com/pdf/Gaia2.pdf>. Consultado el: 27 de Agosto de 2006).
- DUPOUY O., G. D. 1991. Hormigones y Morteros de Alta Resistencia en Base al Uso de Silicafume. Tesis. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Ciencias de la Ingeniería. 180 p.

EURORESIDENTES. 2006. Nanotecnología. España. (Disponible en: <http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/nanotecnologia.htm>. Consultado el: 27 de Agosto de 2006).

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA. 2006. Durabilidad del concreto. Perú. (Disponible en: [fic.uni.edu.pe/construccion/concreto/Concreto%202/DURABILIDAD%20DEL%20CONCRETO.doc](http://fic.uni.edu.pe/construccion/concreto/Concreto%202/DURABILIDAD%20DEL%20CONCRETO.doc). Consultado el: 25 de Octubre de 2006).

FERRADA, M.; M. ESCOBAR; W. DOMINGUEZ; P. AVALOS. 2003. U-Sílice... Sílice a Favor del Medio Ambiente... ISO 14001. Trabajo presentado a las XIV Jornadas Chilenas del Hormigón. Valdivia. 15 p.

GALVEZ, D.; V. ROCCO. 2007. Tecnología del hormigón. Chile. (Disponible en: [ico.ucentral.cl/educon/cursos/icos405/archivos/archivo1\\_16\\_03\\_07.ppt](http://ico.ucentral.cl/educon/cursos/icos405/archivos/archivo1_16_03_07.ppt). Consultado el 12 de Mayo de 2007).

GUTIERREZ, C. 2005. Las nanopartículas: pequeñas estructuras con gran potencial. Contacto Nuclear (México). (39): 24-29.

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO (IMCYC). 2006. El concreto en obra, problemas causas y soluciones. Cemento y concreto resistentes a sulfatos. México. (Disponible en: [www.imcyc.com/revistact06/oct06/PROBLEMAS.pdf](http://www.imcyc.com/revistact06/oct06/PROBLEMAS.pdf). Consultado el 7 de enero de 2007).

PERALES, E. 2003. Ataque al hormigón por sulfatos y agua de mar: precauciones y recomendaciones. Trabajo presentado en la IV Jornada Técnica Cementos Rezola. Italia. (Disponible en: [www.cementosrezola.com/Documentos/DocPublicaciones/Cementos%20sulforresistentes.pdf](http://www.cementosrezola.com/Documentos/DocPublicaciones/Cementos%20sulforresistentes.pdf). Consultado el 7 de enero de 2007).

SEGUEL C., H. 2006. Hormigones de alta resistencia H-70. Tesis. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Ciencias de la Ingeniería. 125 p.

TORRES A., M. MARTINEZ. 2001. Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. México. (Disponible en:

[www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt181.pdf](http://www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt181.pdf). Consultado el: 25 de octubre de 2006).

TECNOLOGICO DE MONTERREY. 2007. Microscopio electrónico de barrido (SEM). México. (Disponible en: [www.mty.itesm.mx/.../im/m00-862/Lecturas/SEM\\_ICP.pdf](http://www.mty.itesm.mx/.../im/m00-862/Lecturas/SEM_ICP.pdf). Consultado el 18 de Junio de 2007)

## ANEXOS

### **ANEXO A: Ensayos normalizados de caracterización de áridos para fabricación de morteros y dosificación de probetas**

Las probetas adicionales fueron confeccionadas con las siguientes especificaciones en cuanto a su extracción reducción de muestras y ensayos preliminares para su dosificación.

Se utilizó aproximadamente 60 Kgs. de arena, para la confección de probetas correspondientes al análisis desarrollado para evaluación de propiedades mecánicas, rugosidad superficial, análisis microscópico y para las probetas adicionales utilizadas en este estudio. La arena se llevó a laboratorio y se redujo mediante cuarteo manual hasta quedar la cantidad necesaria para los siguientes ensayos:

- Granulometría y calculo del modulo de finura (Nch 165)
- Contenido de materia orgánica (Nch 166)
- Porcentaje de finos bajo malla N°200 (Nch 1223)
- Determinación de densidades y absorción de agua (Nch 1239)
- Calculo del porcentaje de humedad.

#### a) Granulometría, según Nch 165

**Tabla A.1:** Granulometría de la Arena seleccionada para ensayos.

| Malla            | Pesos Retenidos | % Retenido | % Retenido Acumulado | % Que pasa |
|------------------|-----------------|------------|----------------------|------------|
| 10 mm.           | 0 grs.          | 0          | 0                    | 100        |
| N°4 (5 mm.)      | 8 grs.          | 1.19       | 1.19                 | 98.81      |
| N°8 (2.5 mm.)    | 4 grs.          | 0.59       | 1.78                 | 98.22      |
| N°16 (1.25 mm.)  | 6 grs.          | 0.89       | 2.67                 | 97.33      |
| N°30 (0.63 mm.)  | 82 grs.         | 12.17      | 14.84                | 85.16      |
| N°50 (0.315 mm.) | 484 grs.        | 71.81      | 86.65                | 13.35      |
| N°100 (0.160 mm) | 76 grs.         | 11.28      | 97.93                | 2.07       |
| N°200 (0.080 mm) | 8 grs.          | 1.19       | 99.12                | 0.88       |
| Bajo N°200       | 6 grs.          | 0.88       | 100                  | 0          |
| Masa total       | 674 grs.        |            |                      |            |

Fuente: Cárcamo (2006).

$$\text{Modulo de Finura: } 205.06/100 = 2.05$$

**Tabla A.2:** Granulometría permitida arena incluyendo tolerancias en la banda de trabajo (NCh 165).

| Malla     | % Acumulado que pasa. Arena Normal | % Acumulado que pasa. Arena Fina |
|-----------|------------------------------------|----------------------------------|
| 10 mm.    | 100                                | 100                              |
| 5 mm.     | 90-100                             | 85-100                           |
| 2.5 mm.   | 75-100                             | 80-100                           |
| 1.25 mm.  | 45-90                              | 65-95                            |
| 0.63 mm.  | 21-64                              | 56-84                            |
| 0.315 mm. | 7-33                               | 34-53                            |
| 0.160 mm. | 0-12                               | 10-22                            |

Fuente: Cárcamo (2006).

De acuerdo al tipo granulométrico puede ser considerada Arena Normal con algunos rasgos de Arena fina. Adecuada para el uso.

b) Contenido de materia orgánica, según Nch 166.

La arena seleccionada pertenece al **nivel 2**. Escasa materia orgánica. (Color amarillo claro).

c) % de finos bajo malla N°200, según Nch 1223

msa (masa seca antes de lavado)= 620 grs.

msd (masa seca después de lavado) = 608 grs.

$$\%Finos = \frac{msa - msd}{msa} \times 100$$

$$\% Finos = 1.94 \%$$

d) Densidades, según Nch 1239

Ms (masa seca)= 180.95 grs.

Msss (masa saturada superficialmente seca)= 190.45 grs.

Ma (masa matraz mas agua)= 660.22 grs.

Mm (masa matraz mas agua mas material)= 777.27 grs.

DENSIDAD REAL SSS

$$\rho_{Rsss} = \frac{190.45}{(660.22 + 190.45 - 777.27)} \times 1000 = 2594.69 \frac{Kg.}{m^3} \quad (2595)$$

DENSIDAD REAL SECA.

$$\rho_{Rs} = \frac{180.95}{(660.22 + 190.45 - 777.27)} \times 1000 = 2465.26 \frac{Kg.}{m^3} \quad (2465)$$

DENSIDAD NETA.

$$\rho_N = \frac{180.95}{(660.22 + 180.95 - 777.27)} \times 1000 = 2831.77 \frac{Kg.}{m^3} \quad (2832)$$

ABSORCION DE AGUA.

$$\alpha = \frac{190.45 - 180.95}{180.95} \times 100 = 5.25\%$$

e) Cálculo del porcentaje de humedad.

mh (masa húmeda)= 588 grs.

ms (masa seca)= 552 grs.

$$\text{Porcentaje de humedad} = w = \frac{588 - 552}{588} = 6.12\%$$

### **Detalle dosificación de probetas**

➤ Dosificación de Mortero tipo A/C= 0.55

- Definición del tipo de mortero.

Dado que es innecesario generar un aumento en la retentividad de agua en el mortero, se hace innecesario el uso de cal.

- Determinación de la cantidad de agua y aire.

De acuerdo a tabla 7.1 de Manual de Mortero se tiene que:

MF= 2.05

% cal= 0

T. Máx. Arena= 5 mm.

Fluidez= Media

Así: **Dosis de Agua= 335 l/m<sup>3</sup>**

**Dosis de aire= 30 l/m<sup>3</sup>**

- Determinación de la dosis de cemento.

De acuerdo a la razón agua-cemento= 0.45, se obtiene que la dosis de cemento es:

$$C = 664 \text{ Kg. /m}^3 \text{ (664)}$$

- Dosis de cal: anteriormente se considero 0.

- Determinación de la dosis de arena.

Se obtiene de acuerdo a la siguiente relación:

$$\text{Dosis arena: } F = Pf * \left( 1000 - A - H - \frac{C}{Pc} \right)$$

con:

Pf (peso específico arena en estado SSS)= 2.60

A (dosis de agua)= 335 l/m<sup>3</sup>

H (cantidad de aire)= 30 l/m<sup>3</sup>

C (dosis de cemento)= 664 Kg. /m<sup>3</sup>

Pc (peso específico cemento)= 3.00

Así se obtiene:  $F = 1076 \text{Kg. /m}^3$  (1076)

Por lo tanto, dosificación para 1 m<sup>3</sup>

Cemento= 664 Kg.

Agua= 335 litros.

Arena= 1076 Kg.

#### Corrección de dosificación por contenido de humedad.

Se determina de acuerdo a la cantidad de humedad libre en la arena, con la siguiente relación:

$$hf = \text{Dosis arena} * (\% \text{ humedad} - \% \text{ absorción})$$

$$hf = 9.36 \text{ (l /m}^3\text{)}$$

Dosificación corregida mortero tipo A/C= 0.55:

**Tabla A.3:** Dosificación corregida mortero tipo A/C 0.55

| Material | Dosificación para 1 m <sup>3</sup><br>(1000 litros) |
|----------|---|
|          |   |
| Cemento  | 664 Kg.   |
| Agua     | 335-9= 326 litros                                   |
| Arena    | 1076+9= 1085 Kg.                                    |

Fuente: Cárcamo (2006).

De manera análoga a la reciente, se efectuó dosificación para morteros de cemento, razones agua/cemento (A/C) 0.65:

Dosificación corregida mortero tipo A/C= 0.65:

**Tabla A.4:** Dosificación corregida mortero tipo A/C 0.65

| Material | Dosificación para 1 m <sup>3</sup><br>(1000 litros) |
|----------|---|
|          |   |
| Cemento  | 553 Kg.   |
| Agua     | 335-10= 325 litros                                  |
| Arena    | 1172+10= 1182 Kg.                                   |

Fuente: Cárcamo (2006).

## ANEXO B: Caracterización y propiedades de morteros que tienen incluidas nanomoléculas de sílice

### Caracterización de morteros que tienen incluidos nanomoléculas de sílice por medio de microscopia electrónica

Esta caracterización se realizó mediante la utilización de un Microscopio de Barrido (SEM), analizando cada una de las probetas que son obtenidas a partir de las probetas de un mortero Tipo A/C= 0.55 con adiciones de GAIA de 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% en relación al peso de cemento, tomando tres muestras de cada tipo, aumentos de 1000X, 5000X y 12000X, lo que da un total de 12 muestras distintas.

#### a) Gráficos Adición de nanosílice v/s Tamaño promedio de partículas y Adición de nanosílice v/s Porcentajes de vacíos en las muestras.



Figura B.1: Adición de nanosílice v/s tamaño promedio de partículas. (Fuente: Cárcamo, 2006).



Figura B.2: Adición de nanosílice v/s Porcentaje de vacío de la muestra. (Fuente: Cárcamo, 2006).

En relación al crecimiento de granos y cristales se establece que:

- Para adiciones de 0.5% de nanosílice en relación al peso del cemento, apreciamos un mayor tamaño promedio de grano, justificado principalmente por el crecimiento de los nanocristales de GAIA sin presencia de grandes niveles de aglomeración, lo

que habla de crecimientos más óptimo y sin grandes limitantes de espacio. Podemos establecer entonces, que existe un crecimiento relativamente ordenado.

- Para un 1.0% de adición, se registra una disminución del tamaño de grano, al mismo tiempo que se registra una disminución en el índice de vacíos entre partículas, quizás por una merma en el crecimiento de granos y cristales, pero con un buen ordenamiento.
- Para un 1.5% de adición vemos un abrupto aumento en el tamaño de los granos y/o cristales y una disminución sostenida en el índice de vacíos, lo que hablaría, a nivel superficial, de un crecimiento más ordenado y óptimo de las partículas.

De acuerdo al último punto, podríamos establecer que el porcentaje de adición óptima para una mejor conformación microestructural sería del 1.5%, lo que no correspondería al óptimo encontrado en análisis mecánicos de resistencia, que se expone mas adelante. Si bien la materia presenta reacciones bastante similares y dependientes a nivel de reacciones en todos sus niveles, el comportamiento de la superficie de un material y el de sus capas internas difieren bastante según la mayoría de los materiólogos, pues el ordenamiento atómico en ambos lugares es a veces muy distinto. De ésta manera, ambos óptimos no son excluyentes, y pueden ocurrir de manera simultánea. (Cárcamo, 2006)

### b) Gráficas Tamaños de grano v/s Porcentaje de vacíos en la muestra para diversas adiciones de nanosílice.

En esta sección se hacen relaciones gráficas para el porcentaje de vacíos en la muestra de acuerdo a una serie de categorías de tamaños de grano, siendo éstas: categoría A para los tamaños de grano entre 1 y 6 ( $\mu\text{m}$ .), categoría B para tamaños de grano entre 7 y 12 ( $\mu\text{m}$ .) y finalmente categoría C para tamaños de grano entre 13 y 18 ( $\mu\text{m}$ .). Se construirá un grafico que reúna todas las adiciones de nanosílice y sólo las categorías A y B, pues algunas clases de muestras no presentan la categoría C.



Figura B.3: Gráfica tamaño partículas v/s porcentaje de vacíos en la muestra. (Fuente: Cárcamo, 2006).

En este caso, el comportamiento es bastante claro, a menor tamaño de partículas, menor índice de vacíos, sin considerar el caso sin adición que aunque muestra un leve grado de la disminución anterior, no tiene relación con este análisis. Esta disminución de vacíos conforme al menor tamaño de las partículas estaría estrechamente relacionada con el trabajo de las nanopartículas de Gaia nanosílice, pues la generación de nano-CSH (nanocemento), que además de un efecto de tipo estructural también cumple un trabajo de relleno, disminuye el porcentaje de vacíos seguramente al unir y cohesionar mejor a las partículas pequeñas en una primera instancia adecuándose mejor a los pequeños espacios de vacío que éstas poseen, para luego continuar con las de mayor tamaño, pues al aumentar la adición, menor es el índice de vacíos en todas las categorías.

Se establece que a mayor porcentaje de nanopartículas tenemos mayor consistencia y más aglomeración, con menos espacios entre los microconstituyentes del mortero lo que le da una morfología distinta en relación a la muestra patrón (sin adiciones de nanosílice). Esto que podemos apreciar a nivel superficial, tiene gran relación en cuanto a comportamiento (quizás no precisamente directa) con lo que ocurre al interior de las muestras, lo que implica mejores propiedades de los materiales ante la distribución de cargas, porosidad, microgrietas. Esto implica mayores resistencias a flexotracción y compresión por ejemplo, dada la menor existencia de vacíos por la mayor presencia de nanopartículas (nanocemento) lo que implica mayores dosis, mejor distribución de esfuerzos como mencionamos con anterioridad dada la menor posibilidad de agrietamiento y la homogeneidad de la mezcla, entre otros. Importante es destacar que el análisis efectuado en ésta sección es una caracterización superficial, que nos da ciertas luces respecto a un comportamiento más generalizado de los morteros ensayados, por ejemplo a esfuerzos mecánicos. (Cárcamo, 2006)

### **Propiedades en cuanto a resistencias mecánicas de flexotracción y compresión y trabajabilidad presentes en probetas de mortero con nanomoléculas de sílice a ensayar.**

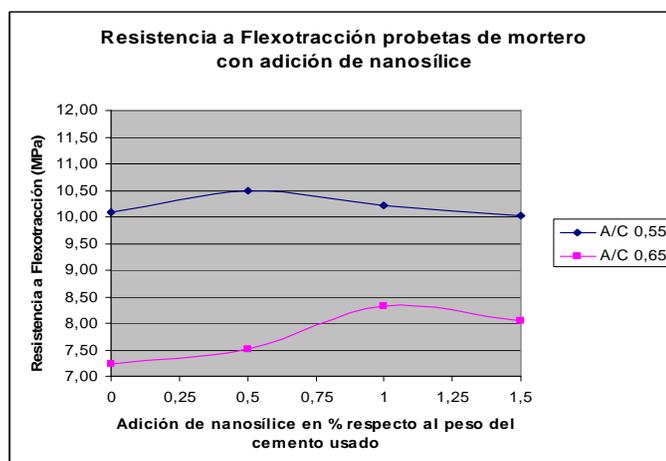
En la investigación realizada en forma previa, que se mencionó con anterioridad, se realizaron ensayos de resistencias mecánicas de flexotracción y compresión, y trabajabilidad mediante cono reducido en probetas de idénticas características a las de esta investigación, como ya se ha explicado.

#### **➤ Flexotracción y compresión**

Estos ensayos se realizaron según la NCh 158 Of. 67, “Cementos- Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento”, de acuerdo a los procedimientos para la conservación, ensayos y cálculos de resistencias de las probetas sometidas a flexotracción y compresión que ahí se indican.

a) Flexotracción

Se sometieron a este ensayo una serie de probetas prismáticas de 4x4x16 cm., que se apoyaron, en una de las caras laterales del moldaje, sobre los rodillos de apoyo de la máquina a flexión y se les aplicó una carga a través del rodillo superior con una velocidad de carga de  $5 \pm 1$  kg/s. Los resultados obtenidos para A/C 0.65 y A/C 0.55, con sus diferentes adiciones de nanosílice, se muestran en el siguiente gráfico:



**Figura B.4:** Resultados gráficos Resistencia a Flexotracción de probetas de mortero de cemento con adiciones de nanosílice. (Fuente: Cárcamo, 2006).

Cada resistencia calculada corresponde al promedio aritmético de tres probetas que poseen la misma razón agua/cemento y la misma adición de nanosílice, fabricadas en condiciones estrictamente similares.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se tiene que la dosis óptima de aditivo para alcanzar mayores resistencias sería:

- Para A/C= 0.55, la resistencia máxima se alcanza para una adición del 0.5%, registrándose eso sí, un aumento de resistencia a la flexotracción cercano al 5%.
- Para A/C= 0.65, la resistencia máxima se alcanza para una adición correspondiente al 1.0%, registrándose un aumento de resistencia del orden de 15%

Se aprecia que para la razón de agua cemento mas baja se requiere de menor dosis de aditivo para alcanzar mayores mejoras en la resistencia, en cambio para la razón agua cemento mas alta se requiere mayor cantidad de nanosílice para aumentar la resistencia.

Teniendo claro que a razones agua cemento bajas tenemos mayores dosis de cemento, consideremos que, según la bibliografía, se tiene que a medida que el cemento se hidrata, las partículas de nanosílice se combinan con los elementos de mortero (en este caso) distribuyéndose en todos los huecos que quedan entre las partículas de cemento y los agregados. De esta forma, el nano CSH (silicato del calcio hidratado) producido por GAIA, genera un hormigón más compacto, con menos huecos, más resistente y con una estructura más homogénea. Antes de continuar, analicemos más a fondo lo anterior:

A medida que el mortero (u hormigón) aumenta su razón A/C, los espacios vacíos en su interior aumentan también. Éstos vacíos son varios órdenes de magnitud mayores que el tamaño de la Nanosílice. Como ya se ha estudiado, al principio de la reacción de hidratación del cemento, tanto éste como la nanosílice (GAIA) son sustancias de tipo amorfo. A medida que transcurre el tiempo, comienzan a formarse cristales de CSH (CSH: C=CaO, S=SiO<sub>2</sub>, H=H<sub>2</sub>O) desde un estado amorfo a uno cristalino (para el cemento y la nanosílice).

La forma de estos cristales viene dada por:

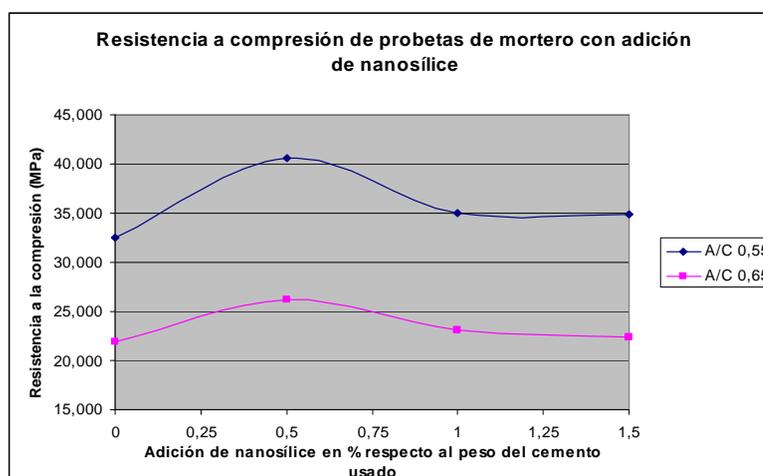
- El tamaño de la partícula amorfa original.
- El espacio que rodea a la partícula amorfa, el que determina cuanto puede crecer, entre otros.

De acuerdo a lo anterior, sería esperable que a dosis de cemento más altas (menor A/C) se necesitarán menores aportes de nanosílice para conseguir un aumento en resistencias (existe menor volumen de vacío que las partículas de nanosílice deberían llenar), pues al llenar los nanocristales casi completamente la estructura 3D de los vacíos, la mayor dosis de cemento aplicada (nanocemento+microcemento) implica mayor resistencia. Comportamiento contrario apreciamos para mayores valores de A/C, pues se necesitarán mayores dosis de GAIA para lograr aumentos de resistencias. (Cárcamo, 2006).

Con respecto a las dosis óptimas, de acuerdo al gráfico para A/C 0.55 se observa que el óptimo está entre un 0.5% y un 1.0% de nanosílice (en porcentaje de peso de cemento) y para A/C 0.65 el óptimo está en el 1.0% de adición. Se puede expresar entonces que a menores dosis (con respecto al óptimo), se tiene más vacíos por lo tanto menores resistencias, y a mayores dosis, se aprecia un crecimiento ineficiente de nanocristales (estructura 3D de vacíos ya está llena), por lo que no hay grandes aumentos en las resistencias.

b) Compresión

Cada trozo obtenido del ensayo a flexión se ensayará a la compresión en una sección de 40\*40 mm., aplicándose la carga a las dos caras provenientes de las laterales del moldaje, colocándose entre las placas de la máquina de compresión. La velocidad de carga será tal que la presión sobre la probeta aumente entre 10 y 20 kg/cm<sup>2</sup>/s. Hasta la mitad de la carga de ruptura la carga podrá aumentar a mayor velocidad, pero en todo caso la duración de cada ensayo será menor o igual en 10 s. Los resultados obtenidos para A/C 0,65 y A/C 0,55 se muestran en el siguiente gráfico.



**Figura B.5:** Gráfico de Resultados ensayo de compresión a morteros de cemento. (Fuente: Cárcamo, 2006).

Cada resistencia a la compresión calculada corresponde al promedio aritmético de seis probetas que poseen la misma razón agua cemento y la misma adición de nanosílice, fabricadas en condiciones estrictamente similares.

- Para A/C= 0.55, la resistencia máxima se obtiene con dosis de nanosílice de 0.5% en relación al peso del cemento, registrando se aumentos en las resistencias a la compresión de aproximadamente un 24%.
- Para A/C= 0.65 se obtiene la máxima resistencia a la compresión con una adición de 0.5%, registrándose aumentos del orden del 21%.

Es apreciable que para ambas dosificaciones se alcanza el máximo de resistencias con un 0,5% de adición de nanosílice (similar al óptimo en flexotracción), pero en el caso de la menor relación agua cemento, el aumento en la resistencia es mayor.

Los principios utilizados para el análisis son los mismos que para el caso de Resistencia a la Flexotracción en lo relativo al proceso de hidratación de las partículas de cemento, vacíos, producción y crecimiento de nano-CSH, llenado de vacíos y aumento de resistencias (dosis óptimas). De acuerdo a esto es esperable que para

razón A/C menor se necesite menos dosis de nanosílice, que para la razón A/C mayor, para aumentar su resistencia, debido a la cantidad de vacíos.

Analizando el comportamiento experimental y su contraste con las predicciones teóricas se tiene que para  $A/C=0.55$ , su dosis óptima es de 0,5%, debido al rango de tamaños que posee GAIA (3nm.- 250nm.) hay un rango óptimo de espacios que se llenan de manera mas o menos perfecta, y dado el importante aumento de resistencia (+24%) éste podría ser uno de esos casos. Pese a que habría valores fuera del rango estudiado, el comportamiento de éstas probetas estaría de acuerdo con la teoría. Como el porcentaje de adición óptima para  $A/C=0.55$  corresponde al 0.5%, podríamos interpretar que la adición óptima para  $A/C=0.65$  debería ser mayor a 0.5%, para que dicho comportamiento responda a los fundamentos teóricos, así se estima que para  $A/C=0.65$  la adición óptima de nanosílice estaría entre 0.5% y 1.0%.

#### Discusión de resultados referentes a análisis de resistencias mecánicas

**Caso 1:** Bajos valores de A/C (alta dosis de cemento), espacios vacíos de tamaño reducido.

1.1 En este caso, los nanocristales originados en GAIA se acomodan a los espacios vacíos, de tamaño bastante reducido (pero mayor a una nanopartícula). Por ende, los nanocristales son capaces de llenar toda la estructura de vacíos en 3D del mortero u hormigón, pues su límite de crecimiento es mayor a los espacios vacíos que hay.

**Caso 2:** Altos valores de A/C (baja dosis de cemento), espacios vacíos de gran tamaño.

2.1 En éste caso, el límite de crecimiento de los nanocristales es menor que el tamaño de los vacíos. Así, a los 28 días (o antes) quedarán espacios vacíos al final de la reacción de hidratación del cemento, digamos por ejemplo, de un 40% del total de vacíos (el resto fue llenado gracias a las nanopartículas).

2.2 Como hay mucho volumen disponible, si se agrega más nanosílice, el porcentaje de espacios vacíos irá en franca disminución. De ésta manera, a los 28 días existirá menor cantidad de vacíos que el caso 2.1 (digamos sólo un 20% por ejemplo, quizás menos).

Gaia Nanosílice tiene preferencia por el rango de valores que corresponden a bajas razones agua/cemento. En éste intervalo, los espacios vacíos son menores, por lo tanto se necesita menor cantidad de nanosílice para llenar dichos volúmenes. Dado el rango de tamaños que tiene GAIA (entre 3nm. y 250 nm.), existe un intervalo óptimo de vacíos que el aditivo llena perfectamente. Antes o después de éste rango (valores más

bajos o altos de A/C) el llenado del volumen puede no ser tan bueno. En el primer caso porque los nanocristales podrían no alcanzar a crecer plenamente (todo lo que podrían crecer) y en el segundo caso porque quedan espacios vacíos.

De acuerdo a las consultas efectuadas podemos establecer con carácter de hipótesis que cuando hay mucha Nanosílice y pocos espacios disponibles, los nanocristales no pueden crecer hasta un tamaño que les dé una resistencia óptima. Esto se explicaría porque donde antes las nanopartículas se complementaban entre sí (altos valores de A/C por ejemplo) ahora compiten entre sí. Esto implica por lo tanto menores resistencias que las esperadas por una aglomeración excesiva entre las partículas de nanosílice, debido a este crecimiento incompleto de los nanocristales. (Cárcamo, 2006).

➤ **Trabajabilidad mediante cono reducido**

Las muestras a utilizar serán evaluadas en cuando al descenso de cono y controladas en el instante de ser desmoldadas (del cono reducido), esto es a  $t=0$  min., para posteriormente hacer una evaluación al comportamiento de dicho nanoprodueto. El ensayo se realiza de acuerdo a NCh 2257/3. Of96 “Morteros- determinación de la consistencia-Parte 3: Método del asentamiento de cono” donde se explicita para el método del cono reducido lo relacionado con los aparatos y los procedimientos a utilizar.

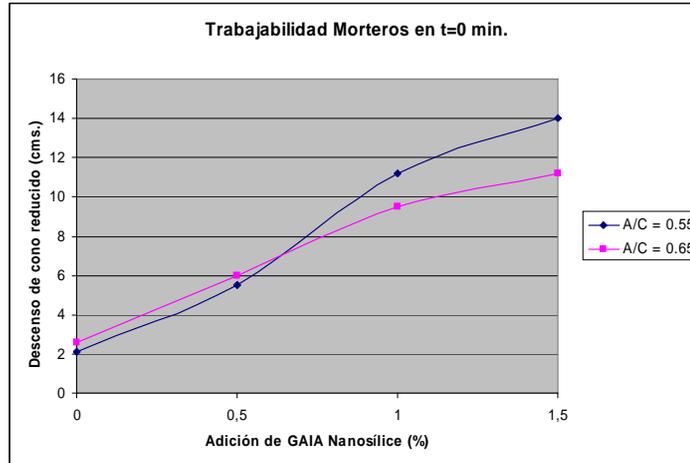
Después de efectuadas las dosificaciones, que son exactamente iguales a las efectuadas para la construcción de probetas de mortero para ensayos de flexotracción y compresión, efectuadas las correcciones por humedad, se tiene:

**Tabla B.1:** Dosificación corregida morteros de cemento para ensayo de Cono Reducido (NCh 2257/3).

|          | A/C = 0.55  | A/C = 0.65  |
|----------|-------------|-------------|
| Material | 1000 litros | 1000 litros |
|          |             |             |
| Cemento  | 664 Kg.     | 553 Kg.     |
| Agua     | 326 litros  | 325 litros  |
| Arena    | 1085 Kg.    | 1182 Kg.    |

Fuente: Cárcamo, 2006.

Los resultados en relación al asentamiento instantáneo en centímetros obtenidos para A/C 0.55 y A/C 0.65 en las diversas adiciones de nanosílice se muestran en el siguiente gráfico.



**Figura B.6:** Gráfico de resultados de trabajabilidad para morteros de cemento con adiciones de nanosílice. (Fuente: Cárcamo, 2006)

En relación a las muestras de mortero ensayadas, podemos afirmar que:

- Máximas dosis de aditivo recomendadas para una óptima docilidad:
  - Para  $A/C = 0.55$  tenemos una curva relativamente lineal, que justifica dosificaciones de 1.5% en relación al peso del cemento.
  - Para  $A/C = 0.65$  la curva presenta una estructura lineal hasta la adición correspondiente al 1.0%, punto en el cual se alcanza más del 80% de la máxima trabajabilidad, luego, es poco efectivo aumentar la adición.

Es importante destacar la impresionante mejora en la docilidad que genera el producto a adiciones tan bajas como 0.5% en relación al peso del cemento, lo que hace al mortero adquirir una consistencia de tipo líquido, facilitando enormemente su uso y/o aplicación.

- En relación al comportamiento experimental del producto:

Para razones  $A/C = 0.55$  se produce una relación directamente proporcional entre el aumento de adición de GAIA y el aumento de trabajabilidad. En el caso de razones  $A/C = 0.65$  se alcanzan niveles de trabajabilidad elevados con dosis decrecientes del 1.0% y 0.5% respectivamente.

Basado en datos bibliográficos, se afirma que la combinación de las nanopartículas con algunas moléculas especialmente seleccionadas, produce una trabajabilidad y plasticidad excepcionales.

Una vez adicionada el agua al cemento, la pasta que se forma comienza un proceso de hidratación del cemento, durante el cual, éste adquiere una consistencia plástica. Dado que la pasta es el componente activo del mortero, ésta característica de plasticidad le es transferida. En ésta etapa plástica, el mortero acepta deformaciones con pequeños aportes de energía externa, para lo cual deben vencerse principalmente dos reacciones internas en él:

- La primera dice relación con el “frotamiento interno” del conjunto de partículas granulares suspendidas en el agua de amasado (fluidez).
- La segunda, dice relación con la cohesión de la masa (consistencia).

El conjunto de ambas características constituye la trabajabilidad del mortero (o docilidad).

Como es posible apreciar, ésta trabajabilidad está directamente relacionada con el contenido e interacción de los componentes, principalmente el agua y las partículas finas. Mientras mayor es la dosis de agua, mayor docilidad, lo que es inversamente proporcional al contenido de finos.

De acuerdo a lo anterior, vemos que la trabajabilidad no corresponde a una definición precisa, y engloba una serie de propiedades independientes, para las cuales hemos supuesto algún tipo de acción de la nanosílice en la mejora de propiedades:

- Consistencia: cohesión de la masa de cemento (unión entre partículas) se vería influenciada de manera positiva por la producción de nanopartículas de CSH que unen las micropartículas de cemento existentes.
- Homogeneidad: por una razón similar a la anterior, pues implicaría menor existencia de vacíos y la presencia de un gran porcentaje de partículas similares presentes en la mezcla.
- Plasticidad: dice referencia a que el agua de amasado forma una “envoltura” sobre las partículas de cemento, produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras.

En éste punto es bueno hacer una salvedad. Podría pensarse que debido a que GAIA Nanosílice produce nanopartículas y una consecuente eliminación de vacíos en la mezcla, podría haber una disminución en la trabajabilidad (imposibilidad de deslizamiento). Sin embargo, GAIA Nanosílice posee moléculas adicionales que le otorgan plasticidad extra, de esta forma:

- Moléculas seleccionadas generan aumentos en trabajabilidad (cuando la mezcla aún posee trabajabilidad propia).
- Nanopartículas amorfas → crecimiento → Nanocristales.

Las nanopartículas amorfas comienzan a actuar (trabajabilidad) una vez que la mezcla pierde su docilidad, luego se produce la etapa de crecimiento convirtiéndose en nanocristales los cuales solo aportan resistencia mecánica.

De ésta manera, apreciamos que la adición de Nanosílice sería efectiva para bajas razones A/C, pues aumentaría la baja docilidad de la mezcla gracias a las moléculas extra que posee. Esto en una relación proporcional entre el aumento de nanosílice y el aumento de trabajabilidad.

Para razones A/C más altas, adiciones de Nanosílice superiores al 1.0% no son necesarias, pues la trabajabilidad de la mezcla es mayor que el caso anterior.

Otro detalle importante de mencionar es que las nanopartículas bien dispersadas aumentan la viscosidad de la fase líquida, lo cual ayuda a la suspensión de los granos de cemento y agregados que, a su vez, mejora la resistencia a la segregación y la trabajabilidad del sistema.

#### Discusión de resultados:

De acuerdo a los análisis y estudios anteriores, el comportamiento de las muestras de mortero en diferentes configuraciones está bastante de acuerdo con las predicciones teóricas expresadas recientemente, esto es:

Razones A/C= 0.55

- baja docilidad.
- relación directamente proporcional entre aumento de docilidad y aumento en dosis de aditivo (más moléculas para producir más mejoras).

Razones A/C=0.65

- docilidad más alta.
- dosis óptimas de aditivos del orden del 1.0%, después mejoras son insignificantes y por ende mayor adición innecesaria.

## ANEXO C: Tablas

- **Propiedades en cuanto a resistencias mecánicas de flexotracción y compresión y trabajabilidad presentes en probetas de mortero con nanomoléculas de sílice a ensayar.**

**Tabla C.1:** Tamaños de partículas y Porcentajes de vacíos para diversas adiciones de nanosílice.

| Adición de nanosílice | Tamaño promedio de partículas (µm) | % de Vacíos |
|-----------------------|------------------------------------|-------------|
| 0%                    | 3.5                                | 7.12        |
| 0.5%                  | 4.07                               | 5.99        |
| 1.0%                  | 3.95                               | 5.31        |
| 1.5%                  | 4.48                               | 3.99        |

Fuente: Cárcamo (2006).

**Tabla C.2:** Porcentajes de vacíos para diversas categorías de tamaño de grano

| Categoría     | Porcentaje de Vacíos (%) |           |           |           |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
|               | Gaia 0%                  | Gaia 0.5% | Gaia 1.0% | Gaia 1.5% |
| A= 1-6 (µm)   | 7.07                     | 4.63      | 3.34      | 2.73      |
| B= 7-12 (µm)  | 7.90                     | 6.01      | 6.54      | 4.62      |
| C= 13-18 (µm) | N.E                      | 6.07      | N.E       | 5.13      |

N.E: No existe la categoría en el grupo

Fuente: Cárcamo (2006).

**Tabla C.3:** Resultado ensayos de morteros de cemento con diversas adiciones de Nanosílice a flexotracción

| Tipo Probeta | RESISTENCIA A FLEXOTRACCION (MPa.) |        |        |        |
|--------------|------------------------------------|--------|--------|--------|
|              | G = 0%                             | G=0,5% | G=1,0% | G=1,5% |
| A/C 0,55     | 10.075                             | 10.481 | 10.210 | 10.030 |
| A/C 0,65     | 7.230                              | 7.501  | 8.314  | 8.043  |

Fuente: Cárcamo (2006).

**Tabla C.4:** Resultado ensayos de compresión a morteros de cemento con adiciones de Nanosílice

| Tipo Probeta | RESISTENCIA A COMPRESION (MPa.) |        |        |        |
|--------------|---------------------------------|--------|--------|--------|
|              | G = 0%                          | G=0,5% | G=1,0% | G=1,5% |
| A/C 0,55     | 32.500                          | 40.625 | 35.000 | 34.894 |
| A/C 0,65     | 21.875                          | 26.250 | 23.125 | 22.375 |

Fuente: Cárcamo (2006).

**Tabla C.5:** Asentamiento instantáneo de cono (reducido) para morteros de cemento en diversas configuraciones.

Para t= 0 min.

|            | Gaia 0% | Gaia 0.5% | Gaia 1.0% | Gaia 1.5% |
|------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A/C = 0.55 | 2.1     | 5.5       | 11.2      | 14        |
| A/C = 0.65 | 2.6     | 6         | 9.5       | 11.2      |

Fuente: Cárcamo (2006).

➤ **Análisis diferencia de peso resultados obtenidos**

**Tabla C.6:** medición previa inmersión de discos en solución sulfato de sodio. Peso seco para T<sub>0</sub>

| Muestra              | Pseco T <sub>0</sub><br>(grs.) | Muestra              | Pseco T <sub>0</sub><br>(grs.) |
|----------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| A/C 0,65 - 0 - I     | 17,384                         | A/C 0,55 - 0 - I     | 18,321                         |
| A/C 0,65 - 0 - II    | 18,946                         | A/C 0,55 - 0 - II    | 20,685                         |
| A/C 0,65 - 0 - III   | 19,874                         | A/C 0,55 - 0 - III   | 21,069                         |
| A/C 0,65 - 0,5 - I   | 19,409                         | A/C 0,55 - 0,5 - I   | 19,004                         |
| A/C 0,65 - 0,5 - II  | 19,774                         | A/C 0,55 - 0,5 - II  | 20,251                         |
| A/C 0,65 - 0,5 - III | 19,76                          | A/C 0,55 - 0,5 - III | 21,131                         |
| A/C 0,65 - 1,0 - I   | 20,406                         | A/C 0,55 - 1,0 - I   | 20,183                         |
| A/C 0,65 - 1,0 - II  | 18,591                         | A/C 0,55 - 1,0 - II  | 20,086                         |
| A/C 0,65 - 1,0 - III | 19,905                         | A/C 0,55 - 1,0 - III | 18,581                         |
| A/C 0,65 - 1,5 - I   | 19,42                          | A/C 0,55 - 1,5 - I   | 19,487                         |
| A/C 0,65 - 1,5 - II  | 20,005                         | A/C 0,55 - 1,5 - II  | 19,537                         |
| A/C 0,65 - 1,5 - III | 21,012                         | A/C 0,55 - 1,5 - III | 20,059                         |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C.7:** medición posterior inmersión de discos en solución sulfato de sodio. Peso seco para T<sub>I</sub>, T<sub>II</sub> y T<sub>III</sub>, para A/C 0,65

| Muestra            | Pseco T <sub>I</sub><br>(grs.) | Pseco T <sub>II</sub><br>(grs.) | Pseco T <sub>III</sub><br>(grs.) |
|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| A/C 0,65 - 0 - I   | 17,35                          | 18,87                           | 18,8                             |
| A/C 0,65 - 0,5 - I | 19,34                          | 19,59                           | 19,64                            |
| A/C 0,65 - 1,0 - I | 20,28                          | 18,43                           | 19,8                             |
| A/C 0,65 - 1,5 - I | 19,29                          | 19,89                           | 20,86                            |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C.8:** medición posterior inmersión de discos en solución sulfato de sodio. Peso seco para T<sub>I</sub>, T<sub>II</sub> y T<sub>III</sub>, para A/C 0,55

| Muestra              | Pseco T <sub>I</sub><br>(grs.) | Pseco T <sub>II</sub><br>(grs.) | Pseco T <sub>III</sub><br>(grs.) |
|----------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| A/C 0,55 - 0 - III   | 18,29                          | 20,63                           | 21,05                            |
| A/C 0,55 - 0,5 - III | 18,98                          | 20,19                           | 21,08                            |
| A/C 0,55 - 1,0 - III | 20,08                          | 20,07                           | 18,62                            |
| A/C 0,55 - 1,5 - III | 19,44                          | 19,54                           | 20,06                            |

Fuente: Elaboración propia.

Disminución de peso seco en relación al % de adición de nanosílice

**Tabla C.9:** Disminución de peso seco en relación al % de adición de nanosílice entre T<sub>0</sub> y T<sub>I</sub>

| % Nanosílice | A/C 0,65 | A/C 0,55 |
|--------------|----------|----------|
| 0            | 0,196    | 0,169    |
| 0,5          | 0,356    | 0,126    |
| 1            | 0,617    | 0,510    |
| 1,5          | 0,669    | 0,241    |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C.10:** Disminución de peso seco en relación al % de adición de nanosílice entre  $T_0$  y  $T_{II}$ 

| % Nanosílice | A/C 0,65 | A/C 0,55 |
|--------------|----------|----------|
| <b>0</b>     | 0,401    | 0,266    |
| <b>0,5</b>   | 0,931    | 0,301    |
| <b>1</b>     | 0,866    | 0,080    |
| <b>1,5</b>   | 0,575    | 0,036    |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C.11:** Disminución de peso seco en relación al % de adición de nanosílice entre  $T_0$  y  $T_{III}$ 

| % Nanosílice | A/C 0,65 | A/C 0,55 |
|--------------|----------|----------|
| <b>0</b>     | 0,445    | 0,138    |
| <b>0,5</b>   | 0,607    | 0,147    |
| <b>1</b>     | 0,377    | 0,059    |
| <b>1,5</b>   | 0,247    | 0,045    |

Fuente: Elaboración propia.

### Comparación de resultados

**Tabla C.12:** Comparación de resultados para A/C 0,65

| % Nanosílice | Disminución Pseco (%)          |                                   |                                    |
|--------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|              | A/C 0,65 (Ps $T_0$ -Ps $T_I$ ) | A/C 0,65 (Ps $T_0$ -Ps $T_{II}$ ) | A/C 0,65 (Ps $T_0$ -Ps $T_{III}$ ) |
| <b>0</b>     | 0,196                          | 0,401                             | 0,445                              |
| <b>0,5</b>   | 0,356                          | 0,931                             | 0,607                              |
| <b>1</b>     | 0,617                          | 0,866                             | 0,377                              |
| <b>1,5</b>   | 0,669                          | 0,575                             | 0,247                              |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C.13:** Comparación de resultados para A/C 0,55

| % Nanosílice | Disminución Pseco (%)          |                                   |                                    |
|--------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|              | A/C 0,55 (Ps $T_0$ -Ps $T_I$ ) | A/C 0,55 (Ps $T_0$ -Ps $T_{II}$ ) | A/C 0,55 (Ps $T_0$ -Ps $T_{III}$ ) |
| <b>0</b>     | 0,169                          | 0,266                             | 0,138                              |
| <b>0,5</b>   | 0,126                          | 0,301                             | 0,147                              |
| <b>1</b>     | 0,510                          | 0,080                             | 0,059                              |
| <b>1,5</b>   | 0,241                          | 0,036                             | 0,045                              |

Fuente: Elaboración propia.

### Disminución de peso seco en el tiempo para cada adición de nanosílice

**Tabla C.14:** Disminución de peso seco en el tiempo para 0% de adición

| Tiempo (días) | Disminución Pseco (%) |          |
|---------------|-----------------------|----------|
|               | A/C 0,65              | A/C 0,55 |
| 0             | 0                     | 0        |
| 13            | 0,196                 | 0,169    |
| 26            | 0,401                 | 0,266    |
| 39            | 0,445                 | 0,138    |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C.15:** Disminución de peso seco en el tiempo para 0.5% de adición

| Tiempo (días) | Disminución Pseco (%) |          |
|---------------|-----------------------|----------|
|               | A/C 0,65              | A/C 0,55 |
| 0             | 0                     | 0        |
| 13            | 0,356                 | 0,126    |
| 26            | 0,931                 | 0,301    |
| 39            | 0,607                 | 0,147    |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C.16:** Disminución de peso seco en el tiempo para 1.0% de adición

| Tiempo (días) | Disminución Pseco (%) |          |
|---------------|-----------------------|----------|
|               | A/C 0,65              | A/C 0,55 |
| 0             | 0                     | 0        |
| 13            | 0,617                 | 0,510    |
| 26            | 0,866                 | 0,080    |
| 39            | 0,377                 | 0,059    |

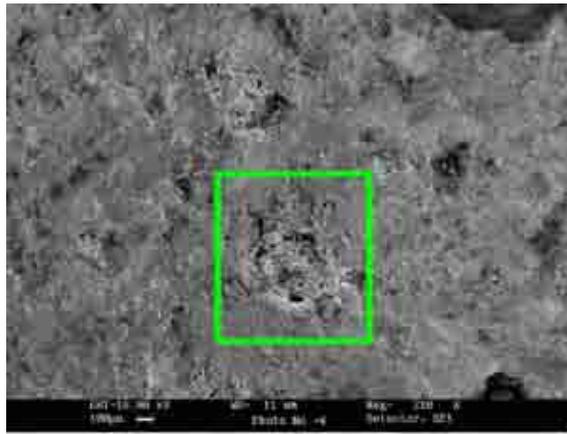
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C.17:** Disminución de peso seco en el tiempo para 1.5% de adición

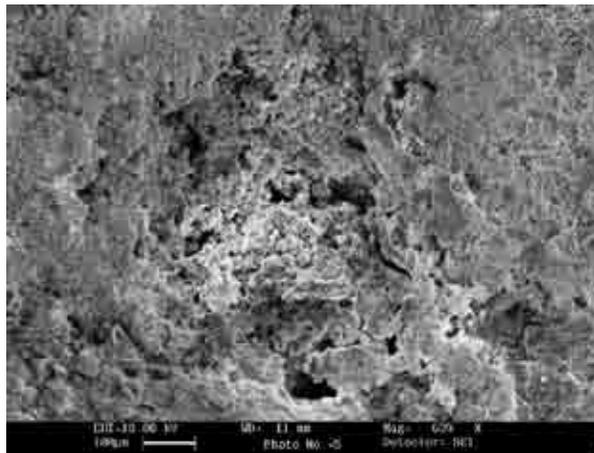
| Tiempo (días) | Disminución Pseco (%) |          |
|---------------|-----------------------|----------|
|               | A/C 0,65              | A/C 0,55 |
| 0             | 0                     | 0        |
| 13            | 0,669                 | 0,241    |
| 26            | 0,575                 | 0,036    |
| 39            | 0,247                 | 0,045    |

Fuente: Elaboración propia.

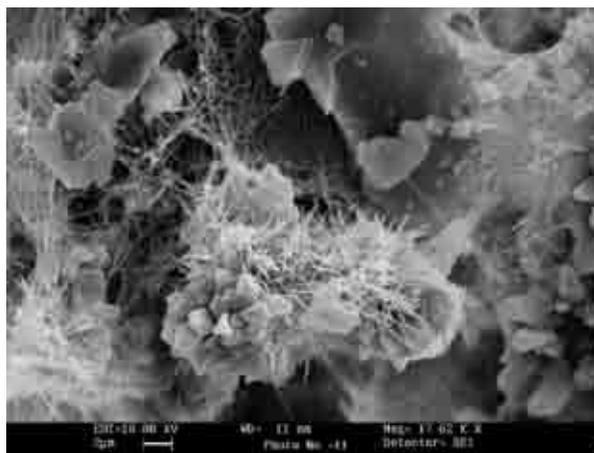
## ANEXO D: Microscopia electrónica de barrido (SEM)



**Figura D.1:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 210X. Panorámica superficial con ataques puntuales en la superficie, dejando morfología bastante irregular y heterogénea. (Fuente: elaboración propia)



**Figura D.2:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 639X. Detalle imagen anterior de la zona atacada, que muestra acción en profundidad con remoción de microconstituyentes del concreto. (Fuente: elaboración propia)



**Figura D.3:** Imagen muestra sometida a la acción de solución de sulfato de sodio: “mala” con un aumento de 17000X. Detalle de gran magnificación. Etringita del orden de 6  $\mu\text{m}$  a 12  $\mu\text{m}$  (izquierda abajo y centro). En torno a etringita cristales mas oscuros que no cuentan con depósitos particulares en la superficie. (Fuente: elaboración propia)