



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

# **HORMIGONES MASIVOS: INFLUENCIA INHIBIDORA DE LAS ADICIONES INCORPORADAS AL CEMENTO PORTLAND SOBRE EL FENÓMENO EXPANSIVO DEF**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**HERMES ANDRÉS MONTECINOS CUADROS**

**PROFESOR GUÍA:**

FEDERICO DELFIN ARIZTÍA

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

MIGUEL FIGUEROA NEICUN

DAVID CAMPUSANO BROWN

## **HORMIGONES MASIVOS: INFLUENCIA INHIBIDORA DE LAS ADICIONES**

### **INCORPORADAS AL CEMENTO PORTLAND SOBRE EL FENÓMENO EXPANSIVO DEF.**

La formación de etringita retardada (DEF) es un fenómeno expansivo que se origina en estructuras de hormigón sometidas a altos niveles de temperatura ( $>70^{\circ}\text{C}$ ) durante su etapa inicial de curado, esto puede ocurrir en las estructuras de hormigón masivo que desarrollan altas temperaturas producto del calor generado por las reacciones de hidratación del cemento. Es por esta razón, que en estructuras de este tipo se toman costosas medidas con el objetivo de no sobrepasar ciertos niveles de temperatura y así evitar el potencial desarrollo del fenómeno DEF.

Este trabajo tiene por objetivo comprobar la hipótesis respecto del efecto inhibitor sobre el fenómeno de formación de etringita retardada (DEF) de las adiciones puzolánicas que se incorporan para la fabricación de la mayoría de los cementos chilenos y de esta forma determinar la posibilidad de flexibilizar las restricciones de temperatura máxima establecidas para los hormigones masivos.

El procedimiento experimental desarrollado se basa en la metodología implementada por Ross Duggan, denominada Ensayo Duggan, el cual consistió en la fabricación de probetas de mortero confeccionadas con cementos con distintas proporciones de adición, las cuales luego ser sometidas a un curado térmico a una temperatura máxima de  $85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  se les aplicó una serie de ciclos de humedecimiento y secado, con el objetivo de acelerar el fenómeno expansivo. Luego se tomaron mediciones de longitud periódicas con el fin de determinar el comportamiento expansivo de cada cemento estudiado frente a las condiciones de curado impuestas que favorecen el fenómeno. Paralelamente, se realizaron ensayos de resistencia para determinar la influencia de las altas temperaturas de curado sobre la resistencia a la compresión de probetas cúbicas de hormigón.

Se verificó que el contenido de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) es el componente del cemento con mayor influencia en el desarrollo del fenómeno DEF. Se determinó que el cemento con mayor efecto expansivo corresponde al cemento clasificado como Portland Puzolánico el cual coincide con el de mayor proporción de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) mientras que el cemento clasificado como Portland puro desarrolla una expansión moderada luego de finalizadas las mediciones. El cemento clasificado como Puzolánico no desarrolla presenta un comportamiento expansivo durante la etapa de estudio, este cemento corresponde al de menor proporción de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) al mismo tiempo que corresponde al con mayor contenido de puzolana ( $\approx 39\%$ ).

Respecto a los ensayos de resistencia, se determinó que los cementos con adiciones puzolánicas presentan un aumento moderado de la resistencia a los 28 días producto del curado a alta temperatura, mientras que el cemento Portland sin adición presenta una leve disminución de su resistencia a los 28 días. Estos comportamientos indicarían una disminución de la tasa de desarrollo de la resistencia a más largo plazo.

*Para mis Padres, Patricia y Hermes.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a todos los que ayudaron a hacer posible esta memoria. En particular agradecer a mi profesor guía don Federico Delfín por su constante apoyo y dedicación para que este trabajo fuera realizado de la mejor manera. Al mismo tiempo agradecer a los miembros de mi comisión, don David Campusano y don Miguel Figueroa por su gran interés en la presente memoria. También a IDIEM por permitirme realizar este estudio en sus laboratorios y a todas las personas que trabajan ahí y que prestaron su ayuda y tiempo para llevar este trabajo a buen término.

Quiero agradecer también a La Universidad de Chile y a todos los compañeros y profesores que mas allá de sus conocimientos quisieron compartir valores, como la ética profesional, pluralismo y la importancia de la educación pública. Espero llegue el día en que estudiar en esta universidad o en cualquier otra deje de ser un privilegio sólo para algunos y donde los que lo tengan aptitudes puedan contar con una educación pública, laica, gratuita y de calidad.

Además, quiero agradecer a todas las personas que hicieron que esta etapa universitaria fuera inolvidable, a los amigos que desde primer año han estado ahí haciendo mas llevaderas las horas de estudio y compartiendo animadamente los tiempos de ocio, especialmente a Rony, Claudio, Marcelo, Tapia, Javier, Rodrigo, a Los Locxra y a todos con los que alguna vez compartí una tarde en la terraza o algo más. Sin todos ellos esta etapa no hubiese sido la misma.

Agradezco enormemente a Belén, por ayudarme y acompañarme durante el desarrollo de este trabajo, sobretodo en los momentos más complicados su apoyo fue fundamental, agradecerle también por compartir su vida conmigo y por hacer la mía más feliz.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia, a mis tres hermanos y en especial a mi madre y a mi padre, gracias a su esfuerzo, formación, dedicación y constante apoyo tuve el privilegio de estudiar lo que quise y de desarrollarme como la persona que soy. Este logro es principalmente gracias a ellos dos, los quiero mucho.

*“Antorcha inmensa de gloria en su destino que  
alumbra siempre con fuego de campeón”*

# TABLA DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. PRESENTACIÓN DEL TEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.2.1 <i>Objetivos Generales</i> .....	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
<b>CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES.....</b>	<b>4</b>
2.1. EL CEMENTO .....	4
2.1.1 <i>Introducción</i> .....	4
2.1.2 <i>El Cemento Portland</i> .....	4
2.1.3 <i>Procesos químicos del cemento Portland</i> .....	6
2.1.4 <i>Cemento Con Adiciones Puzolánicas</i> .....	15
2.1.5 <i>Propiedades del Cemento y Características Físicas</i> .....	17
• <i>Finura</i> .....	18
• <i>Consistencia</i> .....	18
• <i>Fraguado</i> .....	18
• <i>Resistencia Mecánica</i> .....	18
• <i>Pérdida por Calcinación</i> .....	19
• <i>Peso Específico</i> .....	19
• <i>Calor de Hidratación</i> .....	19
2.1.6 <i>Cementos en Chile y Normativas Vigentes</i> .....	20
2.2. HORMIGONES MASIVOS.....	24
2.2.1 <i>Introducción</i> .....	24
2.2.2 <i>Características Generales</i> .....	25
2.2.3 <i>Medidas de Control</i> .....	28
<b>CAPÍTULO 3: FORMACIÓN DE ETRINGITA RETARDADA, DEF. ....</b>	<b>37</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	37
3.2. FORMAS DE ETRINGITA.....	37
3.3. ETRINGITA EN EL HORMIGÓN FRESCO .....	39

3.4.	FORMACIÓN DE ETRINGITA RETARDADA.....	40
3.5.	INESTABILIDAD DE LA ETRINGITA EN EL HORMIGÓN .....	41
3.6.	CONDICIONES Y CAUSAS DEL FENÓMENO DEF .....	43
3.6.1	<i>Temperatura y Condiciones de Curado.....</i>	45
3.6.2	<i>Importancia de la Humedad.....</i>	48
3.6.3	<i>Efecto de los Sulfatos y Otros Componentes del Cemento.....</i>	49
3.6.4	<i>Superficie específica del Cemento.....</i>	52
3.6.5	<i>Efectos del Tipo de Árido y Granulometría.....</i>	53
3.6.6	<i>Efecto de la Fisuras y Daños en el hormigón .....</i>	55
3.7.	MECANISMO EXPANSIVO GENERADO POR EL FENÓMENO DEF.....	56
3.7.1	<i>Teoría de Expansión por Crecimiento de Cristales Macroscópicos.....</i>	56
3.7.2	<i>Teoría de Expansión Homogénea de la Pasta de Cemento.....</i>	57
3.8.	DETECCION DEL FENOMENO.....	62
3.8.1	<i>Ensayo Duggan. ....</i>	63
<b>CAPÍTULO 4: PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL .....</b>		<b>66</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN .....	66
4.2.	PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	66
4.3.	VARIABLES DE ESTUDIO.....	67
4.4.	MATERIAS PRIMAS .....	67
4.4.1	<i>Cemento.....</i>	67
4.4.2	<i>Áridos .....</i>	68
4.4.3	<i>Mezclas e Identificación de las Muestras.....</i>	68
4.4.4	<i>Estimación de Materiales.....</i>	71
4.5.	CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS .....	71
4.6.	CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES .....	71
4.7.	CARACTERIZACIÓN DE LOS ARIDOS.....	71
4.8.	ENSAYO DE EXPANSIVIDAD .....	72
4.8.1	<i>Preparación de Probetas.....</i>	72
4.8.2	<i>Tratamiento Térmico.....</i>	72
4.8.3	<i>Ciclos de Humedecimiento y Secado.....</i>	73

4.8.4	<i>Medición y Almacenamiento</i> .....	74
4.9.	ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA .....	74
4.9.1	<i>Preparación de Mezclas y Confección de Probetas</i> .....	75
4.9.2	<i>Ciclos de Temperatura y Ensayos de Compresión</i> .....	75
<b>CAPÍTULO 5: DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL .....</b>		<b>77</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN .....	77
5.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	77
5.2.1	<i>Cementos</i> .....	77
5.2.1	<i>Áridos</i> .....	80
5.2.2	<i>Agua de Amasado</i> .....	82
5.3.	ENSAYO DE EXPANSIVIDAD .....	82
5.3.1	<i>Dosificación de Materiales</i> .....	82
5.3.1	<i>Confección de las Mezclas</i> .....	83
5.3.2	<i>Preparación de las Probetas</i> .....	84
5.3.3	<i>Tratamiento de Curado Acelerado a Alta Temperatura</i> .....	86
5.3.4	<i>Ciclos de Humedecimiento y Secado</i> .....	89
5.3.5	<i>Medición de Expansiones y Almacenamiento</i> .....	91
5.3.1	<i>Análisis por Difracción de Rayos X a los morteros ensayados</i> .....	93
5.4.	ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA.....	94
5.4.1	<i>Dosificación de Materiales</i> .....	94
5.4.2	<i>Confección de las Mezclas</i> .....	96
5.4.3	<i>Caracterización del Hormigón Fresco</i> .....	98
5.4.4	<i>Preparación de las Probetas</i> .....	99
5.4.5	<i>Tratamiento Térmico</i> .....	100
5.4.6	<i>Ensayos de Compresión</i> .....	101
<b>CAPÍTULO 6: RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>		<b>102</b>
6.1.	INTRODUCCIÓN .....	102
6.2.	ENSAYO DE EXPANSIVIDAD.....	102
6.2.1	<i>Ensayo de Expansividad Serie: C1-E</i> .....	102
6.2.2	<i>Ensayo de Expansividad Serie: C1-C (Control)</i> .....	103
6.2.3	<i>Ensayo de Expansividad Serie: C2-E</i> .....	104

6.2.4	<i>Ensayo de Expansividad Serie: C2-C (Control)</i> .....	105
6.2.5	<i>Ensayo de Expansividad Serie: C3-E</i> .....	106
6.2.6	<i>Ensayo de Expansividad Serie: C3-C (Control)</i> .....	107
<b>6.3.</b>	<b>DIFRACTOMETRÍA DE RAYOS X</b> .....	<b>108</b>
6.3.1	<i>Diffractometría de Rayos X Serie: C1-E</i> .....	109
6.3.2	<i>Diffractometría de Rayos X Serie: C1-C</i> .....	109
6.3.3	<i>Diffractometría de Rayos X Serie: C2-E</i> .....	110
6.3.4	<i>Diffractometría de Rayos X Serie: C2-C</i> .....	111
6.3.5	<i>Diffractometría de Rayos X Serie: C3-E</i> .....	111
6.3.6	<i>Diffractometría de Rayos X Serie: C3-C</i> .....	112
<b>6.4.</b>	<b>ENSAYOS AL HORMIGÓN FRESCO</b> .....	<b>112</b>
6.4.1	<i>Ensayos Hormigón Fresco Serie C1.</i> ....	112
6.4.2	<i>Ensayos Hormigón Fresco Serie C2.</i> ....	113
6.4.3	<i>Ensayos Hormigón Fresco Serie C3.</i> ....	113
<b>6.5.</b>	<b>ENSAYOS DE COMPRESIÓN</b> .....	<b>114</b>
6.5.1	<i>Ensayos de Compresión Serie C1-E-3</i> .....	114
6.5.2	<i>Ensayos de Compresión Serie C1-E-6</i> .....	114
6.5.3	<i>Ensayos de Compresión Serie C1-C (Control)</i> .....	115
6.5.4	<i>Ensayos de Compresión Serie C2-E-3</i> .....	115
6.5.5	<i>Ensayos de Compresión Serie C2-E-6</i> .....	116
6.5.6	<i>Ensayos de Compresión Serie C2-C (Control)</i> .....	116
6.5.7	<i>Ensayos de Compresión Serie C3-E-3</i> .....	116
6.5.8	<i>Ensayos de Compresión Serie C3-E-6</i> .....	117
6.5.9	<i>Ensayos de Compresión Serie C3-C</i> .....	117
<b>CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b> .....		<b>118</b>
<b>7.1.</b>	<b>PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS CEMENTOS.</b> .....	<b>118</b>
7.1.1	<i>Peso Específico</i> .....	118
7.1.2	<i>Superficie Específica.</i> .....	119
7.1.3	<i>Tiempos de Fraguado</i> .....	120
7.1.4	<i>Consistencia Normal.</i> .....	121
<b>7.2.</b>	<b>PROPIEDADES MECANICAS</b> .....	<b>121</b>



7.2.1	<i>Resistencia a la Compresión de Mortero.</i>	121
7.3.	PROPIEDADES QUÍMICAS.	122
7.3.1	<i>Perdida por Calcinación.</i>	123
7.3.2	<i>Residuo Insoluble.</i>	124
7.3.3	<i>Trióxido de Azufre.</i>	125
7.3.4	<i>Oxido de Magnesio.</i>	126
7.3.5	<i>Álcalis Totales.</i>	126
7.3.6	<i>Óxidos Fundamentales.</i>	127
7.4.	ENSAYO DE EXPANSIVIDAD.	130
7.4.1	<i>Expansividad en Elementos de Control.</i>	130
7.4.2	<i>Expansividad en Elementos de Ensayo.</i>	131
7.4.3	<i>Comparación entre Elementos de Control y de Ensayo.</i>	133
7.4.4	<i>Expansividad Corregida en los Elementos de Ensayo.</i>	136
7.4.5	<i>Análisis por Difractometría de Rayos X.</i>	146
7.5.	ENSAYO DE RESISTENCIA.	148
<b>CAPÍTULO 8: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b>		<b>152</b>
<b>CAPÍTULO 9: BIBLOGRAFÍA</b>		<b>157</b>
<b>CAPÍTULO 10: ANEXOS</b>		<b>164</b>
ANEXO A. CERTIFICADOS DE ENSAYOS CEMENTOS		164
A.	1. CEMENTO MELÓN SÚPER	164
A.	2. CEMENTO MELÓN EXTRA	166
	3. CEMENTO MELÓN ESPECIAL	168
ANEXO B. CERTIFICADOS DE ENSAYOS ARIDOS		170
A.	1. GRAVILLA	170
B.	2. ARENA	172
ANEXO C. PATRON DIFRACTOGRAMA ETRINGITA		174
ANEXO D. DETALLE DIFRACTOGRAMAS DE RAYOS X		177
D.	1. DIFRACTOGRMA SERIE C1-E	177
D.	2. DIFRACTOGRMA SERIE C1-C	180
D.	3. DIFRACTOGRMA SERIE C2-E	183
D.	4. DIFRACTOGRMA SERIE C2-C	186

D.	5. DIFRACTOGRMA SERIE C3-E.....	189
D.	6. DIFRACTOGRMA SERIE C3-C .....	192

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1. PRESENTACIÓN DEL TEMA

El hormigón se caracteriza por presentar una baja conductividad térmica por lo que, en grandes volúmenes, el calor de hidratación generado se disipa muy lentamente, con la consiguiente elevación de temperatura en la masa de hormigón. Cuando estas temperaturas internas superan los 70° C, en las primeras horas luego de su colocación, puede inducirse un fenómeno de disolución de la etringita (sulfoaluminato cálcico hidratado) que se incorporan a las fases mayoritarias (silicato dicálcico y silicato tricálcico); posteriormente, en el hormigón endurecido, en presencia de humedad, el proceso anterior puede revertirse dando origen a una recristalización de la etringita que genera presiones internas, este fenómeno es conocido como formación retardada de etringita (DEF), el cual puede causar expansión interna y agrietamiento del hormigón, disminuyendo su resistencia y pudiendo no ser evidente hasta varios años luego del vaciado.

En el presente trabajo de título se desarrollará un estudio experimental, con el objetivo de verificar el comportamiento de hormigones sometidos a condiciones en que se alcanzan temperaturas internas por sobre los 70°C en probetas de hormigón, como es el caso de hormigones en grandes masas. Particularmente interesa conocer la influencia de los distintos tipos de cementos utilizados en Chile y sus respectivas adiciones, sobre los efectos expansivos generados por la formación de etringita tardía en el hormigón endurecido.

La metodología a utilizar para evaluar ese comportamiento, estará basada en la desarrollada por Ross Duggan. Este ensayo consiste en la medición de las variaciones longitudinales de probetas de hormigón luego de ser sometidas a varios ciclos térmicos, reproduciendo en forma acelerada el fenómeno expansivo que se origina en un curado a altas temperaturas, obteniéndose resultados a los 21 días, estos resultados pueden ser indicativos de un comportamiento potencialmente expansivo de origen químico. Los resultados de las pruebas están destinados a dar una medida de la susceptibilidad del hormigón frente a este fenómeno expansivo. Este método no se encuentra normalizado, por lo que también interesa aumentar la experiencia evaluando distintos hormigones, para poder adoptarlo como método estándar de control de hormigones para obras masivas.

La principal motivación de este trabajo de título es la mayor utilización de hormigones con alta dosificaciones de cemento en obras masivas, construidas últimamente en el país, como fundaciones, represas, grandes construcciones mineras, etc. En estos casos se han registrado altas temperaturas internas por efecto del calor de hidratación,

alcanzando niveles por sobre los 70° C y hasta casi los 100° C, y dadas las propiedades térmica del hormigón, estas temperaturas se disipan muy lentamente.

La formación tardía de etringita se genera debido a que las altas temperaturas, durante la etapa inicial del proceso de hidratación, descomponen cualquier etringita formada inicialmente y retiene fuertemente el sulfato, impidiendo la formación normal de etringita. Lugo, en etapas posteriores, el sulfato se libera reaccionando y formando etringita en el hormigón frío y endurecido, meses o años después. Si no hay suficientes vacíos para acomodar la etringita tardía puede ocurrir aumento de deformaciones volumétricas, expansión y agrietamiento, estos resultados inciden directamente sobre la durabilidad del hormigón lo que resulta en costosos sistemas de mantención y de reemplazo.

Las grandes obras, donde se alcanzan temperaturas internas por sobre los 70° C, obliga a adoptar costosas medidas durante el proceso de construcción que aseguren la ausencia del fenómeno expansivo, sin embargo se sabe que este fenómeno es propio de hormigones confeccionados con cementos Portland, dadas sus características químicas, y el hecho de que las reacciones químicas durante la hidratación del cemento se modifican significativamente al existir adiciones puzolánicas, por lo que es de gran importancia conocer el real comportamiento de este tipo de cementos frente a estas condiciones, que son las que prevalecen en Chile.

El estudio aborda, por lo tanto, un problema de gran repercusión para la tecnología del hormigón aplicada a los grandes proyectos de infraestructura.

## **1.2. OBJETIVOS**

### ***1.2.1 Objetivos Generales***

- Comprobar la hipótesis sobre el efecto inhibitor del fenómeno DEF, de las adiciones incorporadas a los cementos chilenos, que permitirían reducir las restricciones de temperatura máximas actualmente impuestas a los hormigones masivos.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Conocer cuáles son los factores determinantes que influyen en la expansividad originada por el fenómeno DEF en el hormigón endurecido.
- Aumentar la experiencia en el método propuesto por Ross Duggan, para comprobar el potencial expansivo por ataque de sulfatos en hormigones con altas temperaturas de curado.
- Conocer de que manera influyen temperaturas por sobre los 80°C durante el curado del hormigón en su resistencia a la compresión a los 28 días.

# CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

## 2.1. EL CEMENTO

### 2.1.1 *Introducción*

El cemento es un material inorgánico pulverizado finamente de color gris. Ya sea solo o mezclado con arena, grava u otro material similar al agregarle agua tiene la propiedad de formar una pasta aglomerante que endurece tanto al aire como dentro del agua, por esta característica es definido como cemento hidráulico. Esta propiedad del cemento ocurre en virtud de las reacciones químicas durante su hidratación, las cuales le permiten conservar su resistencia y estabilidad una vez endurecido. Cuando el cemento es mezclado con agua y arena se denomina mortero, mientras que cuando es mezclado con arena además de grava y/o gravilla se denomina hormigón.

Según la norma chilena NCh 148, el cemento es definido como un material pulverizado que por la adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire.

Los principales componentes del cemento son la caliza (cal) y la sílice. Estos componentes son mezclados en proporciones adecuadas y sometidos a un proceso de clinkerización en un horno rotatorio a temperaturas por sobre los  $1400^{\circ}\text{C}$  a partir de lo cual se obtiene un producto denominado clínquer el cual es luego sometido a una molienda mediante molinos de bola, junto a ciertas cantidades de yeso, con intención de retrasar el proceso de fraguado, este proceso se realiza hasta obtener un polvo finísimo ( $<100$  micrones) dando origen al denominado cemento Portland. Este tipo de cemento es el más importante, no sólo por ser el más producido en el mundo, sino también por ser la base de fabricación de todos los demás cementos, llamados cementos con adiciones (puzolánicos, siderúrgicos, etc.) los cuales son los más utilizados en Chile.

### 2.1.2 *El Cemento Portland*

La norma chilena NCh 148, define al cemento Portland como el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer, yeso y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3% en peso del cemento.

Como se menciona anteriormente, el papel del yeso es regular el proceso de fraguado, pues en caso de no ser incluido provocaría un endurecimiento casi instantáneo. Por otra parte el proceso de fusión para la formación del clínquer da lugar a la obtención de compuestos que incluyen principalmente, los óxidos de calcio ( $\text{CaO}$ ) y silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y en menor medida óxidos de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

**Tabla 2.1. Composición Química Media Cemento Portland**

<b>Elemento</b>	<b>Contenido (%)</b>
CaO	60-70
SiO <sub>2</sub>	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5-6
MgO	0,1-4,0
SO <sub>3</sub>	1-3
Álcalis	0,2-1,3
Pérdida por calcinación	0,6-2
Residuo insoluble	0,008-0,02

Estos óxidos no se encuentran libres, sino que combinados en virtud de las reacciones químicas ocurridas durante el proceso de fusión. Los cuatro óxidos principales forman los cuatro compuestos mineralógicos del cemento portland, los cuales son responsables de las propiedades características de la mezcla final.

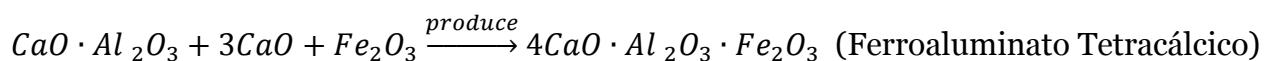
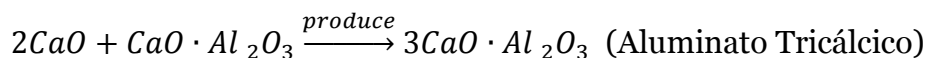
**Tabla 2.2. Fases Mineralógicas del Cemento y composición típica.**

<b>Compuesto</b>	<b>Mineral</b>	<b>Abreviación</b>	<b>Composición en %</b>			
			<b>CaO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
Silicato Tricálcico (3 CaO SiO <sub>2</sub> )	Alita	C <sub>3</sub> S	73.7	26.3	-	-
Silicato Dicálcico (2 CaO SiO <sub>2</sub> )	Belita	C <sub>2</sub> S	65.1	34.9	-	-
Aluminato Tricálcico (3 CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Celita	C <sub>3</sub> A	62.3	-	37.7	-
Ferroaluminato Tetracálcico (4 CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Ferrita	C <sub>4</sub> AF	46.1	-	21.0	32.9

Las reacciones se ilustran en la siguiente ecuación, en ella se muestran los cuatro componentes principales del cemento en forma de productos de reacción.

**Ecuación 2.1 Fases mineralógicas cemento Portland**





Estos cuatro compuestos representan más del 90% del peso del cemento y cada uno de ellos aporta características distintas a la mezcla final según el papel que toman durante el proceso de hidratación del cemento. Estos compuestos se pueden encontrar en distintas cantidades definiéndose de esta forma distintos tipos de cemento con características particulares. Las propiedades generales de cada uno de estos compuestos se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 2.3. Contribución de los compuestos principales en el proceso de hidratación.**

<b>Parámetro</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>
Velocidad de reacción	Media	Lenta	Rápida	Lenta
Calor liberado	Medio	Poco	Mucho	Poco
Valor aglomerante Inicial	Bueno	Pobre	Bueno	Pobre
Valor aglomerante Final	Bueno	Bueno	Pobre	Pobre
Reacción con sulfato	No	No	Sí	No

Por otra parte los demás óxidos, como el óxido de magnesio (MgO) y trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>), pueden provocar expansiones diferidas generando agrietamiento en el hormigón, es por esta razón que en las normas se limita el contenido máximo. En el mismo sentido, las álcalis presentes pueden reaccionar con ciertos áridos provocando expansiones y agrietamiento, reacciones denominadas álcali-árido las cuales dan origen a fallas de agrietamiento.

### **2.1.3 Procesos químicos del cemento Portland**

Los procesos químicos que experimenta el hormigón durante su fabricación y estado fresco, incluyen los procesos de hidratación, fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento.



### 2.1.3.1 Hidratación del Cemento

Al agregarle agua al cemento Portland, los compuestos básicos presentes, correspondientes a silicatos y aluminatos de calcio, forman productos de hidratación, los cuales son los responsables de que la pasta de cemento se transforme en una masa firme y resistente similar a una roca. La hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua. Las partículas de cemento en la solución acuosa tienen un aumento de su superficie y gradualmente se extienden hasta enlazarse con el aumento de otras partículas de cemento o hasta que adhiera a las sustancias adyacentes. Esto trae como resultado la rigidización, endurecimiento y desarrollo de resistencia. El proceso de hidratación continúa mientras se disponga de espacio para los productos de hidratación y mientras se disponga de condiciones favorables de humedad y temperatura. A medida que avanza el proceso de hidratación, el hormigón se vuelve más duro y más resistente.

Para la exposición de las reacciones químicas que ocurren durante la hidratación del cemento Portland, se utilizarán las siguientes abreviaturas, nomenclatura utilizada normalmente en la química del cemento.

**Tabla 2.4. Abreviatura Elementos.**

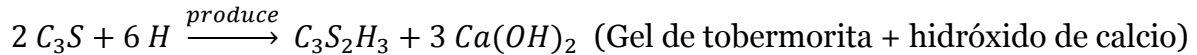
<b>Elemento</b>	<b>Abreviatura</b>
CaO	C
SiO <sub>2</sub>	S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
SO <sub>3</sub>	$\bar{S}$
H <sub>2</sub> O	H

- Hidratación de los Silicatos

Los silicatos de calcio presentes en el cemento (silicato tricálcico y silicato dicálcico) constituyen alrededor del 75% del peso del cemento portland. Las reacciones de hidratación en las que participan estos dos compuestos son las más importantes, pues a partir de estas se produce el principal compuesto de la pasta de cemento endurecida, que es considerado como el corazón del cemento, este compuesto es disilicato tricálcico hidratado conocido como Gel de Tobermorita o gel CSH. A pesar de tratarse de compuestos diferentes, las reacciones de hidratación de estos silicatos producen los mismos compuestos, sin embargo, estas reacciones se desarrollan de manera distinta de acuerdo a las propiedades particulares del silicato que reacciona. Los productos que se generan fuera de la frontera del grano de cemento son considerados productos externos, mientras que los que se forman dentro son considerados productos internos.

- Hidratación del Silicato Tricálcico ( $C_3S$ ).

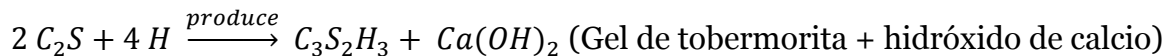
**Ecuación 2.2 Hidratación del Silicato Tricálcico**



El silicato tricálcico ( $C_3S$ ) reacciona primero. Este compuesto es el que produce el desarrollo de resistencia del cemento Portland durante las primeras semanas. En pocas horas pasa del fraguado inicial al final. La reacción que involucra a este compuesto es exotérmica desprendiendo una gran cantidad de calor de hidratación el cual tiene directa relación con el corto tiempo de fraguado. La mayor parte de la resistencia de este compuesto hidratado se alcanza a los 7 días de su fabricación.

- Hidratación del Silicato Dicálcico ( $C_2S$ ).

**Ecuación 2.3 Hidratación del Silicato Dicálcico**



El  $C_2S$  se encuentra de tres formas distintas denominadas alfa, beta y gama, dentro de estas sólo el  $C_2S$  beta es importante en el cemento Portland. La reacción del  $C_2S$  ocurre más lentamente y requiere de algunos días para fraguar, este compuesto es la causa principal de la resistencia mecánica a mediano y largo plazo. El calor de hidratación liberado durante la hidratación es bajo, dado su lentitud de desarrollo. Las resistencias que alcanza el  $C_2S$  en las primeras edades son menores a las alcanzadas por el  $C_3S$ , sin embargo esta aumenta paulatinamente hasta alcanzar resistencias similares después de unos tres meses desde su fabricación.

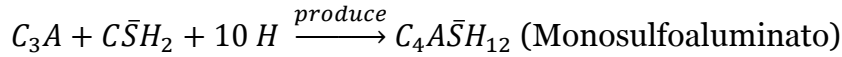
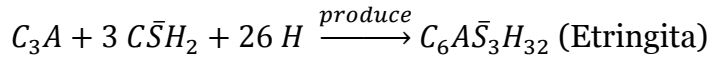
- Hidratación de los Aluminatos

El aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y el Ferroaluminato Tetracálcico ( $C_4AF$ ) corresponden a los aluminatos presentes en el clínquer, estos se encuentran en menores proporciones que los silicatos y corresponden a las reacciones más relevantes después de estos. Estos compuestos actúan, durante la fabricación del cemento, como fundentes logrando reducir la temperatura de cocción del clínquer y facilitando la combinación de sílice y cal.

El  $C_3A$  reacciona casi de inmediato al contacto con el agua, por esta razón se adiciona yeso, el cual retarda la reacción. La combinación de este compuesto con agua y yeso da como resultado la formación de etringita y monosulfoaluminato. Por otra parte los productos de la reacción del ferroaluminato Tetracálcico ( $C_4AF$ ) tienen estructuras similares a las producidas por el aluminato tricálcico ( $C_3A$ ).

- Hidratación del Aluminato Tricálcico (C<sub>3</sub>A)

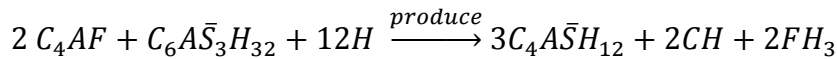
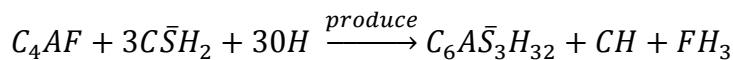
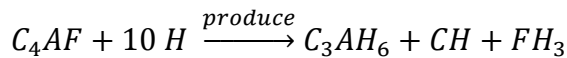
**Ecuación 2.4 Hidratación del Aluminato Tricálcico.**



El aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) es el causante primario del fraguado inicial del cemento Portland y al ser una reacción rápida desprende un alto calor de hidratación. Su aporte a la resistencia del hormigón es baja sin embargo su efecto viene dado por su contribución a la rapidez del fraguado. Un aumento en la cantidad de este componente trae como consecuencia una disminución a la resistencia al ataque de sulfatos.

- Hidratación del Ferroaluminato Tetracálcico (C<sub>4</sub>AF)

**Ecuación 2.5. Hidratación del Ferroaluminato Tetracálcico.**



El Ferroaluminato Tetracálcico (C<sub>4</sub>AF), se comporta de forma similar al aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), se hidrata rápidamente y genera baja resistencia, sin embargo este no participa en el proceso de fraguado como el aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A).

- Etapas de la Hidratación de la Pasta de Cemento.

El proceso de hidratación de la pasta de cemento presentado anteriormente, se puede dividir básicamente en tres partes de acuerdo al momento en que ocurren.

**Fase Inicial:** : Esta etapa comienza luego de 10 minutos de haber realizado la mezcla de cemento con agua y ya es posible observar cantidades de gel alrededor de las partículas de cemento aún no hidratados junto con láminas pequeñas y delgadas de Gel de Tobermorita (CSH). Alrededor de una hora después de realizada la mezcla, el gel ya tiene un espesor de 1 μm y pequeños bastones de etringita empiezan a nuclear en la superficie del gel. En esta etapa aún no aparecen fuerzas de atracción ente las partículas.

**Fase Intermedia:** En esta etapa comienza el endurecimiento de la pasta de cemento y se caracteriza por la hidratación de entre el 30% y 40% del Silicato Tricálcico (C<sub>3</sub>S). Luego de 3 a 5 horas de realizada la mezcla, se aprecia cierta cohesión en la pasta de cemento.

Mientras que entre las 5 y 10 horas desde el momento de la mezcla, la hidratación del Silicato Tricálcico (C3S) genera productos externos de Gel de Tobermorita (CSH) que forman una cubierta sobre la red de bastones de etringita que se han formado.

Fase Final: Luego de 24 horas de realizada la mezcla, el Silicato Tricálcico (C3S) sigue con sus reacciones de hidratación generando productos internos. Mientras los granos hidratados se superponen entre sí, la resistencia y el modulo elástico van en aumento. En esta fase la gran mayoría de los pequeños granos de cemento ya se han hidratado completamente. Luego de 48 horas de realizada la mezcla, el espacio que originalmente era ocupado por el agua ahora es ocupado por productos resultantes de la hidratación. Los productos externos se vuelven más densos y fibrosos. El esqueleto básico se forma entre los 7 y 28 días desde realizada la mezcla.

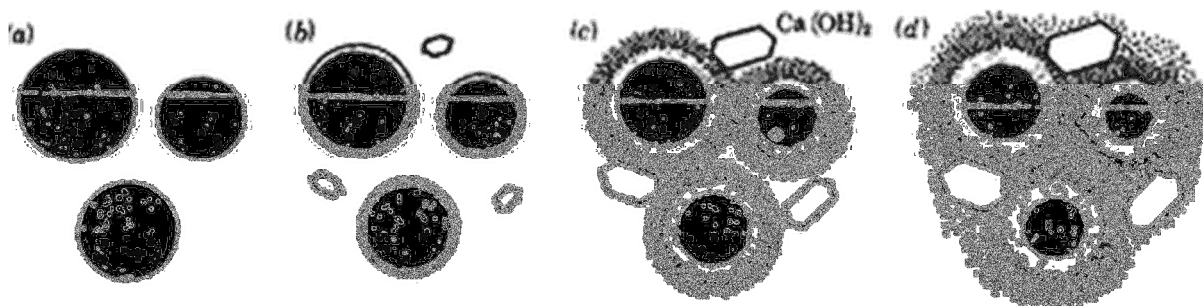


Figura 2.1 Etapas de la hidratación del cemento.

a) Partículas de cemento en agua. b) Formación de Gel de Tobermorita (CSH). c) Crecimiento del Gel de Tobermorita (CSH) alrededor de las partículas de cemento. d) Gel de Tobermorita (CSH) completamente crecido y Portlandita (Fuente: Shanique 2009).

(Neville. 1975, PCA. 1997, Puertas. 1989).

### 2.1.3.2 Microestructura del Hormigón Durante la Hidratación del Cemento

El hormigón es el material que resulta de la mezcla del cemento, agua y agregados pétreos, que pueden ser grava, gravilla y arena, mientras que la mezcla de cemento y arena recibe el nombre de mortero. El hormigón posee una composición heterogénea que presenta básicamente 3 grandes fases en su composición.

- **Matriz de pasta de cemento.**

Ésta se compone básicamente de una fase sólida que contiene principalmente silicato de calcio hidratado en forma de gel, conocido también como gel de Tobermorita o gel CSH además de otros compuestos como hidróxido de calcio o Portlandita ; sulfoaluminatos cálcicos y algunos granos de cemento sin hidratar. La matriz de cemento está formada además por poros o vacíos de aire, además de agua.

- **Áridos.**

Es la fase que ocupa la mayor cantidad de volumen entre los materiales que componen el hormigón, alcanzado hasta casi un 80% del volumen. Este material contribuye en la durabilidad del hormigón, en su resistencia, resistencia a la abrasión, etc. El uso de este material contribuye a disminuir fuertemente los costos asociados a la confección del hormigón.

- **Zonas interfaciales.**

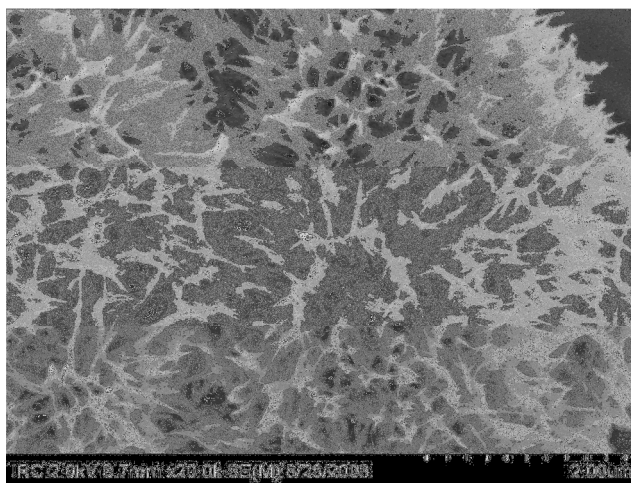
Corresponde a parte de la matriz de pasta de cemento hidratada que se encuentra en la superficie de los áridos y tiene un espesor sobre el árido de entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ . Esta zona es la parte de mayor debilidad y condiciona fuertemente la durabilidad y la resistencia del hormigón. La naturaleza de esta zona interfacial es variable y dependerá del tipo de cemento, tipo de árido, condiciones de la mezcla, condiciones de curado, etc.

### 2.1.3.3 Microestructura de la Matriz de Pasta de Cemento

Como ya se mencionó, la matriz de la pasta de cemento está formada por fases sólidas tanto cristalinas como micro cristalinas, producto de la hidratación, además de agua y vacíos de aire. Cada uno de estos componentes juega un papel en el comportamiento final de la mezcla.

- **Disilicato tricálcico o Gel de Tobermorita (CSH)**

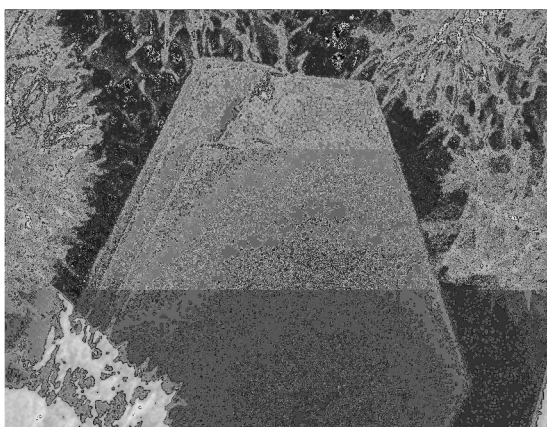
Representa entre un 50% y un 60% de los sólidos presentes en la pasta de cemento. Este componente es la principal fuente de resistencia en la matriz de pasta de cemento ya hidratada y endurecida. Su estructura es amorfa y presenta una gran superficie específica del orden de 100 a 700  $\text{m}^2/\text{g}$  lo que se traduce en una gran fuerza de enlace entre las partículas.



**Figura 2.2 Gel de Tobermorita (CSH) (Fuente: Stark et al. 1999)**

- Hidróxido de Calcio o Portlandita (CH)

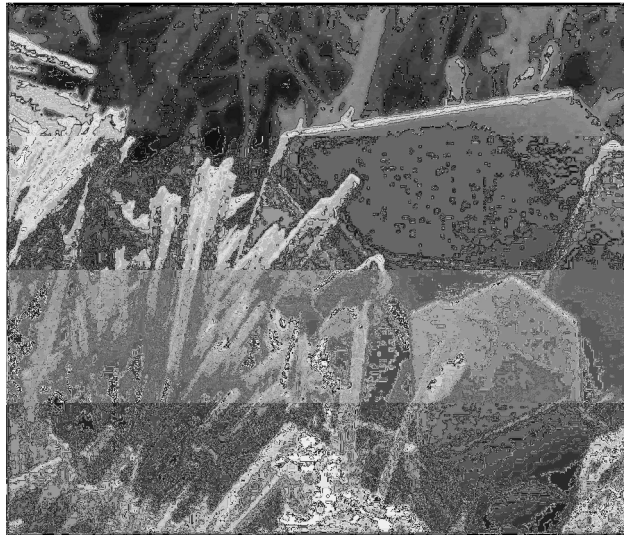
Su morfología varía desde grandes prismas hexagonales hasta pequeños cristales alargados. Su tamaño dependerá de la cantidad de espacio disponible y en general ocupa desde un 20% a un 25% del volumen de la pasta de cemento endurecida. Su superficie específica es baja, del orden de  $0,5 \text{ m}^2/\text{g}$  por lo que presenta fuerzas de enlaces menores que las del Gel de Tobermorita (CSH) y por lo tanto su contribución a la resistencia de la pasta es mucho menor. Este producto, dada su condición básica, eleva el pH de la pasta de cemento hidratada lo que contribuye a la pasivación del acero en el hormigón armado, aumentando su resistencia a la corrosión electroquímica. Aspectos negativos de este producto son su alta solubilidad en agua, lo que incrementa la porosidad de la pasta bajando su resistencia.



**Figura 2.3 Cristal de Portlandita. (Fuente: Stark et al. 1999)**

- Etringita (AFt) y Monosulfoaluminato (AFm)

Durante las etapas de hidratación de los aluminatos en una primera etapa se genera etringita o fase AFt. Esta fase se caracteriza por crecer en forma de agujas mientras se va consumiendo el yeso. En la segunda etapa, los aluminatos reaccionan con la etringita formando la fase AFm denominada monosulfoaluminato, esta fase se caracteriza por sus formas hexagonales. Este elemento puede reaccionar con los sulfatos presentes generando nuevamente etringita incrementando el volumen y provocando fisuración. Estos productos se alojan en los poros del Gel de Tobermorita.



**Figura 2.4 Cristales de Etringita y Monosulfoaluminato. (Fuente: Stark et al. 1999)**

- Vacíos de Aire en la Pasta de Cemento Hidratada

En la pasta de cemento existen varios tipos de poros los cuales juegan un papel importante en las propiedades del hormigón, de acuerdo al tamaño y ubicación de estos, se pueden clasificar en tres tipos. Éstos se describen a continuación.

**Poros Interlaminares:** Corresponde al espacio que existe entre las laminas de Gel de Tobermorita (CSH), el ancho de estos espacios puede variar entre 5 y 25 Å y constituyen alrededor de un 28% del volumen del total de Gel de Tobermorita (CSH). Dado su reducido tamaño, estos poros no influyen en la resistencia ni en la permeabilidad de la pasta de cemento. Sin embargo, la eliminación del agua absorbida por estos poros puede afectar la estabilidad dimensional de la pasta.

**Poros Capilares:** Corresponde al espacio utilizado por el agua libre de la pasta de cemento. El tamaño y volumen de estos poros dependerá de la relación agua/cemento utilizada en la mezcla y del grado de hidratación del cemento. El volumen de poros

capilares se va reduciendo a medida que avanza el proceso de hidratación. El tamaño de estos poros varía entre 3  $\mu\text{m}$  y 5  $\mu\text{m}$  para relación agua/cemento del orden de 0,6 y entre 10 nm y 50 nm para relación agua/cemento del orden de 0,4. Los poros capilares con tamaños por sobre los 50 nm influyen directamente en la resistencia y permeabilidad de la pasta de cemento, mientras que los de tamaño menor a este valor influyen sólo en su estabilidad dimensional.

Poros de Aire: Corresponden a poros generalmente de forma esférica, su origen se encuentra durante el amasado de la pasta fresca. Su tamaño es variable pudiendo superar los 3 mm. Por otra parte, los poros de aire pueden ser introducidos mediante aditivos espaciales, en estos casos pueden tener tamaños de entre 20  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$ . Ambos tipos de poros de aire pueden tener efectos negativos sobre la resistencia e impermeabilidad de la pasta de cemento, sin embargo, los poros de aire introducidos mejoran notablemente el comportamiento antes ciclo de congelamiento y deshielo.

- Agua en la Pasta de Cemento Hidratada

La pasta de cemento es capaz de retener una cierta cantidad de agua, la cual se puede hallar de varias formas, de acuerdo al estado en que se encuentran.

Agua químicamente ligada: Es el agua que forma parte de los productos de hidratación. Ésta no se pierde por secado, para eliminarla es necesario descomponer químicamente los productos a los que está ligada.

Agua Interlaminar: Es el agua ligada con la estructura del Gel de Tobermorita (CSH). Algunas teorías plantean que entre dos capas de Gel de Tobermorita (CSH) existe una capa de moléculas de agua fuertemente retenida. Esta puede ser eliminada sólo con un secado muy intenso lo que resulta en una retracción considerable del Gel de Tobermorita (CSH).

Agua adsorbida: Es el agua ligada a la superficie externa del Gel de Tobermorita (CSH), puede ser eliminada mediante un secado a una humedad relativa menor al 30% resultando una retracción de la pasta de cemento.

Agua capilar: Corresponde al agua presente en los poros de tamaño mayor a 2.5 nm. La eliminación del agua presente en poros de tamaño mayor a 50 nm no altera su volumen, puesto que ésta se considera como agua libre. Sin embargo, la eliminación del agua presente en los poros de tamaño entre 2.5 nm y 50 nm, la cual se encuentra ligada por la tensión capilar, puede generar inestabilidad volumétrica en la pasta de cemento.

*(Neville. 1975, PCA. 1997, Puertas. 1989, Metha et al. 2006).*



### 2.1.4 Cemento Con Adiciones Puzolánicas

La palabra puzolana tiene su origen en la ciudad italiana de Pozzuoli, lugar en que existían tobas volcánicas a las que se restringía originalmente este nombre. Actualmente, este nombre se utiliza de forma genérica para definir ciertos materiales que poseen las siguientes características:

- Reaccionan con el hidróxido de calcio (CH) en presencia de agua.
- Capacidad de formar productos de hidratación con propiedades aglomerantes.
- Tamaño Inferior a 5 mm

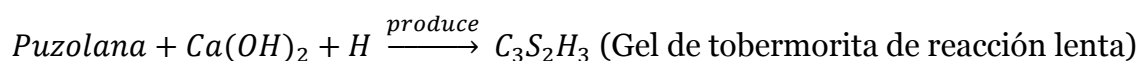
La ASTM define la puzolana como "las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos los cuales por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes".

De acuerdo al origen de esta se clasifican en naturales y artificiales. Las puzolanas naturales, son aquellas obtenidas mediante un procesamiento que incluye triturado, molido y separación en tamaños y en algunos casos un activación térmica. Este proceso se realiza con el único objetivo de obtener puzolanas. Algunos ejemplos de puzolanas naturales son: las cenizas volcánicas; tobas volcánicas; tierras de diatomeas; etc. La puzolanas artificiales son aquellas obtenidas como subproductos de procesos industriales y pueden o no requerir un procesamiento como secado o pulverizado. Algunos ejemplos de puzolanas artificiales son: Cenizas volantes; arcillas activadas térmicamente; micro sílice; cenizas de cáscara de arroz etc.

#### 2.1.4.1 Hidratación del Cemento con Adiciones Puzolánicas

Las puzolanas posee los tres compuestos químicos principales del clínker: Cal, sílice y aluminatos. La ecuación que describe el proceso de hidratación de un cemento con adiciones puzolánicas puede representarse así:

##### Ecuación 2.6. Hidratación del Cemento con Adiciones Puzolánicas



El producto obtenido de la hidratación de un cemento con adiciones puzolánicas es el mismo que se obtiene de un cemento Portland, gel de Tobermorita (CSH) e hidróxido de calcio (CH), sin embargo, el hidróxido de calcio (CH) producido se combina con el material puzolánico produciendo una mayor cantidad de gel de Tobermorita (CSH), este fenómeno entrega características especiales distintas a las de un cemento Portland puro.

## 2.1.4.2 Propiedades del Cemento con Adiciones Puzolánicas

- **Mayor resistencia a largo plazo.** Cuando el curado húmedo está disponible por periodos largos, las resistencias últimas de los cementos con adiciones moderadas de puzolana (15% a 30%) son mayores a las del cemento Portland del que estos están hechos. Este aumento de resistencia se explica, por una parte, por el refinamiento de poros dado por la formación de productos secundarios de hidratación alrededor de las partículas de puzolana que tienden a llenar los huecos capilares con un material micro poroso y de baja densidad. Y por otra parte, por la formación adicional de gel de Tobermorita (CSH). Sin embargo, a corto plazo la puzolana se comporta como un elemento inerte por lo que en esta etapa las resistencias alcanzadas son menores.

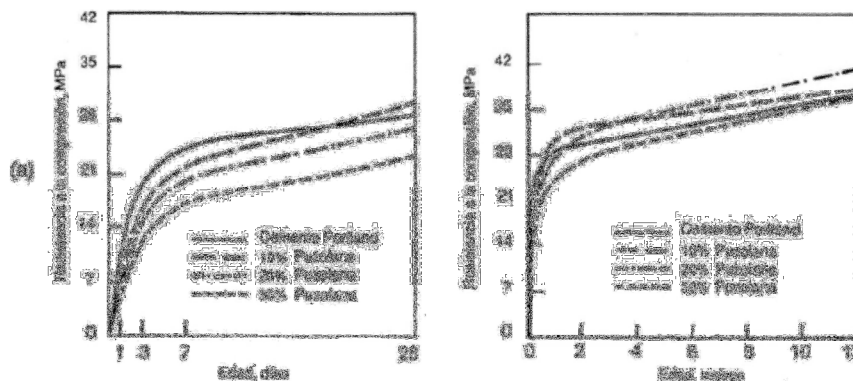


Figura 2.5 Efectos de las Adiciones Puzolánicas en la Resistencia del Hormigón.

- **Reducción del calor de hidratación.** A corto plazo, la puzolana no reacciona, comportándose como un material inerte. A mediano y largo plazo la reducción del calor es menor, puesto que intervienen sumándose el calor producto de las reacciones puzolánicas y el generando por la hidratación del cemento Portland.

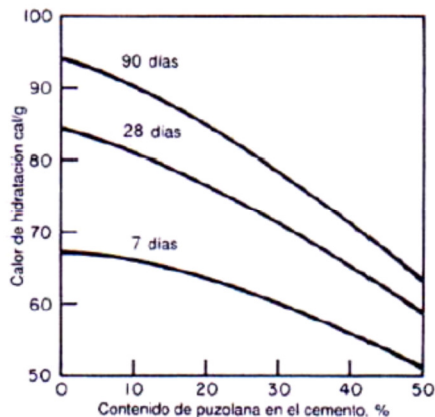


Figura 2.6 Efectos de las Adiciones Puzolánicas en el Calor de Hidratación del Cemento.

- **Reducción de la permeabilidad en el hormigón.** Este fenómeno se explica tanto por el refinamiento del tamaño de los poros, como por el refinamiento. Respecto al tamaño de grano, este proceso ocurre producto de la nucleación del hidróxido de calcio (CH) alrededor de las partículas finas de puzolana.
- **Resistencia química a los sulfatos.** Los iones de sulfato atacan al hidróxido de calcio (CH) que es vulnerable a su acción, sin embargo, la baja concentración de este elemento en estos cementos combinado con la permeabilidad desarrollada le dan características de resistencia a los sulfatos y ambientes ácidos.
- **Resistencia a la reacción álcali-árido.** Ante un potencial desarrollo de este tipo de reacciones expansivas, la finura y alta reactividad de la puzolana provoca que gran parte de la reacción se produzca de manera tan rápida y homogénea que no crea dilataciones una vez que el hormigón a fraguado y endurecido.

#### 2.1.4.3 Cementos con Adiciones Puzolánicas en Chile

En Chile, específicamente en Santiago, existen grandes yacimientos de tipo riolítico provenientes del Complejo Volcánico Maipo a partir de una erupción ocurrida hace más de 450.000 años. En las comunas de Pudahuel y Lampa existen grandes depósitos de este material. Este es el origen de la mayor parte de las puzolanas utilizadas para la fabricación de cementos en Chile.

De acuerdo a la Norma Chilena NCh 148 of 68, los cementos con adiciones puzolánicas son el producto de la molienda conjunta de clínquer, puzolana y yeso y que puede aceptar hasta un 3% en peso de sustancias que no sean perjudiciales. De acuerdo a esta misma norma, los cementos con adiciones puzolánicas se clasifican en dos tipos, de acuerdo a su contenido.

- **Cemento Portland puzolánico:** Cementos en que la proporción de puzolana no supera el 30% del peso total del cemento.
- **Cemento puzolánico:** Cementos en que la proporción de puzolana se encuentra entre un 30% y un 50% del peso total del cemento.

Estos cementos se clasifican además según su resistencia entre grado corriente y grado alta resistencia.

#### ***2.1.5 Propiedades del Cemento y Características Físicas***

Las especificaciones para los cementos limitan su composición química y sus propiedades físicas, por lo que es de gran importancia conocer el significado de alguna de estas propiedades.

- ***Finura***

La finura se define como el tamaño de las partículas que componen el cemento, se expresa en unidades de  $\text{cm}^2/\text{g}$  como superficie específica. Es la característica física principal del cemento, ya que como las reacciones de hidratación ocurren en la superficie de los granos, sucede que cuantos más pequeños son los granos, el desarrollo de la resistencia ocurre más rápido. De esta manera, un cemento de alta resistencia inicial se puede obtener sólo moliendo más finamente el mismo clínquer utilizado para un cemento normal. Este aumento de resistencia es considerable solo en etapas tempranas. Por la misma razón, el calor de hidratación generando es mayor en cementos de mayor finura. En otro sentido, un cemento más fino tendrá mayor trabajabilidad que uno de las mismas características pero con una finura menor.

- ***Consistencia***

La consistencia se refiere a la capacidad de fluir que tiene una pasta de cemento recién mezclada con agua. La consistencia normal de un cemento corresponde a un estado de fluidez alcanzado por una pasta de cemento que tiene una propiedad óptima de hidratación. La consistencia normal se expresa como un porcentaje en peso o volumen de agua en relación al peso seco del cemento.

- ***Fraguado***

Es el fenómeno que ocurre en el cual la pasta de cemento deja de ser plástica y adquiere una rigidez tal que ya no permite ser moldeado. Es importante conocer el tiempo que demora en fraguar la pasta de cemento desde el momento en que se mezcla con el agua. Interesa obtener un cemento en que el fraguado no empiece demasiado pronto ni termine demasiado tarde.

- ***Resistencia Mecánica***

Mediante un ensayo estandarizado se determina la resistencia mecánica de un mortero, tanto para la flexo tracción como a la compresión. Las resistencias que se obtienen deben cumplir con las resistencias mínimas exigidas por las normas vigentes.

- ***Pérdida por Calcinación***

Corresponde a la pérdida de peso de una muestra luego de ser calentada a temperaturas de entre 900°C Y 1000°C. Una alta perdida por calcinación indica prehidratación y carbonatación y es un indicador de una alteración en la calidad del cemento utilizado.

- ***Peso Específico***

Relaciona el peso de la muestra de cemento y su volumen absoluto. El rango normal de peso especifico para el cemento está entre 3.10 a 3.15 g/cm<sup>3</sup>. Este valor es necesario para realizar el diseño de las mezclas de hormigón y no es un indicativo de la calidad del cemento.

- ***Calor de Hidratación***

El calor de hidratación, es el calor que se genera producto de la reacción exotérmica que ocurre al mezclar cemento con agua, conocida como reacción de hidratación. El calor de hidratación generado depende principalmente de la composición química del cemento, siendo el aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) y el Silicato Tricálcico (C<sub>3</sub>S) los compuestos con mayor responsabilidad en el elevado desarrollo de calor. Otros factores que aumentan el desarrollo de calor de hidratación son:

- Una baja razón agua / cemento.
- Alta finura del las partículas de cemento.
- Alta temperatura de curado.

**Tabla 2.5. Calor de Hidratación Según la Fase Mineralógica del Cemento.**

Compound		3 days		7 days		28 days		90 days	
Actual formula	Cement notation	kJ/kg	cal/g	kJ/kg	cal/g	kJ/kg	cal/g	kJ/kg	cal/g
3CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	243±33	58±8	222±46	53±11	377±29	90±7	435±21	104±5
2CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	50±21	12±5	42±29	10±7	105±17	25±4	176±13	42±3
3CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	888±117	212±28	1557±163	372±39	1377±96	329±23	1302±71	311±17
4CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	289±113	69±27	494±155	118±37	118±37	118±22	410±67	98±16

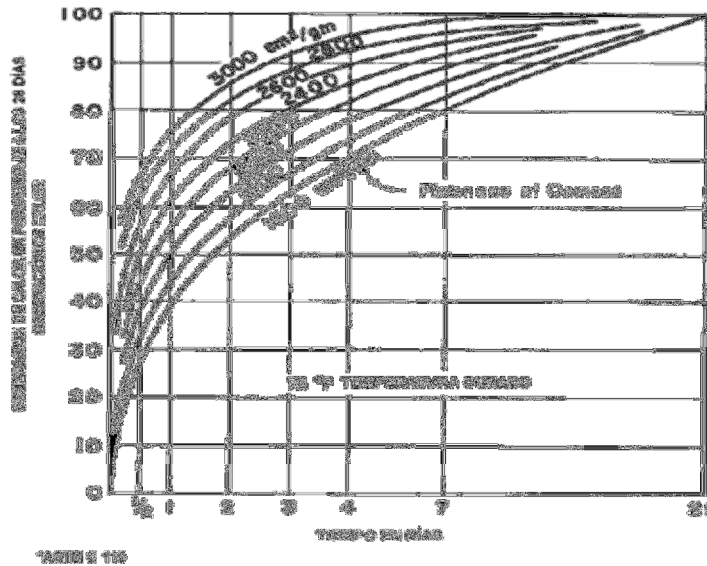


Figura 2.7 Calor de Hidratación Según Finura del Cemento. (Fuente: ASTM C 115)

En estructuras de masa considerable la disipación del calor de hidratación es un factor de gran relevancia. Si este calor no es rápidamente disipado puede provocar gradientes térmicos que generen esfuerzos indeseables debido a contracciones térmicas y a las condiciones de restricción impuestas por las estructuras. En otro sentido, una dificultad en la disipación de calor, puede generar alteraciones químicas debido a las altas temperaturas de curado que a largo plazo puede generar deterioros causados por reacciones expansivas, esta problemática se verá en detalle más adelante.

(Neville. 1975, Metha et al. 1998).

### 2.1.6 Cementos en Chile y Normativas Vigentes

De acuerdo a la Norma chilena Nch148, los cementos en Chile se clasifican por su clase y grado. De acuerdo a su clase se pueden clasificar en:

- **Cemento Portland:** es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer y yeso, con adición de hasta un 3 % de materias extrañas.
- **Cemento Portland siderúrgico:** es el cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado.
- **Cemento siderúrgico:** es el cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción comprendida entre el 30% y el 75% en peso del producto terminado.

- **Cemento Portland puzolánico:** es el cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado.
- **Cemento puzolánico:** es el cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción comprendida entre el 30% y el 50% en peso del producto terminado.
- **Cemento con fines especiales:** es el cemento en cuya composición entrarán los productos que se emplean normalmente en la fabricación de cementos, cuyos requisitos y propiedades se establecen por acuerdo previo entre productor y consumidor para cumplir determinados fines.

**Tabla 2.6. Clasificación de los Cementos Según su Composición (NCh148).**

Clase	Proporción de Componentes		
	Clinker + Yeso	Puzolana	Escoria
Portland	100%	-	-
Portland Puzolanico	≥70	≤ 30%	-
Puzolanico	50% - 70%	30% - 50%	-
Portland Siderúrgico	≥70	-	≤ 30%
Siderúrgico	25% - 70%	-	30% - 75%

Cada uno de estos cementos se clasifica según su resistencia mecánica en 2 grados:

- Grado Corriente
- Grado Alta Resistencia

Esta clasificación viene dada según sea su resistencia mecánica mínima a los 28 días.

**Tabla 2.7. Clasificación de los Cementos Según su Grado de Resistencia (NCh148).**

Grado	Resistencia Mínima a la Compresión		Resistencia Mínima a la Flexión	
	7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
Corriente	180	250	35	45
Alta Resistencia	250	350	45	55

En Chile, durante el año 2011 se tuvo una producción de más de 5 millones de toneladas de cemento. Los tres principales fabricantes de cementos en el país son las empresas Melón, Polpaico y Cementos Bío-Bío. Los cementos de mayor producción corresponden a los cementos con adiciones puzolánicas. En la siguiente tabla se presentan los

productos de mayor producción realizados por las tres principales empresas cementeras de Chile. (Fuente: ICH)

**Tabla 2.8. Principales Tipos de Cemento Producidos en Chile**

<b>Clase</b>	<b>Composición</b>	<b>Marca</b>	<b>Grado</b>
Portland	Clinker	Melón Súper	Alta Resistencia
		Polpaico Portland	Alta Resistencia
Portland Puzolánico	Clinker y hasta 30% de puzolana	Melón Extra	Alta Resistencia
		Polpaico 400	Alta Resistencia
		Inacesa Alta Resistencia	Alta Resistencia
Puzolánico	Clinker y 30% a 50% de puzolana	Melón Especial	Corriente
		Polpaico Especial	Corriente
		Inacesa Especial	Corriente
Portland Siderúrgico	Clinker y hasta 30% de escoria	Bío-Bío Alta Resistencia	Alta Resistencia
Siderúrgico	Clinker y 30% a 75% de escoria	Bío-Bío Alta Especial	Corriente

En la Norma chilena Nch148 se establecen ciertos requisitos en cuanto a la composición química de cada una de las clases de cemento anteriormente descritas, a continuación se presenta un resumen de los requisitos químicos según sea la clase del cemento.

**Tabla 2.9. Requisitos Químicos Cementos Producidos en Chile (NCh148).**

	<b>Cemento Portland</b>	<b>Cementos puzolánicos</b>		<b>Cementos siderúrgicos</b>	
		<b>Portland puzolánico</b>	<b>Puzolánico</b>	<b>Portland siderúrgico</b>	<b>Siderúrgico</b>
Pérdida por calcinación máxima (%)	3	4	5	5	5
Residuo insoluble máximo (%)	1,5	30	50	3	4
Contenido de SO <sub>3</sub> máximo (%)	4	4	4	4	4
Contenido de MgO máximo (%)	5	—	—	—	—
Contenido de Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> máximo (%)	—	—	—	2	2



Finalmente, en la Norma chilena NCh148 se establecen los valores mínimos para el tiempo de fraguado inicial y los valores máximos para el tiempo de fraguado final. Estos valores se establecen según el grado de resistencia del cemento.

**Tabla 2.10. Requisitos Tiempo de Fraguada (NCh148).**

<b>Grado</b>	<b>Tiempo de Fraguado</b>	
	<b>Inicial Mínimo (minutos)</b>	<b>Final Máximo (horas)</b>
Corriente	60	12
Alta Resistencia	45	10

Adicionalmente a los requisitos exigidos de acuerdo a la clase y grado de los cementos chilenos, se establece que los cementos portland debe tener un peso específico superior a 3,00 g/cm<sup>3</sup>.

Además de las normativas chilenas respecto a los cementos, es ampliamente aceptada la clasificación utilizada por las normativas norteamericanas. De acuerdo a la Norma ASTM C-150, los cementos Portland se clasifican en 5 tipos.

**Tabla 2.11. Clasificación del Cemento Portland De Acuerdo a la ASTM C-150.**

<b>Tipo</b>	<b>Definición</b>
Tipo I	Cemento Portland común, apto para obras que no requieren requisitos especiales.
Tipo II	Cemento Portland de moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos, con un contenido máximo de C <sub>3</sub> A de un 8%.
Tipo III	Cemento Portland de alta resistencia inicial.
Tipo IV	Cemento Portland de bajo calor de hidratación, con contenidos máximos de C <sub>3</sub> S de 35% y de C <sub>3</sub> A de un 7%.
Tipo V	Cemento Portland resistente a los sulfatos, con un contenido máximo de C <sub>3</sub> A de un 5% y la suma de C <sub>4</sub> AF+2C <sub>3</sub> A menor o igual a 20%.

De acuerdo a la Norma norteamericana ASTM C-595 los cementos con adiciones hidráulicas se clasifican en 5 tipos.

**Tabla 2.12. Clasificación del Cemento Portland De Acuerdo a la ASTM C-595.**

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Escoria</b>	<b>Puzolana</b>
SM	Portland modificado con escoria de alto horno	Hasta 25%	-
IS	Portland de escoria de alto horno	25% a 70%	-
PM	Portland modificado con puzolana	-	Hasta 15%
IP	Portland puzolánico	-	15% a 40%
P	Portland puzolánico	-	15% a 40%

## **2.2. HORMIGONES MASIVOS**

### **2.2.1 Introducción**

El Instituto Americano del Concreto (ACI) define a los hormigones masivos como: “Cualquier volumen de hormigón cuyas dimensiones son lo suficientemente grandes como para que sea necesario tomar medidas para considerar la generación de calor provocada por la hidratación del cemento y el consiguiente cambio de volumen a fin de minimizar la fisuración”. Como se puede ver, esta definición es algo vaga y no entrega dimensiones específicas ni detalles mayores, esto se debe a que factores como el diseño de mezcla, dimensiones de la estructura, forma de construcción y método de curado afectan en mayor y menor medida la ocurrencia o no de fisuración a causa del excesivo calor de hidratación. Sin embargo, distintos estudios han intentado desarrollar definiciones mas específicas basadas principalmente en sus dimensiones y cantidad de cemento en la mezcla. De esta manera, la propia ACI en su norma ACI 211.1R.91, considera que “Muchos elementos estructurales grandes pueden ser suficientemente masivos para que la generación de calor deba ser considerada, particularmente cuando la dimensión mínima de la sección transversal del elemento solido se aproxima o excede de 60 a 90 cm o cuando el contenido de cemento excede los 350 kg/m<sup>3</sup>. Por otra parte, la Norma Chilena NCh170 considera que un hormigón masivo corresponde a elementos cuya dimensión menor exceda los 0.8 m. Otras agencias consideran dimensiones menores. Se debe notar que estas definiciones no consideran el tipo de cemento a pesar de que las temperaturas internas en un elemento de hormigón masivo serán distintas si el hormigón es de rendimiento alto o de alta resistencia inicial.



**Figura 2.8. Grandes Presas: Origen de la Preocupación Temperatura-Agrietamiento**

Originalmente, la construcción de grandes presas planteó la problemática que relaciona la generación de temperatura con un posterior agrietamiento, sin embargo, actualmente se consideran elementos de hormigón de dimensiones bastante menores como pilotes, pilas de puentes, fundaciones, muros y otros elementos estructurales. Una característica común entre muchas estructuras de hormigón masivo es su contacto directo con el agua, generando un ambiente muy húmedo para el hormigón lo que trae asociado patologías particulares para este tipo de elementos. Por otra parte, grandes elementos como presas y fundaciones tienen poca o ninguna armadura debiendo resistir las cargas sólo con su forma tamaño y resistencia, por lo que el control de la fisuración es fundamental, pudiendo ocurrir esta en cualquier etapa de la vida de servicio de la estructura.

En general, las especificaciones técnicas para elementos de hormigón masivo establecen dos medias especiales con el fin de evitar la potencial fisuración:

- El gradiente térmico entre la temperatura del núcleo y la superficie no debe superar los  $20^{\circ}\text{C}$ .
- La temperatura máxima en el hormigón no debe superar los  $70^{\circ}\text{C}$

Estas especificaciones están asociadas a problemas específicos que se pueden generar bajo estas condiciones, en general lograr cumplir con estas especificaciones es difícil de materializar y de acuerdo al tipo de estructura las medidas para cumplir con las recomendaciones pueden llegar a ser muy costosas y no siempre del todo eficiente.

*(Fernández. 2009)*

### **2.2.2 Características Generales.**

Como ya se ha mencionado, la característica que distingue al hormigón masivo de otro tipo de hormigones es su comportamiento térmico. Por naturaleza, la reacción agua – cemento es exotérmica y la mayor cantidad de calor se genera en los primeros días luego de realizada la mezcla. Todos los hormigones generan calor de hidratación durante su curado, en elementos delgados como pavimentos, la energía calórica se disipa casi tan rápido como su generación, sin embargo, en elementos de gran espesor la energía

calórica no puede ser disipada rápidamente, el calor se ve atrapado y aumenta considerablemente la temperatura del hormigón. A medida que la temperatura del hormigón aumenta se provoca un aceleramiento de las reacciones de hidratación aumentando más aún la cantidad de calor de hidratación generado y por lo tanto aumentando en mayor medida la temperatura que alcanza el hormigón, resultando en una especie de círculo vicioso. La cantidad total de calor generado es limitado, por el tipo y cantidad de cemento utilizado en la mezcla, por lo que eventualmente el hormigón comienza a enfriarse hasta alcanzar la temperatura del ambiente.

Las alteraciones que genera un excesivo aumento en la temperatura del hormigón son de diversa naturaleza. Una de las principales preocupaciones relacionadas con la construcción de elementos de hormigón masivo tiene que ver con el gradiente térmico que se genera. La variación de la tasa de producción y disipación de calor provoca que en el interior del hormigón se alcancen temperaturas considerablemente superiores que en su superficie, lo que genera tensiones térmicas en el hormigón provocadas por las expansiones interiores relativas a la superficie. En estos casos el agrietamiento ocurre inmediatamente cuando las tensiones superan la resistencia admisible en el hormigón para este tipo de esfuerzos de tracción. Estos agrietamientos son conocidos como agrietamiento térmico y puede generar en el hormigón problemas relacionados principalmente con su durabilidad. La aparición de estas grietas permite el ingreso con mayor facilidad de aire y agua, lo que puede afectar tanto a la pasta de cemento como también provocar problemas de corrosión en la armadura del hormigón armado. En algunos casos, cuando el agrietamiento es especialmente severo, se puede ver afectada la capacidad estructural del hormigón. El agrietamiento térmico puede tomar distintas formas, en elementos masivos como fundaciones, éstas aparecen en forma de mapa, en muros, éstas aparecen como grietas verticales mientras que en elementos como vigas éstas se manifiestan uniformemente espaciadas perpendicularmente a la dimensión mayor del elemento. Con el fin de minimizar la ocurrencia de este tipo de patología, es que en general en las especificaciones de construcción, se establecen recomendaciones que limitan la diferencia de temperatura entre el núcleo y la superficie del elemento a un gradiente máximo de 20°C.



**Figura 2.9. Superficie de Fundación Afectada por Agrietamiento Térmico.**

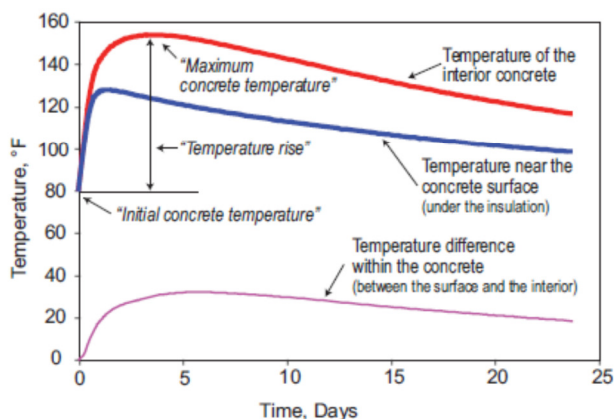
Otra de las preocupaciones principales referentes a los hormigones masivos, tiene que ver con la temperatura máxima que puede alcanzar el hormigón en su núcleo, las altas temperaturas alteran las reacciones de hidratación. De acuerdo a varios estudios se ha establecido que a temperaturas por sobre los 70°C se generan productos de hidratación inestables en algunos hormigones. Esta inestabilidad se refiere principalmente a la etringita, esto da como resultado un fenómeno denominado formación retardada de etringita (DEF por sus siglas en inglés). Cuando el fenómeno DEF ocurre en el hormigón los productos inestables de la hidratación (monosulfoaluminatos) pueden comenzar a expandirse dentro del hormigón al transformarse en etringita o sulfoaluminato cálcico hidratado y provocar fisuración. Este fenómeno se desarrolla a largo plazo y puede ocurrir después de varios años desde la construcción de la estructura. Este fenómeno puede causar severos daños en las estructuras, por esta razón es que en general establece que se deben tomar medidas especiales para que el hormigón no alcance temperaturas por sobre los 70°C, medidas que pueden llegar a ser muy costosas y no siempre eficientes. Sin embargo, estudios han demostrado que existen cementos que son inmunes a este fenómeno. Por una parte, estructuras con elemento aislados del contacto con la humedad no son susceptibles a sufrir de este fenómeno y por otra parte ciertos tipos de cementos con resistencia a los ataques químicos raramente sufren de este fenómeno. Un análisis más detallado sobre este fenómeno será desarrollado en el siguiente capítulo. Por otro lado, estudios muestran que las propiedades estructurales del hormigón (resistencia y modulo elástico) se pueden ver reducidas a temperaturas demasiado elevadas (*Kurt. 2001, Gajda 2006*).



**Figura 2.10. Superficie de Fundación Afectada por Formación Retardada de Etringita.**

Como ya se mencionó para la construcción de elementos de hormigón masivo se especifica un límite máximo para la temperatura interna del hormigón de 70°C y un gradiente térmico máximo entre el núcleo y la superficie de 20°C. Estas especificaciones requieren el desarrollo de un plan de control de temperatura que permita no superar estos límites. Estas especificaciones están basadas en literatura desactualizada, actualmente algunos hormigones toleran de mejor forma el agrietamiento térmico, ya

sea por su mayor resistencia a la tracción o por contener áridos con un bajo coeficiente de expansión térmico. Se ha sugerido que hormigones que contienen áridos provenientes de granito o piedra caliza, pueden soportar gradientes térmicos mayores a 45°C. Sin embargo, a menudo se requiere una modelación térmica que asegure el control del agrietamiento, este análisis pretende definir el gradiente máximo de temperatura que asegure no superar el límite de tensiones de tracción que es capaz de soportar el hormigón. Estos mismos análisis pueden establecer temperaturas de colocación del hormigón. Estos son utilizados cuando el potencial ahorro en costos es muy superior al valor de los análisis.



**Figura 2.11. Modelación de Evolución de la Temperatura en Elemento de Hormigón Masivo.**  
(Fuente: Gajda. 2006)

### ***2.2.3 Medidas de Control***

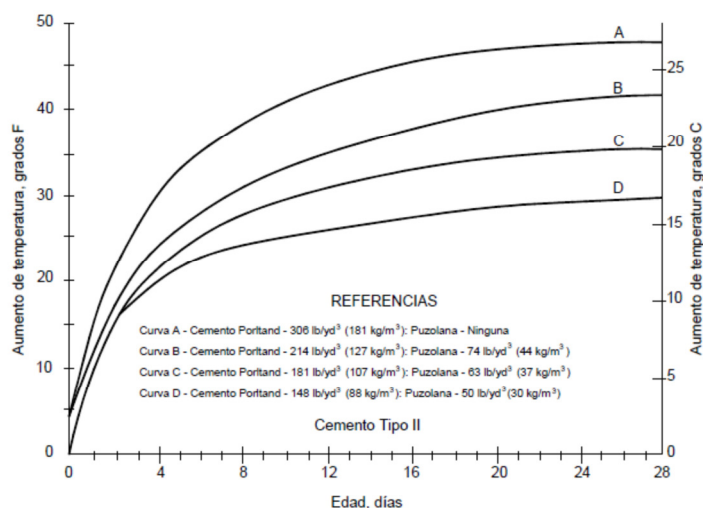
Existen básicamente dos medidas que pueden minimizar el efecto del calor de hidratación y la posterior fisuración del hormigón. La primera, consiste en modificar los materiales y dosificaciones de la mezcla con el objetivo de fabricar un hormigón con la mejor resistencia tanto a la fisuración como a las deformaciones por tracción y que al mismo tiempo no genere cantidades excesivas de calor de hidratación. La segunda medida consiste en controlar los factores que provocan la deformación. Varias son soluciones específicas que se pueden tomar en el sentido de estos dos caminos. Las soluciones más utilizadas incluyen un diseño óptimo de la mezcla, medidas de aislación, enfriamiento del hormigón previo a la colocación, enfriamiento del hormigón luego de la colocación, calentamiento de las superficies expuestas y colocación del hormigón por etapas. (Gajda. 2002, Gajda. 2006)

#### **2.2.3.1 Diseño Óptimo de la Mezcla**

El diseño de una mezcla optimizada tendiente a disminuir la generación de calor de hidratación es la manera más económica y de más fácil aplicación para disminuir los

costos asociados al control térmico. Para obtener con un diseño óptimo de mezcla en este sentido se puede tomar distintas medidas.

- **Utilizar cementos con baja generación de calor.** Cementos calcificados como tipo II, según las normativas norteamericanas, generalmente tienen una baja generación de calor de hidratación, un valor deseable en cuanto a la generación de calor es de 75 cal/g o menos a los 7 días desde su mezclado.
- **Utilizar cementos con adiciones hidráulicas como escorias o puzolanas.** El remplazo de un porcentaje de cementos por este tipo de adiciones disminuye notablemente la generación de calor, considerando que algunas adiciones de este tipo pueden llegar a generar menos de la mitad del calor de hidratación generado por un cemento sin adiciones. Por otra parte el uso de adiciones adecuadas puede aumentar la resistencia del hormigón a la fisuración. Se debe considerar en el análisis que los cementos con adiciones hidráulicas reducen la resistencia del hormigón a edades tempranas, sin embargo, éstas se equiparan y pueden ser superiores en el largo plazo.
- **Limitar contenido de Agua.** Disminuir el contenido de agua permite una reducción del contenido de cemento. Un hormigón con un menor contenido de agua y cemento sufre menos cambio de temperatura por los efectos de la hidratación además de ser más durable y resistente a la fisuración. Disminuir el contenido de agua se puede lograr utilizando vibradores adecuados que permitan utilizar hormigones de bajo asentamiento. En la practica, la mínima razón agua/cemento es del orden de los 0.35 a 0.40, para utilizar razones agua/cemento menores es necesario utilizar aditivos en la mezcla de hormigón.
- **Utilizar la menor cantidad de cemento posible en la mezcla.** Se debe considerar una dosificación de cemento total lo más bajo posible pero que sea lo suficiente para cumplir las resistencias necesarias para la edad de diseño requerida. Para hormigones normales es común diseñar las mezclas para una edad de 28 días, para hormigones masivos, en algunos casos es posible realizar diseños de mezcla considerando la resistencia más allá de los 42 días e incluso hasta 52 días. Estas acciones minimizan notablemente el calor de hidratación total generado así como también las temperaturas máximas que puede alcanzar el hormigón. Una de las desventajas de esta medida es la dificultad que se puede tener para la colocación y bombeo del hormigón.



**Figura 2.12. Evolución de temperatura para un Cemento Tipo II, para distintas dosificaciones y porcentaje de adición. (Fuente: ACI 224).**

- **Utilizar áridos bien graduados y de mayor tamaño máximo.** Los áridos de mayor tamaño permiten utilizar menos agua y menos cantidad de cemento para un volumen determinado, lo que implica una menor generación de calor. Sin embargo, áridos de menor tamaño entregan una capacidad de deformación elevada que podría contrarrestar el efecto de la mayor cantidad de cemento, por lo que se debe determinar una granulometría óptima que considere ambos fenómenos.
- **Selección de los áridos.** Los áridos que se elijan deben ser aquellos con los cuales se puede fabricar un hormigón de buenas condiciones al menor costo global posible. La roca de origen de los áridos seleccionados deberá tener un bajo coeficiente de expansión térmica y un bajo modulo de elasticidad al mismo tiempo que permita producir partículas de buena forma y textura superficial. La utilización de áridos de origen granítico, piedra caliza o basalto pueden ser utilizados para disminuir las expansiones térmicas y el potencial agrietamiento térmico.

Hay que tener en consideración que no todas estas estrategias son factible o económicamente rentables, puesto que dependen fundamentalmente de la disponibilidad de materiales y del costo de estos. En estos casos se debes escoger la mejor opción que considere los costos asociados a la mezcla y el calor de hidratación generado.

### 2.2.3.2 Aislación Térmica

Colocando un aislante térmico sobre la superficie del elemento de hormigón masivo expuesto a la intemperie se puede evitar el fisuramiento siempre que se cuente con el



suficiente aislante y que permanezca durante el tiempo necesario. El aislante actuará disminuyendo la velocidad de disipación del calor y por lo tanto disminuyendo la diferencia de temperatura entre la superficie y el interior del elemento. Si el aislante permite que se desarrolle un enfriamiento lento puede que la deformación por tracción nunca supere el límite de fisuración, otros casos hacen que esta medida no resulte práctica. Son numerosos los materiales aislantes disponibles, entre ellos se encuentran: materiales semirrígidos tipo panel; materiales de aplicación mediante pulverización; Paneles prefabricados de hormigón celular; etc.



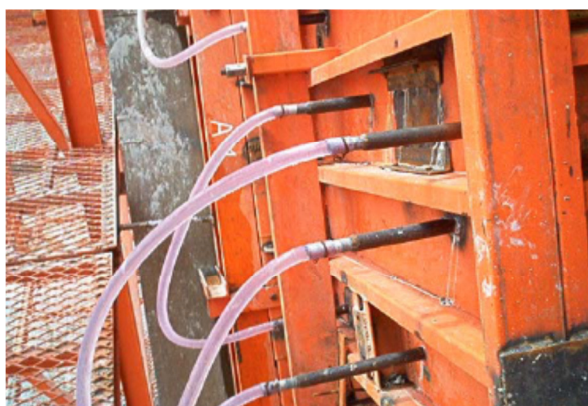
**Figura 2.13. Columna de Puente con Aislación Térmica. (Fuente: Gajda. 2006)**

### 2.2.3.3 Enfriamiento del Hormigón

Dos son las etapas en que se puede enfriar el hormigón, por una parte el enfriamiento previo del hormigón, antes de su colocación se puede lograr utilizando diferentes métodos como el uso de rociadores en los depósitos de áridos; enfriamiento de todos los materiales con nitrógeno líquido o la utilización de pequeñas partículas de hielo para reemplazar el agua de amasado. Si estas medidas no son suficientes existe la posibilidad de realizar un enfriamiento posterior del hormigón, este se logra haciendo circular un líquido frío, generalmente agua, a través de tuberías empotradas en la masa del hormigón. Una vez completado el enfriamiento, las tuberías ya no son necesarias y deben ser llenadas con una mezcla cementicia.



**Figura 2.14. Enfriamiento Previo del Hormigón con Nitrógeno Líquido. (Fuente: Gajda. 2006)**



**Figura 2.15. Enfriamiento Posterior del Hormigón Mediante Tuberías. (Fuente: Gajda. 2006)**

#### 2.2.3.4 Construcción en Etapas

Grandes secciones de hormigón, dependiendo del tipo de estructuras, pueden ser construidas en varias partes de menor espesor, esta metodología puede llegar a ser una solución efectiva para minimizar los potenciales problemas térmicos.

#### 2.2.3.5 Caso Real

A continuación se presenta un ejemplo real de la construcción de un elemento de hormigón masivo. El ejemplo corresponde a la construcción de la losa de fundación de la Torre 1 del proyecto Costanera Center. La construcción de esta torre comenzó el año 2006 y contempla 41 pisos sobre la superficie y 6 subterráneos y una superficie total de 105.000 m<sup>2</sup>. (Lagos. 2009)

Las características de la losa de fundación son las siguientes:

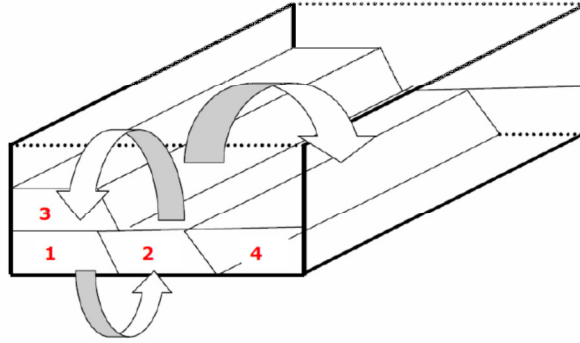
- Superficie de la losa: 57 x 36 x 3 m.
- Volumen total: 6.100 m<sup>3</sup>
- Resistencia Hormigón: H-50



**Figura 2.16. Colocación de Armadura Losa de Fundación Torre 1 Costanera Center.  
(Fuente: Lagos. 2009)**

Dentro de las principales preocupaciones para la construcción de este elemento esta el control de la temperatura. Con el objetivo de minimizar el efecto del calor generado por la hidratación del cemento se tomaron una serie de medidas de control las cuales se resumen a continuación.

- Se instaló una serie de termocuplas ubicadas en distintos sectores de la fundación tanto en la superficie como en el centro y la base de la fundación. Mediante estos sensores será posible conocer la evolución de la temperatura en los distintos sectores de la fundación.
- Se decidió realizar un hormigonado en 6 etapas, cada una de estas etapas considera un volumen de hormigón de alrededor de 1000 m<sup>3</sup>. Esta metodología permitiría la disipación del calor producto de las grandes masas de cemento hidratado.



**Figura 2.17. Metodología de Hormigonado en Etapas. (Fuente: Lagos. 2009)**

- Se cubrieron los acopios de áridos con el objetivo de protegerlos de la radiación solar directa.



**Figura 2.18. Acopio de Áridos Protegidos de la Radiación. (Fuente: Lagos. 2009)**

- Se mojaron los áridos con el objetivo de bajar la temperatura de estos mediante enfriamiento evaporativo.



**Figura 2.19. Áridos Humedecidos. (Fuente: Lagos. 2009)**

- Se agregó hielo al agua de amasado con el objetivo de disminuir la temperatura de la mezcla final.



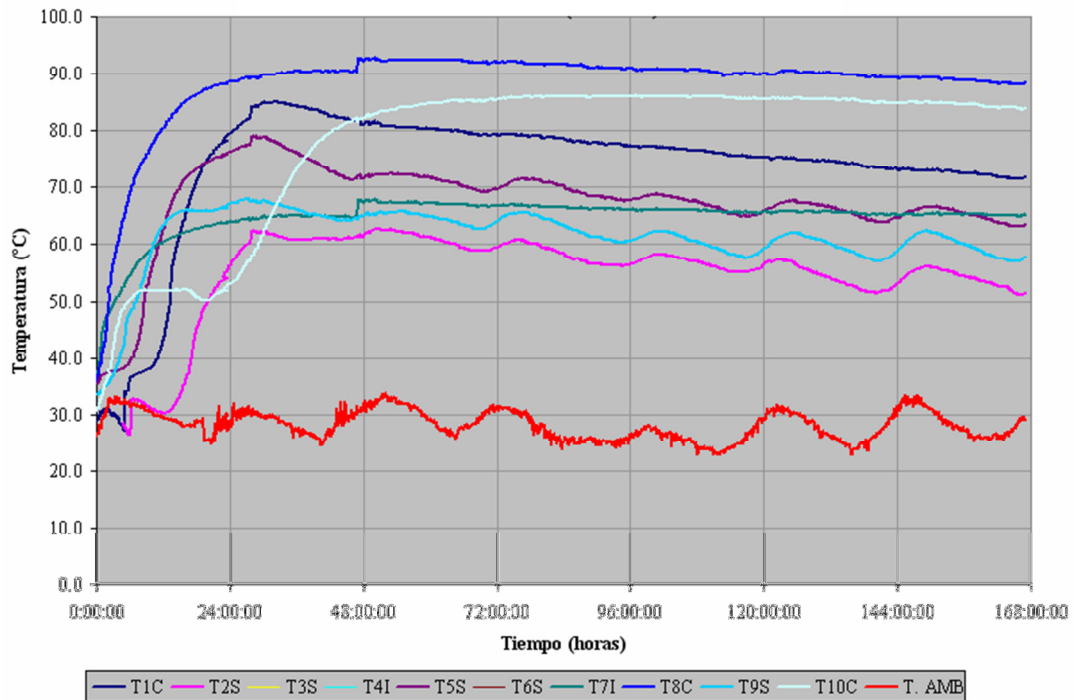
**Figura 2.20. Agua de Amasado Mezclada con Hielo. (Fuente: Lagos. 2009)**

- Se intentó disminuir la temperatura de la mezcla mediante el enfriamiento con agua del camión mezclador.



**Figura 2.21. Enfriamiento de Camión Mezclador. (Fuente: Lagos. 2009)**

Los resultados entregados por las termocuplas instaladas para la primera etapa del hormigonado de la losa de fundación son los que se pueden observar en la siguiente figura.



**Figura 2.22. Evolución de Temperatura Torre 1. Etapa 1. (Fuente: Lagos. 2009)**

Como se puede observar, a pesar de las medidas tomadas, las temperaturas máximas alcanzadas y los gradientes térmicos sobrepasan ampliamente los valores recomendados. Esto reafirma la idea de que las medidas de control no siempre son eficientes y que otras alternativas de control no siempre son aplicables a todos los casos o pueden no ser rentables económicamente. Acá cobra gran importancia la idea de reconocer cuales son los efectos de la temperatura que realmente tiene potencial de causar daño a las estructuras, para así poder enfocar los esfuerzos de control solo en los aspectos más relevantes.

# CAPÍTULO 3: FORMACIÓN DE ETRINGITA

## RETARDADA, DEF.

### 3.1. INTRODUCCIÓN

La etringita es un sulfoaluminato cálcico hidratado cristalino cuya fórmula química abreviada es  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ . Este producto se forma normalmente durante la hidratación del cemento portland y su sola presencia en la pasta endurecida no representa un problema en el hormigón. Sin embargo, altas temperaturas durante el proceso de curado puede descomponer la etringita formada, incorporándose a las fases mayoritarias, posteriormente este proceso puede ser revertido en el hormigón endurecido ante la presencia de humedad, dando origen a una cristalización de etringita, generando presiones internas que pueden dar como resultado un fenómeno expansivo y deterioro en el hormigón, este fenómeno es conocido como “DEF” por sus siglas en inglés “Delayed Ettringite Formation” en español se traduce como “Formación de Etringita Retardada”. (*Skalny et al. 1996*)

Existe gran cantidad de publicaciones respecto a este tema, donde se evidencia la controversia que existe respecto a la formación de la etringita retardada y sus mecanismos expansivos. En general el fenómeno DEF se puede considerar como un ataque interno de sulfatos causado por altas temperaturas durante el curado. Este fenómeno es fácilmente detectable mediante microscopia.

Este subcapítulo muestra un análisis sobre el estado actual del tema de la formación de etringita retardada. Pretende clarificar aspectos, como su formación, causas, efectos expansivos y las controversias existentes actualmente en estas materias.

### 3.2. FORMAS DE ETRINGITA

Según la literatura existente, de acuerdo a sus posibles mecanismos de formación, se pueden considerar tres formas diferentes de etringita: Etringita primaria, etringita secundaria y etringita retrasada.

La Etringita Primaria, es un producto normal dentro del proceso de hidratación del cemento portland. Ésta se distribuye homogéneamente en la matriz de cemento hidratado del hormigón fresco. Este tipo de etringita no genera expansión, dado que esta se genera en un estado en que el hormigón aún no se encuentra endurecido, incluso se genera en hormigones de cementos resistentes a los sulfatos y con cementos siderúrgicos. Dado el mecanismo de acción que se desarrolla, también puede

considerarse etringita primaria a la que se puede formar por un ataque externo de sulfatos, siendo esta muy dañina para la estructura del hormigón. (Skalny et al. 1996).

La Etringita Secundaria, corresponde a aquella que se forma en el hormigón endurecido y húmedo luego de un tiempo suficiente en que la etringita primaria, eventualmente, se disuelve y posteriormente se recristaliza en los espacios disponibles. Los autores citados hacen una diferencia entre esta forma de etringita y la etringita retrasada, sin embargo otros autores hablan indistintamente de estas dos. Esta forma de etringita, como se definió, no genera expansión en el hormigón. (Skalny et al. 1996).

La Etringita Retrasada, es el tipo de etringita que se origina cuando las condiciones de curado son de altas temperaturas. Cuando estas sobrepasan los 65 - 70 °C la etringita se vuelve inestable. Así, bajo estas condiciones parte de la potencial etringita primaria no se forma dando origen a diversos compuestos, y se descompondrá cualquier etringita que se haya alcanzado a formar antes del curado. Posteriormente, si el hormigón endurecido y ya en uso se ve expuesto a condiciones de humedad a temperatura ambiente, los compuestos inestables originados en lugar a la etringita primaria comenzarán transformarse lentamente en etringita. Este proceso es el denominado fenómeno de “Formación de Etringita Retrasada” conocido como “DEF”. Se ha observado que este fenómeno genera expansiones en el hormigón endurecido y la posterior fisuración de éste, siendo un punto de preocupación en la construcción de elementos masivos de hormigón. El mecanismo de expansión asociado a este fenómeno, no está completamente explicado, siendo varias las aristas que se han estudiado. (Skalny et al. 1996). En la siguiente figura se puede ver la imagen de una estructura de hormigón afectada por la formación de etringita retrasada.



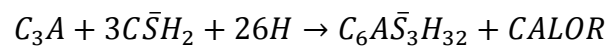
**Figura 3.1. Estructura de hormigón dañada por efecto de la formación de etringita retrasada.**  
(Fuente: <http://www.uni-weimar.de>).



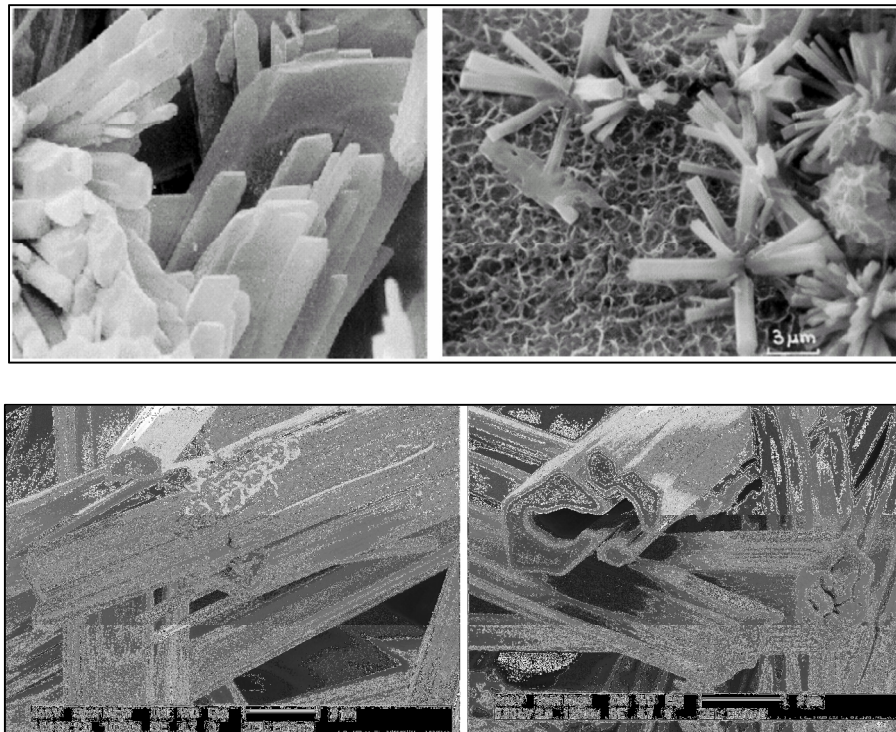
### 3.3. ETRINGITA EN EL HORMIGÓN FRESCO

La etringita es un producto que se forma normalmente durante la hidratación del cemento portland, sin generar problemas en el hormigón, en esta etapa la etringita se forma como resultado de la hidratación del aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) en presencia de yeso ( $C\bar{S}H_2$ ). Los iones  $Al_2O_4^-$  y  $Ca^{2+}$  liberados desde el aluminato tricálcico y el ion  $SO_4^{2-}$  liberado desde el yeso reaccionan en un medio acuoso formando etringita ( $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ). Estas reacciones son acompañadas de un importante desprendimiento de calor. Los iones formados se combinan instantáneamente para formar los cristales de etringita según la siguiente reacción:

**Ecuación 3.1. Formación de etringita en el Hormigón Fresco**



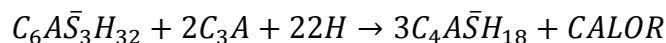
Posteriormente la etringita sigue formándose durante un periodo de reacción lenta durante la hidratación del  $C_3A$ . La etringita formada es fácilmente observable en un microscopio apareciendo en forma de agujas prismáticas muy finas y racimos de las mismas. En la figura 3.2 se puede ver la típica morfología de la etringita en el hormigón fresco.



**Figura 3.2** Cristales de etringita vistos mediante microscopio electrónico. (Fuente: Stark et al. 1999)

Junto con la etringita, la hidratación del  $C_3A$  genera monosulfatos. Al disminuir en la pasta la concentración de sulfato la concentración de aluminato sube lo que provoca que la etringita se vuelva inestable y se convierta gradualmente en monosulfatos.

**Ecuación 3.2. Formación de Monosulfatos.**



Por otro lado, la etringita “crece” y se redeposita en espacios disponibles, esto se ve favorecido por un alto contenido de humedad permitiendo un proceso de disolución, transporte y recristalización en los espacios disponibles, esto no genera expansión.

La cantidad de etringita que se forma en la pasta de cemento durante un tiempo determinado es difícil de predecir, ya que depende de múltiples factores, algunos aún desconocidos. La composición química del cemento, el tamaño de las partículas de cemento, su reactividad, la proporción relativa de los componentes químicos del cemento, las condiciones de curado, son algunos de la gran cantidad de factores influyentes en la cantidad de etringita formada.

### **3.4. FORMACIÓN DE ETRINGITA RETARDADA.**

La formación de etringita retardada o DEF se puede definir como: “Una forma de ataque interno de sulfatos en el hormigón inducido por calor”. En este caso la formación de etringita en materiales cementicios, es un proceso que comienza antes del endurecimiento y se completa posteriormente en el hormigón endurecido sometido a condiciones de humedad” (*Skalny et al. 1996*).

Esta definición es compartida por un gran número de autores. Estos indican que las condiciones de temperatura que origina el fenómeno, puede ser producto de un tratamiento térmico (como un curado al vapor) o por el calor de hidratación del cemento en el caso de los hormigones masivos, sumado a las condiciones ambientales (*Heinz and Ludwig 1987, Skalny et al. 1996, Taylor et al. 2000, Diamond 2002*). Se indica generalmente, que el rango de temperatura requerido está entre 65° y 70° C (*Skalny et al. 1996*). Este rango de temperaturas ha sido obtenido como resultado de numerosos estudios experimentales y son aplicables a hormigones construidos en terreno siempre que se utilicen cementos con contenidos de álcalis y sulfatos en rangos normales. Aunque algunos consideran que estas temperaturas pueden estar en torno a los 60° C para algunos cementos con altos contenidos de álcalis y baja relación agua – cemento (*Diamond 2002*).

Como ya se mencionó, tanto en trabajos de laboratorios como en datos obtenidos en terreno, se confirma la existencia de una expansión relacionada con un tratamiento térmico aplicado durante el curado del hormigón, y en todos los sistemas que evidencian esta expansión es común la presencia de etringita en la pasta de cemento, acompañada

de fisuración cuando éstos se someten a condiciones de humedad. Posterior al enfriamiento del sistema, la etringita es observable en poros, vacíos, fisuras y alrededor del árido en vacíos y fisuras. Esto es lo que se define como formación de etringita retardada o DEF. La experiencia demuestra que el fenómeno DEF en terreno se da tras 2 a 6 años de la puesta en servicio de la estructura. En la figura 3.3 se puede ver una curva típica de expansión por el fenómeno DEF bajo condiciones controladas en laboratorio (Skalny et al. 1996).

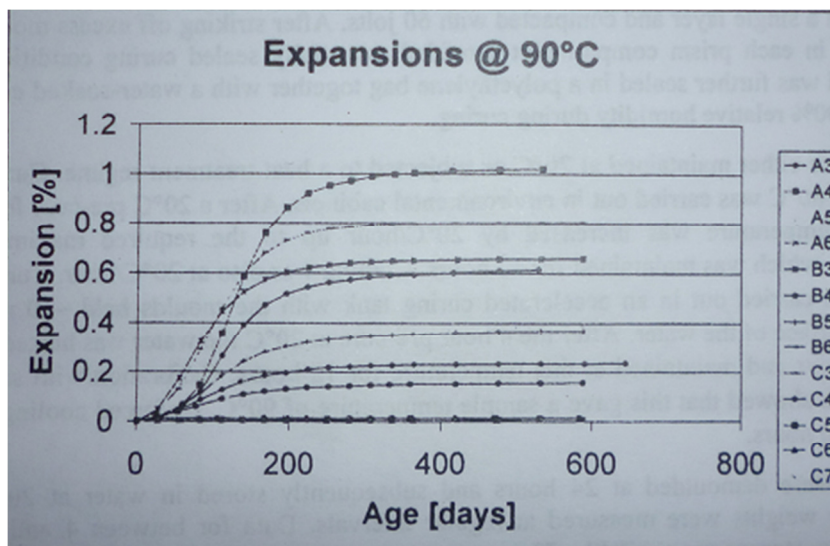


Figura 3.3. Evolución de la expansión de morteros curados a 90°C. (Fuente: Kelham 2002).

### 3.5. INESTABILIDAD DE LA ETRINGITA EN EL HORMIGÓN

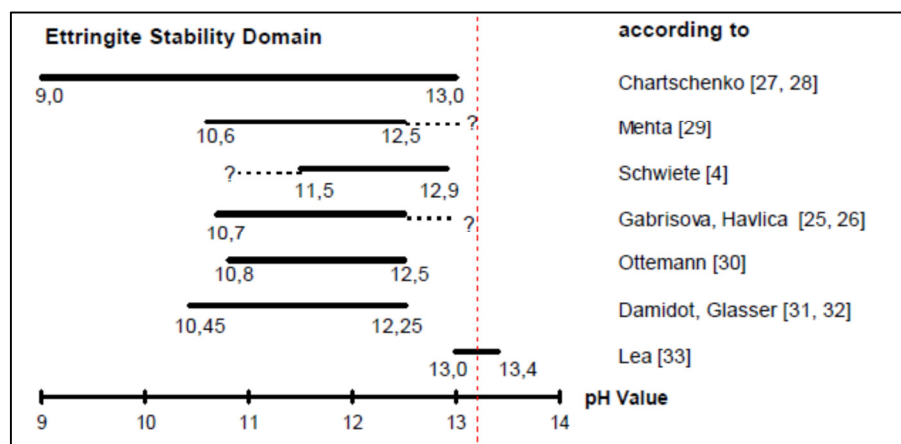
EL término estabilidad química, se refiere a la estabilidad termodinámica de un sistema químico. Esta estabilidad se da cuando un sistema se encuentra en un estado de equilibrio químico con su entorno, es decir el estado en que las concentraciones de los reactivos y los productos no tienen ningún cambio neto en el tiempo. En general y en el caso de estudio de materiales, se habla de estabilidad, en el sentido químico cuando estos no son particularmente reactivos en el ambiente o durante su uso normal bajo condiciones definidas. (Glasser 2002).

Para el caso de la etringita, ésta se encuentra en un estado de estabilidad bajo ciertas condiciones de temperatura, presión y concentración de otros componentes. A continuación se presenta una discusión sobre los factores más importantes en cuanto a la estabilidad de la etringita en el hormigón.

Como ya se ha mencionado anteriormente, es un hecho aceptado, que la etringita primaria en el hormigón se hace inestable a temperaturas de entre 65° y 70° C. Este tema ha sido estudiado largamente. Ya en 1944 Jones realizaba estudios sobre la estabilidad de la etringita en el sistema  $CaO - Al_2O_3 - SO_3 - H_2O$ , estudios de este tipo

se siguen realizando hasta el día de hoy. La opinión en torno a la estabilidad a temperaturas elevadas difiere entre los autores, aunque estas diferencias son atribuibles entre otras cosas a las distintas condiciones experimentales observadas en los distintos estudios. Odler, en 1980 determinó que un curado a alta temperatura provoca la desaparición muy rápida de la etringita, la que no es detectada a los 95°C. Por otro lado Brown y Bothe en 1993 demuestran que la formación de etringita es más favorable en soluciones de baja alcalinidad, concluyendo que altas temperaturas combinadas con el efecto de los álcalis provocan un retraso en la formación de ésta y una aceleración de la hidratación del  $C_3S$ . Esta situación genera que algunos sulfatos y aluminatos puedan incorporarse a la estructura del Gel de Tobermorita (CSH), impidiendo la formación de etringita (Skalny et al. 1996, Taylor et al. 2001). Más tarde Glasser confirmó la enorme influencia de la temperatura en la estabilidad de la etringita en el sistema, notando que a temperaturas por sobre los 45°C aumenta la estabilidad de los monosulfatos en desmedro de la estabilidad de la etringita. (Skalny et al. 1996, Glasser 2002).

En otros estudios se ha investigado la influencia del pH de la solución en la estabilidad de la etringita. En la figura 2 se puede ver una imagen con distintas formas de cristales de etringita. Según estudios en esta materia, estas distintas formas y tamaños de los cristales están fuertemente influenciados por el pH de la solución, así, cristales más largos se forman con valores de pH entre 10 y 12 mientras que cristales extremadamente pequeños se observan para valores de pH sobre 13 (Bollman 1999). Por otro lado, el dominio en que existe estabilidad de la etringita ha sido planteado por varios autores, en la figura 3.4 se puede ver una comparación de los distintos dominios de estabilidad planteado por los distintos autores que han investigado este tema.



**Figura 3.4. Rangos de estabilidad de la etringita según pH, propuestos por distintos autores. (Fuente: Stark et al. 1999)**

Esta inestabilidad de la etringita primaria y la formación de etringita retrasada traen como consecuencia cambios en la concentración iónica de la disolución, en particular, las concentraciones de iones de sulfato y  $OH^-$  parecen estar fuertemente influenciadas por la presencia de álcalis en el agua de poros. Varios estudios al respecto muestran que

con elevados contenidos de álcali se necesitan mayores concentraciones de aluminatos y sulfatos para que la etringita permanezca estable. Es por esto que cuando existe un fenómeno combinado de DEF Y ASR (Reacción Álcali - Sílice), la alcalinidad de la disolución desciende aumentando la estabilidad de la etringita formándose en la pasta y posteriormente recrystalizando en el área afectada por el efecto de la reacción ASR. En ausencia de la reacción ASR, la alcalinidad permanece alta siendo menos favorables las condiciones para la formación de etringita retrasada. (*Skalny et al. 1996*).

### **3.6. CONDICIONES Y CAUSAS DEL FENÓMENO DEF**

Dos son consideradas las condiciones necesarias, aunque no suficientes, para el desarrollo del fenómeno DEF. Como primera condición, el material debe haber estado sometido a temperaturas mayores a 70° C por un tiempo suficiente, para que así la etringita formada adquiriera una potencial inestabilidad, que trae como consecuencia, por un lado, la descomposición de la etringita formada por la reacción entre el  $C_3A$  y los sulfatos disueltos en la etapa inicial de la hidratación, y por otro lado, impide la formación de una potencial etringita no formada. Como segunda condición, se debe volver a una temperatura ambiente (de unos 22° C) y el hormigón debe quedar sometido a condiciones de humedad, permitiendo así la recrystalización de la etringita (*Heinz and Ludwig 1987*).

Sin embargo existen variadas condiciones que pueden llegar a facilitar o impedir la ocurrencia de este fenómeno. Es por esto, que el proceso asociado a la formación de etringita tardía es complejo y difícil de predecir y por consiguiente no se domina el mecanismo bajo el cual la etringita formada genera expansión. Sin embargo existe larga experiencia disponible y varios autores han descrito posibles mecanismos de acción que permiten dar una visión de los resultados y hechos más relevantes.

Se pueden considerar tres como las condiciones básicas que influyen en el origen, desarrollo y progreso del fenómeno DEF y a su vez, dentro de cada una de estas condicionantes, se encuentran varios parámetros diferentes que influyen en mayor o menor medida en el fenómeno DEF (*Skalny et al. 1996*).

Factores y parámetros que influyen en el fenómeno DEF:

- Condición relativa a la composición de los componentes del hormigón
  - Composición del cemento
    - Sulfatos
    - Álcalis
    - Adiciones
    - Otros
  - Propiedades del Cemento
  - Tipo de árido y granulometría
  - Daños previos
  - Relación agua – cemento
  - Contenido de aire
  - Porosidad
- Condiciones relativas a la forma de curado
  - Choque térmico
  - Temperatura máxima
  - Tiempo de exposición a temperatura máxima
  - Velocidad de enfriado
- Condiciones relativas a la exposición de la estructura al medio ambiente
  - Humedad
  - Tiempo
  - Temperatura
  - Exposición solar

A continuación se mencionarán algunos aspectos en torno a las principales condiciones que favorecen el desarrollo del fenómeno DEF, esto incluirá tanto las condiciones esenciales para la ocurrencia de este fenómeno como lo son la temperatura y la presencia de sulfatos, como también condiciones secundarias como lo pueden ser la influencia de otros componentes del cemento, por ejemplo los álcalis. Además se mencionarán otras condiciones cuya influencia en el fenómeno DEF generan controversia, tal es el caso de la influencia que pueden tener los áridos en el fenómeno expansivo, aunque en torno a estos temas hay opiniones bastante claras y concluyentes. (Taylor et al. 2000).

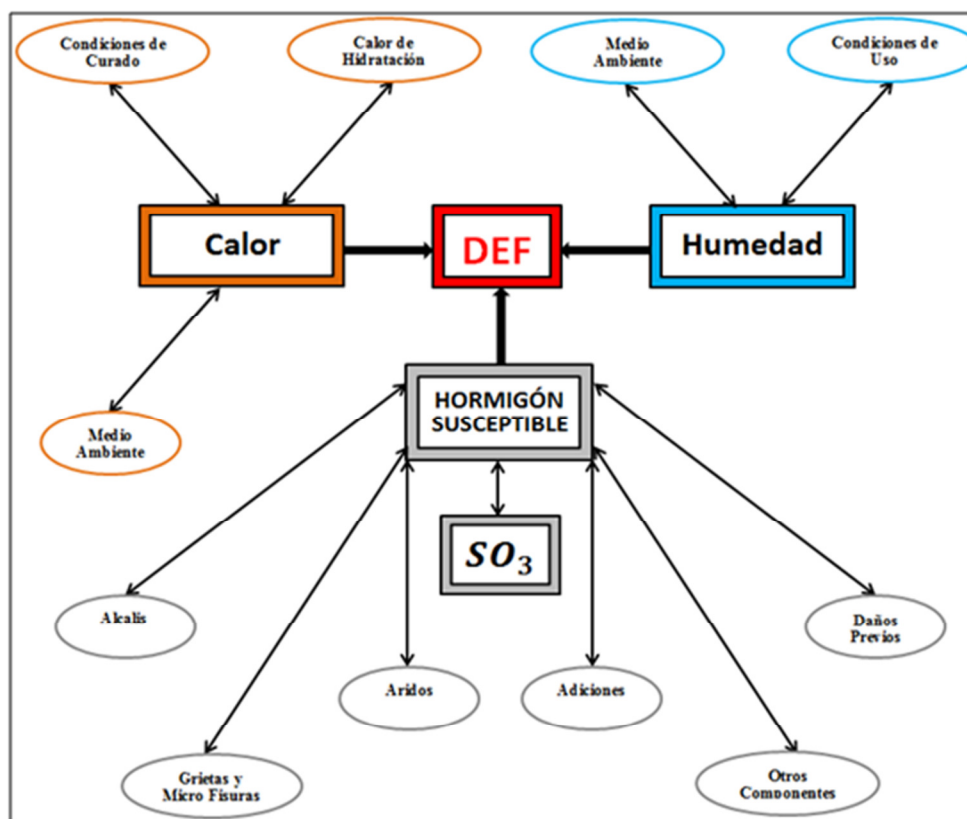


Figura 3.5 Condiciones esenciales y secundarias para el desarrollo del fenómeno DEF.

### 3.6.1 Temperatura y Condiciones de Curado

Como se ha dicho, es un hecho aceptado ampliamente que la temperatura es una condición fundamental para la ocurrencia o no del fenómeno DEF, se considera que la temperatura crítica para el desarrollo de expansión debido a este fenómeno está alrededor de  $70^{\circ}\text{C}$  (Skalny et al. 1996, Taylor 2000). Aunque algunos autores consideran que se puede desarrollar el mismo efecto sin la necesidad de haber alcanzado esta temperatura en hormigones con altos contenidos de sulfatos (Diamond 2002). Sin embargo esta visión es bastante cuestionada y se consideran esos casos como excepcionales asociados a cementos de composiciones deficientes (Skalny 2002, Taylor 2002).

Estudios experimentales han confirmado la influencia de la temperatura de curado sobre la etringita formada. Odler el año 1980 observó que un curado a alta temperatura implica la desaparición de cualquier etringita primaria formada en un corto período de tiempo a los  $95^{\circ}\text{C}$  (Skalny et al. 1996). Otros ensayos confirman que el curado a temperaturas por sobre los  $65^{\circ}\text{C}$  en hormigones sometidos posteriormente a condiciones de humedad, puede ocasionar el fenómeno DEF. Kelham el año 2002 determinó que el aumento de las temperaturas de curado incrementa la expansión

última del elemento. Ver Figura 3.6 (Heinz and Ludwig 1987, Grabowski et al. 1990, Taylor et al. 2000, Kelham 2002).

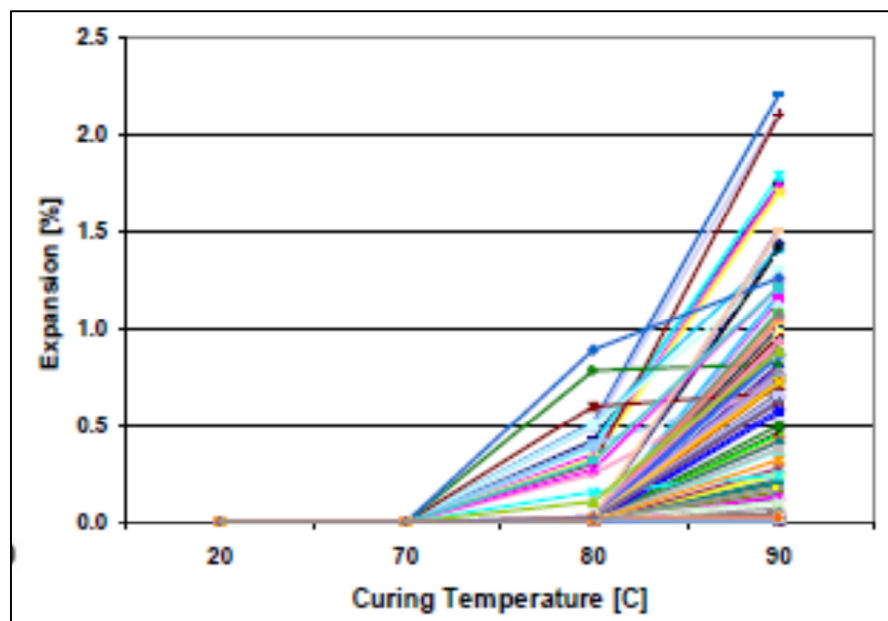


Figura 3.6. Expansión de morteros curados a distintas temperaturas. (Fuente: Kelham. 2002).

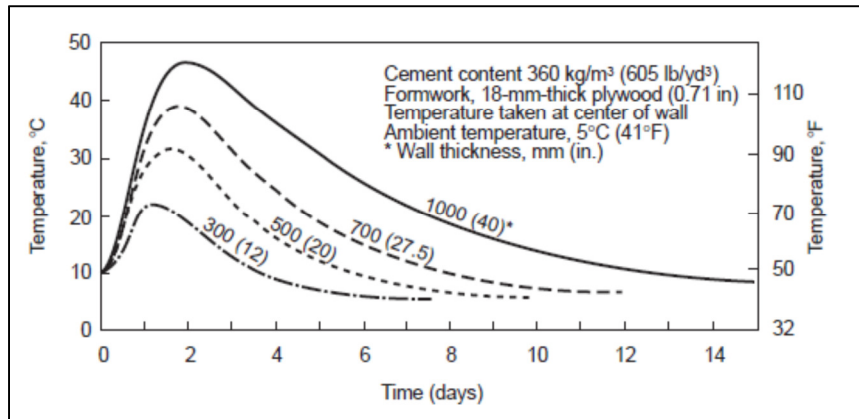
Las fuentes de calor que pueden llegar a generar este aumento de temperatura en el hormigón pueden ser de distinto tipo, pero en la gran mayoría de los casos las condiciones de curado del hormigón tienen un papel fundamental. Existen distintos tratamientos térmicos que se utilizan para el curado acelerado del hormigón, algunos hormigones industriales prefabricados utilizan curados térmicos mediante vapor, lo que puede aumentar considerablemente la temperatura del hormigón. Por otro lado, el calor que se genera durante la hidratación del hormigón puede llegar a causar este fenómeno, este problema es de especial importancia cuando se trata de hormigones en grandes masas o con gran contenido de cemento.

Respecto a las condiciones de curado controlado, se ha determinado que una excesiva velocidad en el aumento de la temperatura puede generar microfisuras en el hormigón y debilitar la interface pasta – árido, haciendo más susceptibles a éstos de sufrir el fenómeno DEF. Se recomiendan velocidades en torno a los 20° C por hora (Skalny et al. 1996). Este mismo fenómeno de fisuración, debido a tensiones provocadas por los gradientes de temperatura, puede ocurrir para el caso de hormigones curados térmicamente u hormigones sometidos a ciclos de humedecimiento – secado, se ha demostrado que esto acelera el desarrollo de este fenómeno, pero no necesariamente aumenta la expansión final (Escadeillas 2007).

Por otro lado, la reacción de hidratación del hormigón tiene un carácter exotérmico, liberando una gran cantidad de calor. La energía liberada está por sobre los 320 kJ/kg de cemento y hasta los 450 kJ/kg de cemento (Divet and Pavoine 2002), esto sumado a

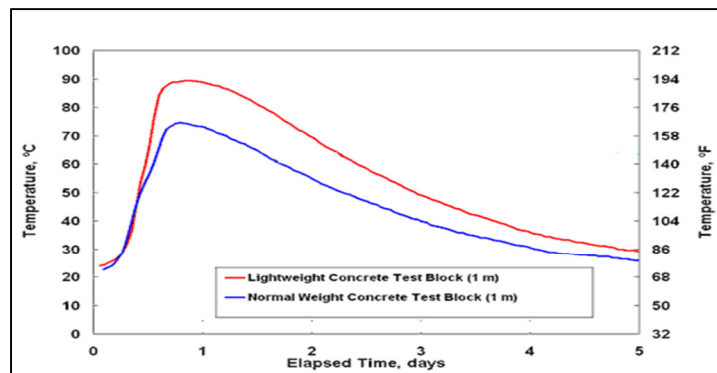


un posible tratamiento térmico o a las condiciones ambientales, pueden provocar que las temperaturas máximas al interior del elemento, en el núcleo, sobrepasen lo esperado, permitiendo la descomposición de la etringita (Skalny *et al.*1996). En la Figura 3.7 se puede ver un grafico que muestra el efecto de la masividad del hormigón (espesor de muro) sobre la temperatura máxima alcanzada. Este problema puede ser crítico en el caso de estructuras de hormigón construidas en grandes masas en que la temperatura interna puede superar con creces las temperaturas críticas mencionadas. En estos casos, se toman costosas medidas con el objetivo de mitigar el aumento de la temperatura y reducir los gradientes térmicos.



**Figura 3.7. Efecto de la masividad en la temperatura máxima de hidratación. (Fuente: PCA 1997)**

En la figura Figura 3.8 se muestra la evolución de la temperatura en un hormigón masivo, donde se pueden apreciar las grandes temperaturas que se pueden alcanzar, la dosificación de cemento también tendrá una gran incidencia en la cantidad de calor generado en el núcleo.



**Figura 3.8. Evolución de la temperatura en hormigones masivos. (Fuente: [www.hpcbridgeviews.com](http://www.hpcbridgeviews.com)).**

La velocidad de la expansión y posterior fisuración está determinada en gran medida por la temperatura ambiente. Como en la mayoría de los procesos químicos, el fenómeno

DEF se ve acelerado con un aumento de la temperatura, siendo menos factible su ocurrencia bajo condiciones de clima frio y seco (Skalny et al. 1996).

Finalmente, se ha observado que la energía proveniente de la radiación solar, es capaz de aumentar considerablemente la temperatura de una estructura, aumentando hasta 30° C la temperatura del hormigón por sobre la temperatura ambiente. Esto pudiese provocar algún tipo de problema asociado al fenómeno DEF en caso de tener condiciones extremadamente desfavorables. (Skalny et al. 1996, Grabowski et al. 1990).

### 3.6.2 Importancia de la Humedad

Para que se desarrolle el fenómeno DEF, en un hormigón susceptible, que ha sido sometido previamente a altas temperaturas, es necesario que mientras está en servicio, se exponga a una alta humedad por un periodo de tiempo suficiente. Estas condiciones de humedad son esenciales para permitir un proceso continuo de transporte y recristalización de etringita en los espacios vacíos disponibles y por lo tanto, para que se desarrolle el fenómeno DEF.

El agua representa más de la mitad del volumen de la etringita y se ha estimado que una humedad relativa por sobre el 80% es necesaria para que el fenómeno DEF ocurra (Heinz and Ludwig 1987, Skalny et al. 1996, Taylor et al. 2000, Famy et al. 2002). En la figura 6 se muestra un estudio realizado por Heinz and Ludwig el año 1987, en ella se observa el efecto de las condiciones de humedad sobre la expansión del hormigón. Se concluye que, las muestras almacenadas sumergidas en agua comienzan tempranamente su expansión, mientras que las muestras almacenadas con una humedad relativa del 60% no desarrollan expansión, sin embargo, cuando estas mismas probetas se someten a una humedad relativa del 100%, la expansión se acelera e intensifica considerablemente.

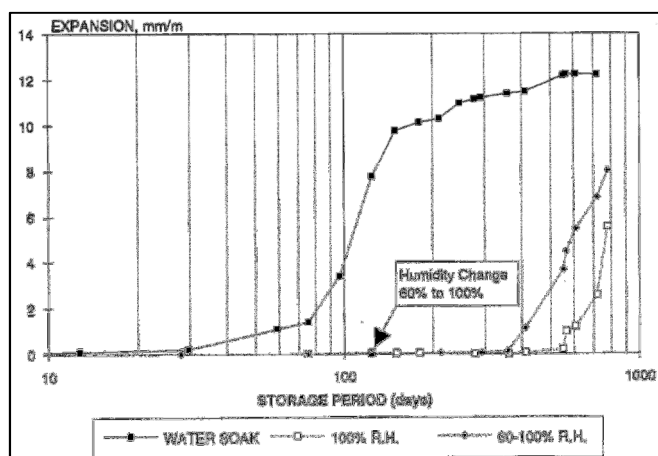


Figura 3.9. Efecto de las condiciones de humedad en la expansión. (Fuente: Heinz and Ludwig 1987)

Por otro lado, humedades diferentes en distintos sitios de una estructura o elemento de hormigón, pueden generar un transporte de sulfatos alcalinos a sitios donde el agua se evapora, pudiendo agravar los daños causados (*Skalny et al. 1996*).

### **3.6.3 Efecto de los Sulfatos y Otros Componentes del Cemento**

Numerosos son los estudios de laboratorio orientados a determinar la influencia del tipo de cemento y sus componentes en el desarrollo de daños asociados al fenómeno expansivo DEF. Lawrence en 1995 en un estudio que involucró numerosos tipos de cemento, determinó correlaciones lineales de pendientes positivas entre las expansiones a 400 y 800 días y los contenidos de  $SO_3$ ,  $Na_2O$ ,  $MgO$  y álcalis totales (con coeficientes de correlación de entre 0,6 y 0,7). También obtuvo correlaciones lineales de pendiente positiva para los contenidos de  $C_3A$  y para la finura de las partículas de cemento, sin embargo para estos últimos casos los coeficientes de correlación solo se encuentran entre 0,2 y 0,4. El autor determina que los valores límites, por encima de los cuales pareciera facilitarse el fenómeno DEF son de 2,5% para el caso del  $SO_3$  y 1% para el  $MgO$ , lo que sin embargo, incluye a la mayoría de los cementos. Otros estudios, realizados mediante métodos de ensayo acelerados (Ensayo Duggan), confirman el hecho de que el contenido de  $SO_3$  es determinante en la formación de etringita (*Jones et al. 1990*, *Grabowski et al. 1992*, *Hanson 2000*, *Kelham 2002*) con correlaciones por sobre 0,7. Estos mismos estudios determinan que la razón molar  $SO_3/Al_2O_3$  es proporcional a la expansión, lo cual es confirmado por varios otros estudios (*Grabowski et al. 1990*, *Escadeillas et al. 2007*). Hanson (2000) determinó además, que existe una correlación mayor a 0,7 entre la expansión y el contenido de  $K_2O$ .

De los componentes incidentes en el fenómeno DEF mencionados, hay un consenso entre los autores, que de éstos, son dos los factores dominantes y determinantes, menor medida está la razón molar  $SO_3/Al_2O_3$  donde se ha mostrado que la interacción entre cantidades de  $SO_3$  y  $Al_2O_3$  trae como resultados distintas proporciones de etringita y monosulfatos presentes posteriormente al tratamiento térmico. Zhang el año 2002 determinó que para razones molares menores a 0,8 no se registran expansiones, mientras que la máxima expansión se registra con razones molares de alrededor de 1,1, estos resultados se pueden ver en la Figura 3.10 (*Taylor et al 2000*, *Zhang et al 2002*). Por otro lado, y como es evidente, está el contenido de  $SO_3$ , ya que sin este no podría haber etringita. Esto confirma la definición del fenómeno DEF, como un ataque interno de sulfatos, donde la concentración de  $SO_3$  es determinante en la ocurrencia de expansión, ver Figura 3.11. Incluso algunas teorías indican que cementos fabricados con un contenido total de  $SO_3$  muy alto, pueden sufrir expansión ante la presencia de humedad sin la necesidad de haber estado sometidos a condiciones de alta temperatura (*Diamond 2002*). Esto se atribuye más precisamente a la presencia de sulfatos en fases que solo lo liberan muy lentamente, como la anhidrita u otra. Sin embargo, esta hipótesis está basada solo en estudios de hormigones construidos en terreno y no bajo

condiciones de laboratorio y según algunos autores no existe suficiente evidencia como para concluir esto, sin considerar el evidente caso de cementos con un contenido de sulfatos excesivamente altos, fabricados probablemente por error. En este sentido existen estudios en que cementos portland con contenidos de  $\text{SO}_3$  mayor al 5% no presentan expansiones significativas en hormigones que no fueron sometidos a las condiciones de alta temperatura (Taylor et al. 2001, Taylor 2002).

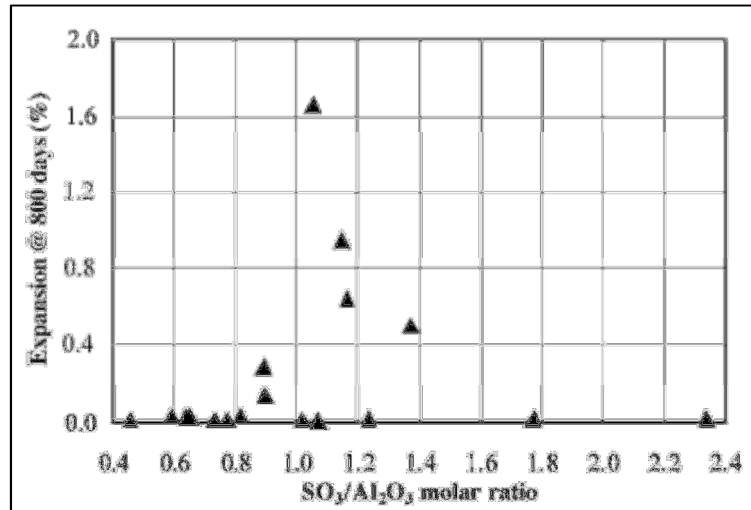


Figura 3.10. Expansión de morteros curados a  $85^\circ\text{C}$  v/s relación molar  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ . (Fuente: Zhang et al 1987)

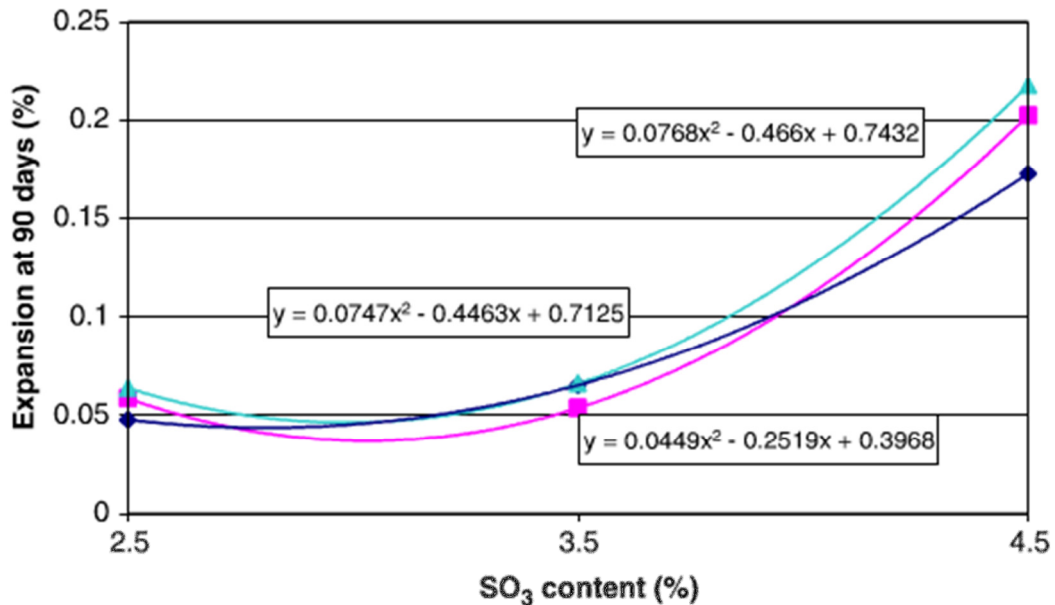


Figura 3.11. Expansión de morteros curados a  $85^\circ\text{C}$  v/s contenido de  $\text{SO}_3$ . (Fuente: Tosun 2006)

Considerando varios de los componentes que se han mencionado como influyentes en mayor o menor medida en el fenómeno expansivo DEF, Zhang et al el año 2002 definió el “Índice DEF”. Esta ecuación relaciona algunos componentes con potencial expansivo y entrega un valor que da una idea del potencial riesgo que tiene un hormigón de sufrir expansión por el fenómeno DEF conocido el tipo de cemento usado. La ecuación que define el “Índice DEF” se muestra a continuación (*Zhang et al 2002*).

**Ecuación 3.3. Índice DEF**

$$Indice\ DEF = \left( \frac{SO_3}{Al_2O_3} \right)_m \times \left[ \frac{(SO_3 + C_3A)_W}{10} \right] \times \sqrt{Na_2O_{eq}}$$

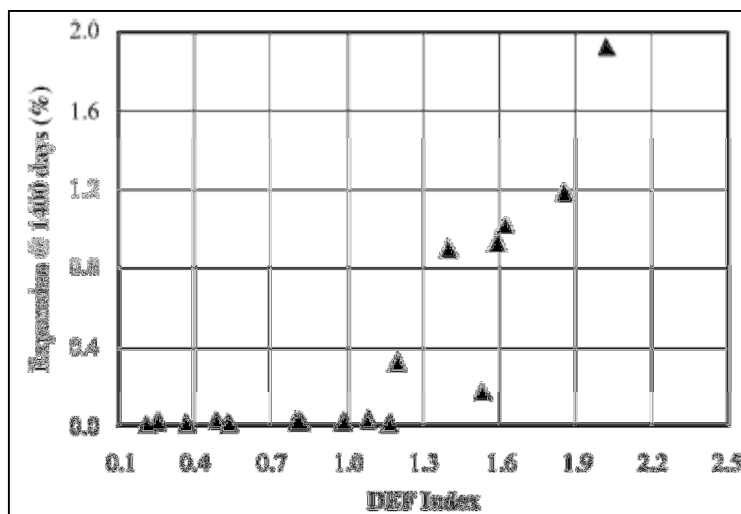
Dónde:

$\left( \frac{SO_3}{Al_2O_3} \right)_m$  : Razón molar  $SO_3/Al_2O_3$ .

$(SO_3 + C_3A)_W$ : Es el peso (en porcentaje) combinado entre los contenidos de  $SO_3$  y  $C_3A$ .

$Na_2O_{eq}$ : Es el peso (en porcentaje) del contenidos de  $Na_2O_{eq}$ , correspondiente a los álcalis totales.

El estudio concluye que no se desarrollan expansiones para valores del Índice DEF inferiores a 1,1 mientras que sobre este valor siempre se observan expansiones en los elementos estudiados. En la figura 9 se pueden ver los resultados obtenidos por Zhang et al., en ella se muestra la relación entre la expansión a los 1400 días y el valor correspondiente al Índice DEF (*Zhang et al. 2002*).



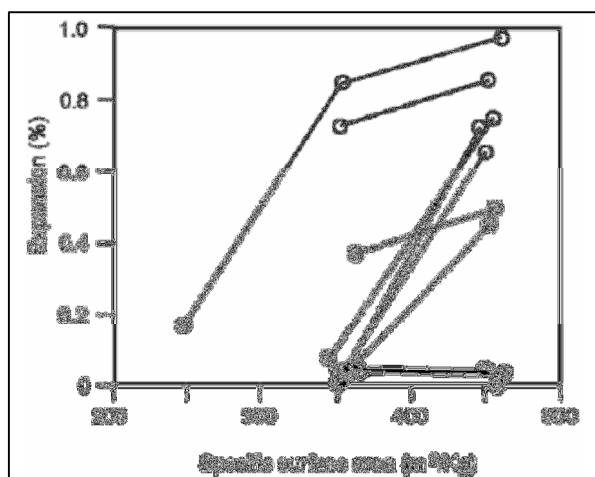
**Figura 3.12. Índice DEF v/s expansión de morteros a los 1400 días. (Fuente: Zhang et al. 2002)**

La gran mayoría de los estudios realizados anteriormente y la literatura existente muestran que elevados contenidos de álcalis influyen en la inestabilidad de la etringita e incluso pueden disminuir la temperatura crítica a la que ocurre expansión. De esta manera, álcalis presentes antes del término del tratamiento térmico pueden incrementar la expansión provocada por el ataque interno de sulfatos, siempre que se trate de cementos con altos contenidos de éstos (*Taylor et al. 2001, Diamond 2002, Kelham 2002*).

Respecto a las adiciones incorporadas al cemento, se ha establecido que el uso de niveles suficientes de adiciones tales como puzolanas, escorias, cenizas volantes o humo de sílice, entre otros, pueden disminuir o suprimir la expansión por el fenómeno DEF (*Skalny et al. 1996, Diamond 2002, Thomas 2002, Kurdowski and Sylwester 2002*). Un estudio realizado el año 2002, muestra que el reemplazo de 30% o 40% de cemento por cenizas volantes silíceas parecen inhibir la expansión por el fenómeno DEF. Este mismo estudio indica que la temperatura crítica puede ser mayor para cementos con estas adiciones incorporadas (*Kelham 2002*). El año 2002 Ramlochan et al. determina que la eficiencia de las adiciones incorporadas en la disminución de la expansión dependen principalmente del contenido de  $Al_2O_3$  reactivo, donde adiciones con altos contenidos de  $Al_2O_3$  controlan de mejor manera la expansión del hormigón. Sin embargo, el reemplazo de un porcentaje del cemento por adiciones, como la puzolana, trae como consecuencia una disminución de la resistencia inicial del hormigón, lo cual lo hace poco adecuado para algunos usos, este problema es solucionable incorporando además otro tipo de adiciones que incrementen esta resistencia (*Ramlochan et al 2003*). De todas maneras, no son muchos los estudios en torno a este tema, por lo que puede ser interesante seguir abordando esta área como una forma de prevenir el ataque por el fenómeno DEF en las obras de hormigón.

#### **3.6.4 Superficie específica del Cemento**

Se ha determinado que un aumento de la finura del cemento aumenta la cantidad de calor de hidratación y la susceptibilidad de sufrir expansión por el fenómeno DEF. Kelham en 1996 determinó que la expansión aumenta considerablemente en cementos con una superficie específica mayor. En la figura 10 se ve el efecto de la finura del cemento en la expansión de éste.



**Figura 3.13. Efecto de la superficie específica del cemento sobre la expansión.**  
(Fuente: Zhang et al. 2002)

Tosun el año 2006 concluyó que el efecto de la superficie específica en el corto plazo es insignificante, sin embargo, a largo plazo la expansión de hormigones fabricados con cementos finos es superior a la encontrada en hormigones con cementos más gruesos.

### ***3.6.5 Efectos del Tipo de Árido y Granulometría***

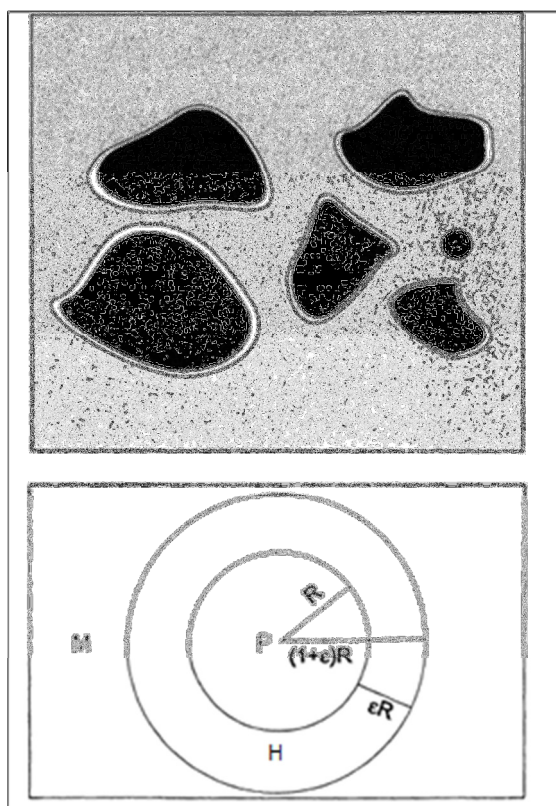
Desde hace muchos años se ha observado que en estructuras dañadas por el fenómeno DEF es posible observar etringita presente rellenando huecos alrededor del árido. Sin embargo, el efecto que tiene el tipo y tamaño de los áridos, es un punto de controversia en torno al tema de la formación de etringita tardía. Dos visiones distintas basadas en las teorías principales que describen el mecanismo expansivo del fenómeno DEF son consideradas en torno a este efecto. Las teorías de expansión por el fenómeno DEF serán desarrolladas en detalle más adelante.

La primera visión se basa en la teoría sobre mecanismo expansivo que indica, que la expansión producto del fenómeno DEF se produce debido a la presión de cristalización provocada por el crecimiento de cristales de etringita en vacíos que se encontraban previamente en el hormigón. Esta visión sugiere que los vacíos llenos de etringita encontrados alrededor del árido son resultado de la expansión de la misma etringita luego de recristalizar en microfisuras existentes en el hormigón previamente, por lo tanto los daños ocurrirían solo en estructuras previamente dañadas de alguna forma. Señala además que el tamaño de los áridos no tiene relación con la cantidad de etringita formada alrededor de estos ni con la magnitud de la expansión (*Lawrence 1997, Diamond 2002*).

La segunda y actualmente más aceptada visión es la basada en la hipótesis sobre el mecanismo expansivo, que dice, que es la pasta de cemento la que se expande homogéneamente durante el fenómeno DEF. Considera que la mineralogía del árido es

importante solo en el sentido de que puede impedir o exacerbar fracturas en la interface pasta – árido. Esta visión plantea que la aparición de etringita alrededor de los áridos es una consecuencia de la expansión del sistema y no la causa de esta expansión, enuncia que este es el resultado de la recristalización de la etringita en los espacios disponibles producto de la expansión de la pasta de cemento y que el tamaño de estos espacios es proporcional al tamaño del árido y por lo tanto proporcional a la cantidad de etringita presente en estos. Que esta etringita no genere expansión, se contrapone completamente a la visión anteriormente descrita. (Skalny et al.1996, Taylor et al. 2000, Johansen 2002). En la Figura 3.14 se muestra una representación de una matriz expandida en que los huecos que se forman alrededor de las partículas de árido son proporcionales al tamaño de estas.

Distintos estudios experimentales demuestran que el tipo de árido si bien puede influir en el fenómeno, no es un factor determinante en la ocurrencia de éste (Grabowski et al. 1990, Taylor et al. 2002). Sin embargo estudios más recientes muestran que el uso de arenas calizas disminuyen la velocidad de expansión mientras que utilizando solamente agregados de cuarzo, se acelera y aumenta esta expansión, ésto se debe presumiblemente al efecto de estos áridos en la cohesión de la interface pasta - árido (Taylor et al. 2000).



**Figura 3.14. Representación de la formación de huecos alrededor del árido durante el fenómeno DEF. Donde M: Matriz de Pasta de Cemento; P: Partícula de Árido y H: Hueco formado alrededor del arido (Fuente: Skalny 1996).**



Por otro lado, es ampliamente mencionado que la presencia de áridos reactivos susceptibles a sufrir de la reacción árido – álcali (ASR) favorecen la expansión producto del fenómeno DEF. La presencia de áridos reactivos disminuye la alcalinidad del sistema lo que aumenta la estabilidad de la etringita pudiendo ésta formarse en la pasta y luego recristalizar en zonas dañadas previamente por la reacción ASR. En ausencia de áridos reactivos, la alcalinidad permanece alta por lo que la formación de etringita retrasada es menos favorable (*Skalny et al. 1996, Taylor et al 2000*). Algunas visiones plantean que deterioros previos como la ASR u otra son fundamentales para que el fenómeno DEF ocurra e indican además, que la presencia de esta reacción disminuye la temperatura crítica para la expansión (*Diamond 2002*). De todas maneras, son numerosos los casos estudiados en terreno en que no se dan simultáneamente el fenómeno DEF y la reacción ASR (*Skalny et al. 1996*). Este tema está aún siendo investigado ya que no hay claridad al respecto.

### **3.6.6 Efecto de la Fisuras y Daños en el hormigón**

Se ha determinado, siendo ampliamente aceptado, que un hormigón previamente alterado con alguna forma de deterioro será más sensible a una segunda forma de daño que un hormigón normal, incluso algunos autores dudan de que el fenómeno DEF pueda ocurrir sin la ayuda de factores de deterioro previos en la estructura, como reacción ASR, carbonatación, deterioros por ciclos de hielo deshielo, microfisuras u otros defectos en la microestructura (*Skalny et al. 1996, Lawrence et al. 1997*).

Se ha señalado generalizadamente que hormigones con microfisuras y con una baja cohesión pasta – árido son más susceptibles a desarrollar el fenómeno DEF.

El rol de las grietas presentes en el hormigón es un tema controversial, en el mismo sentido que la controversia que existe con los áridos (ver punto anterior). Por un lado está la postura que plantea que las grietas son el resultado del ensanchamiento de microfisuras debido a la expansión de etringita recristalizada en ellas (*Lawrence et al. 1997, Diamond 2002*). Sin embargo, la visión más generalizada y aceptada actualmente indica que aunque las grietas no son producto del crecimiento de la etringita, estas si tienen incidencia final en el resultado del fenómeno DEF. Estudios experimentales muestran que la introducción deliberada de grietas, por ejemplo mediante ciclos de humedecimiento – secado, acelera el proceso de expansión. Se cree que esto se debe por un lado, al debilitamiento de la estructura, facilitando la expansión, y por otro lado, estas grietas facilitarían el ingreso del agua dentro de la estructura de hormigón, permitiendo y acelerando el fenómeno DEF (*Skalny et al. 1996, Scrivener et al. 2002, Famy 2002*).

Otros deterioros, como la carbonatación del hormigón, puede iniciar o acelerar la descomposición de etringita ya formada para liberar otros compuestos como carboaluminatos insolubles y sulfatos solubles. En estos casos, la carbonatación puede provocar la migración de los sulfatos liberados a partes no carbonatadas de la estructura,

permitiendo una expansión y fisuración (*Skalny et al. 1996*). El efecto de la reacción álcali – árido ASR se mencionó en el punto sobre el efecto de los áridos y la estabilidad de la etringita.

### **3.7. MECANISMO EXPANSIVO GENERADO POR EL FENÓMENO DEF**

El mecanismo expansivo que genera la formación de etringita retrasada es el punto de mayor controversia que existe en torno a este tema. Dos son las principales teorías planteadas, Una atribuye la expansión a la presión de cristalización del crecimiento de la etringita en espacios disponibles y la otra supone una expansión uniforme de la pasta de cemento.

#### **3.7.1 Teoría de Expansión por Crecimiento de Cristales Macroscópicos.**

Esta primera teoría plantea que la presión que ejerce el crecimiento de cristales de etringita macroscópicos, en micro fisuras o espacios reducidos que se encuentran previamente en la interface árido – pasta, provocan tensiones expansivas contra las restricciones que ejercen los elementos microestructurales, esto provocaría un ensanchamiento de estas fisuras o vacíos y la consecuente expansión del hormigón. Los autores que proponen esta hipótesis aducen que un grado pequeño de sobresaturación de etringita es suficiente para provocar la expansión. De acuerdo a esta hipótesis se espera que la gran mayoría de los cristales presentes en las estructuras dañadas participen en el proceso expansivo, solo con la excepción de cristales depositados en espacios parcialmente llenos y espacios abiertos. Al mismo tiempo, según esta teoría, se espera que la mayoría de las grietas presentes en estructuras dañadas no sean una consecuencia directa del fenómeno expansivo. En estudios realizados mediante utilización de microscopios electrónicos, los autores que impulsan esta teoría plantean que las bandas de etringita encontradas alrededor de los áridos son parte de una red continua de grietas distribuidas a lo largo de la interface árido / pasta del hormigón, lo que según estos autores es incompatible con un crecimiento uniforme de la pasta (*Lawrence et al. 1997, Diamond 1996, Diamond 2002*).

Sin embargo, son varios los argumentos en contra de esta hipótesis. La idea de que es el crecimiento de la etringita alrededor de los áridos lo que provoca la expansión es cuestionada. Por una parte, si esto fuera correcto, se generarían grietas radiales a partir de los áridos en lugar de discontinuidades o vacíos entre la matriz y superficie de las partículas. Por otro lado, se ha determinado que el tamaño de estos vacíos es proporcional al diámetro de los áridos, lo que implica una expansión de la pasta y además se ha observado que estos espacios no necesariamente se encuentran llenos de etringita y finalmente se han obtenido expansiones en pastas de cementos sin agregados,

por lo que la presencia de áridos no es necesaria para que exista una posible expansión (Skalny et al. 1996, Scherer 2002, Johansen 2002, Famy et al. 2002, Taylor et al 2000)

Además, se sabe que la denominada presión de cristalización, durante la precipitación de un compuesto cristalino desde una disolución, requiere condiciones termodinámicas especiales, en que la fase que precipita debe encontrarse bajo presión y el producto de las actividades de la fase que precipita debe ser mayor en la disolución que en la disolución saturada (supersaturación). Si existen cristales que no estén bajo presión, estos crecerán hasta que el producto de las actividades descienda hasta alcanzar los valores correspondientes a una solución saturada, o en el caso de que de alguna manera se mantenga constante la supersaturación, hasta que los cristales afecten la pasta que los rodea. En sistemas como pastas de cemento, morteros y hormigones, es muy improbable mantener disoluciones supersaturadas y evitar nucleaciones homogéneas, por lo que es difícil entender que en el hormigón, siendo un material muy heterogéneo, pudieran prevalecer durante largo tiempo, las condiciones para el desarrollo de la presión de cristalización (Skalny et al 1996, Taylor et al. 2001).

### **3.7.2 Teoría de Expansión Homogénea de la Pasta de Cemento.**

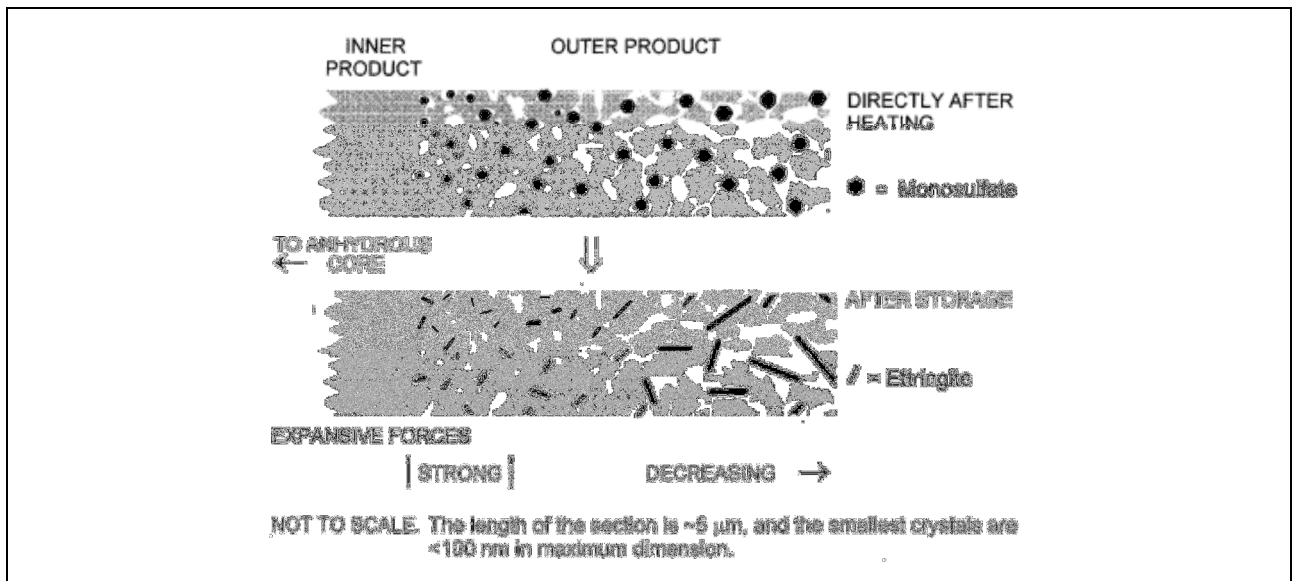
Esta teoría, la cual está respaldada por los principales investigadores en torno a este tema, plantea que la expansión de la pasta de cemento se desarrolla dejando vacíos alrededor de las partículas de árido, y posteriormente los cristales de etringita recristalizan llenando rápidamente los espacios y grietas generados por la expansión, dando como resultado las bandas de etringita que se observan fácilmente mediante microscopios electrónicos en hormigones afectados. Estas grietas y bandas llenas de etringita no contribuirían directamente con la expansión final (Skalny 2002). Varios estudios desarrollados principalmente por Johansen señalan que estos espacios son de tamaño proporcional al tamaño de los áridos y por lo tanto la expansión que se desarrolla en la pasta es uniforme (Johansen 2002). Sin embargo, otros autores indican que esta expansión generalmente no es uniforme (Taylor et al. 2001).

Evidencia de estudios sobre la microestructura de la pasta de cemento y del hormigón muestran que, al final de un tratamiento térmico, los monosulfatos están finamente mezclados con el Gel de Tobermorita (CSH) y que bajo las condiciones que provocan expansión, la etringita que se forma posteriormente también se mezcla estrechamente con este gel. Esta condición, sumado a la evidencia que muestra que una presión de cristalización considerable es más probable que se genere en espacios confinados con alta supersaturación, respalda la teoría de expansión de la pasta. Para el caso del fenómeno DEF, se plantea que el tamaño de los poros sub microscópicos en los que se darían estas condiciones está en el rango de aproximadamente 50 -100 nm (Taylor et al. 2000, Famy et al. 2002).

En la Figura 3.15 se puede ver un diagrama que ilustra el proceso expansivo sugerido, en la imagen superior se ve una representación de parte de la microestructura de la pasta inmediatamente después de un tratamiento térmico. Los hexágonos negros representan cristales de monosulfato presentes en el producto externo, las zonas sombreadas representan todas las demás fases sólidas, mientras que las áreas blancas corresponden a poros. En la imagen se puede ver que cualquier etringita formada previamente se encuentra disuelta por el calor. Además, una gran parte del  $SO_3$  y  $Al_2O_3$  es absorbido por el Gel de Tobermorita (CSH).

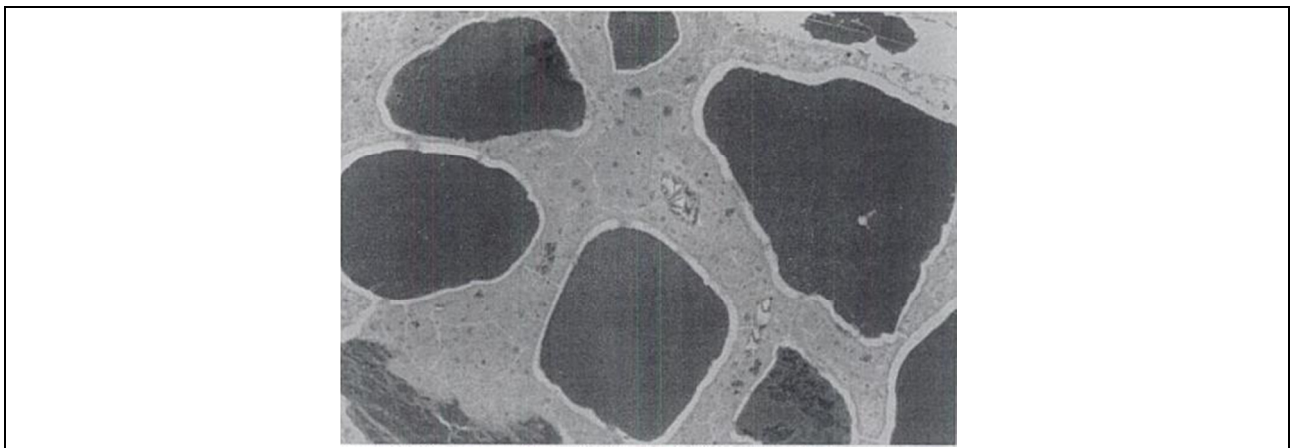
En pastas curadas a alta temperatura, el Gel de Tobermorita (CSH) interno producto de la hidratación (interno porque corresponde al producto que se genera dentro de las fronteras originales del grano de cemento) está rodeado por una capa relativamente densa de Gel de Tobermorita (CSH) exterior producto de la hidratación, que corresponde al producto que se genera fuera de las fronteras originales del grano de cemento en espacios originalmente ocupados por agua. Las condiciones ideales para provocar una alta presión de crecimiento se maximizan con las densas capas de producto externo que rodean al producto interno, además, como se observa en la misma imagen, a medida que se aumenta la distancia desde el producto interno, la textura del producto externo es más abierta, por esta razón, las condiciones más favorables para una presión alta se encuentran a una menor distancia del producto interno, lugar en el que se desarrollan las mayores fuerzas expansivas (*Taylor et al 2000*).

En la imagen inferior de la Figura 3.15 , se ve una representación de la situación posterior al almacenamiento y la exposición a humedad. Los monosulfatos son liberados desde el Gel de Tobermorita (CSH) y en morteros expansivos curados térmicamente se observa un significativo número de pequeños cristales de etringita intercalados en el Gel de Tobermorita (CSH). Este crecimiento en pequeños poros submicroscópicos puede causar expansión dada las condiciones de confinamiento y supersaturación. Estos cristales de etringita submicroscópicos no son visibles fácilmente con los métodos clásicos de estudio como los microscopios electrónicos (*Taylor et al. 2000, Famy et al. 2002*).



**Figura 3.15. Ilustración del mecanismo expansivo sugerido por la teoría de expansión de la pasta de cemento. (Fuente: Taylor et al. 2001)**

En la Figura 3.16 se puede ver como la pasta se expande y se separa de las partículas de árido creando vacíos alrededor de estas. Una vez comenzado el proceso expansivo, condiciones de alta humedad favorecen un proceso continuo de disolución de los pequeños cristales de etringita y su posterior recrystalización en espacios disponibles. Esta etringita secundaria no participa en el mecanismo expansivo sino que es una consecuencia de este proceso. La etringita responsable de la expansión es solo una porción de la etringita detectable en una estructura dañada. Por esta razón, es que no existe una correlación clara entre cantidad de etringita encontrada y nivel de expansión del elemento. En la Figura 3.17 se puede ver otra ilustración que esquematiza el fenómeno expansivo según la teoría planteada.



**Figura 3.16 Ilustración del mecanismo expansivo, expansión de la pasta genera vacíos alrededor de las partículas de árido. (Fuente: Johansen 2002).**

De acuerdo al mecanismo de expansión que plantea esta teoría, desde el punto de vista de la influencia sobre la velocidad de expansión y su resultado final, tres son considerados como los factores básicos que interfieren en este proceso:

- La química, que determinará la cantidad de etringita formada.
- La microestructura de la pasta, que determina las tensiones provocadas por la formación de etringita.
- La microestructura del hormigón, que determina la respuesta del material a estas tensiones.

Por lo tanto, el fenómeno expansivo dependerá del valor relativo entre las fuerzas expansivas y las que mantienen la estructura en su estado original, por lo que un hormigón débil o dañado previamente, será más susceptible a sufrir daños por la acción expansiva del fenómeno DEF (*Taylor et al. 2000*).

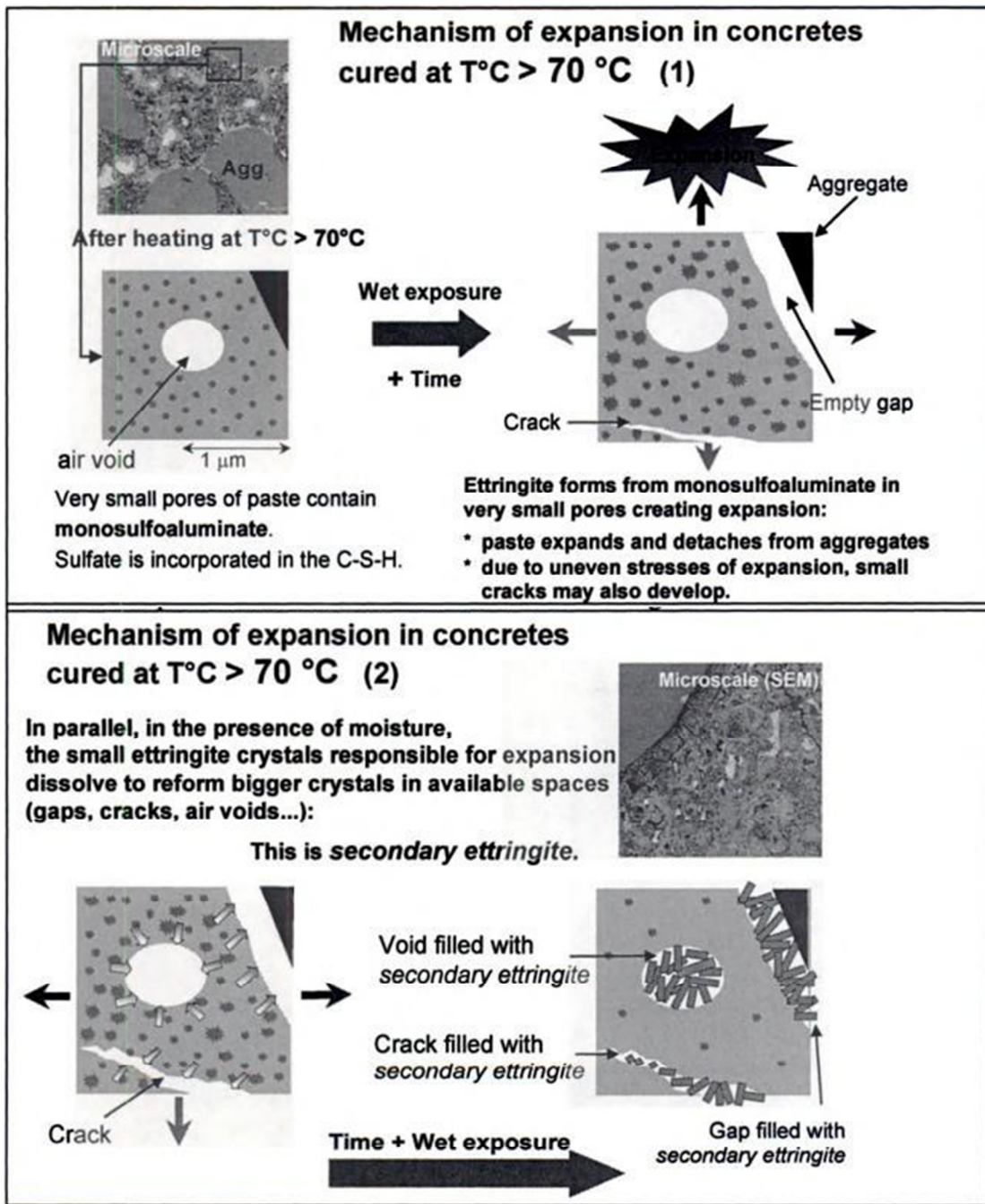


Figura 3.17. Mecanismo de expansión de la pasta de cemento por formación de etringita. (Fuente: Famy et al. 2002).

### 3.8. DETECCION DEL FENOMENO

Actualmente no existen ensayos normalizados que proporcionen información cuantitativa sobre la formación de etringita retardada (DEF) en elementos de hormigón. Sin embargo varias metodologías de ensayo han sido probadas y presentadas para evaluar el riesgo de expansiones provocadas por este fenómeno en elementos de hormigón. La mayor parte de estas metodologías requieren de al menos un año para poder evaluar el potencial expansivo de los hormigones estudiados. En general las metodologías de detección y reproducción del fenómeno considera la confección de probetas pequeñas de hormigón o mortero las cuales son sometidas a condiciones de altas temperaturas durante su etapa temprana, las cuales posteriormente son almacenadas en condiciones de alta humedad. Estas condiciones establecen los factores esenciales y necesarios para desencadenar este fenómeno. Luego, periódicamente, las probetas son controladas en su longitud para determinar su posible expansión en el tiempo.

Las distintas metodologías que se han aplicado se diferencian básicamente en el origen y tipo de probetas; tamaño y forma de las probetas; temperatura máxima aplicada; duración del tratamiento térmico y la aplicación de tratamientos adicionales. Respecto al tipo de probetas, de acuerdo a los estudios revisados, la mayor parte de ellos utiliza probetas de mortero de distinto tamaño, aunque existen algunos estudios que utilizan probetas de hormigón, las cuales pueden ser fabricadas directamente u obtenidas como testigos o núcleos extraídos de elementos reales o probetas de mayor tamaño. En cuanto al tamaño y forma de las probetas existe una gama bastante amplia. Se han utilizado tanto barras prismáticas como barras cilíndricas, sus tamaños pueden variar entre 16 mm y 110 mm en su ancho mientras que sus largos varían entre 160 mm y 286 mm. En la mayor parte de los estudios la temperatura crítica del ciclo térmico esta en torno a los 85°C variando entre los 80°C y 100°C. Otro parámetro que varía dependiendo del estudio es la duración y tipo de ciclo que se le aplica, la variedad es amplia, en general estos ciclos no duran menos de 6 horas, pudiendo extenderse por varios días. Incluso algunos estudios han intentado reproducir de manera fiel los ciclos de temperatura que puede sufrir un hormigón masivo producto del calor de hidratación o un hormigón prefabricado sometido a un tratamiento de curado al vapor. (*Pavoine et al. 2011*).

Como se menciona, la gran mayoría de las experiencias en cuanto a la detección de hormigones con susceptibilidad a experimentar este fenómeno son para un desarrollo a largo plazo. Sin embargo en 1992 Ross Duggan desarrolló una metodología que permite reproducir de manera acelerada el fenómeno de formación de etringita retardada (DEF), el cual permitiría obtener resultados en un periodo menor a 30 días y tener una idea del potencial desarrollo del fenómeno en un determinado hormigón. De acuerdo e este ensayo, llamado Ensayo Duggan una expansión de un 0,05% a los 21 días es un límite sugerido como indicativo de un comportamiento potencialmente expansivo. Sin embargo, este criterio es discutido por varios autores al considerar que el



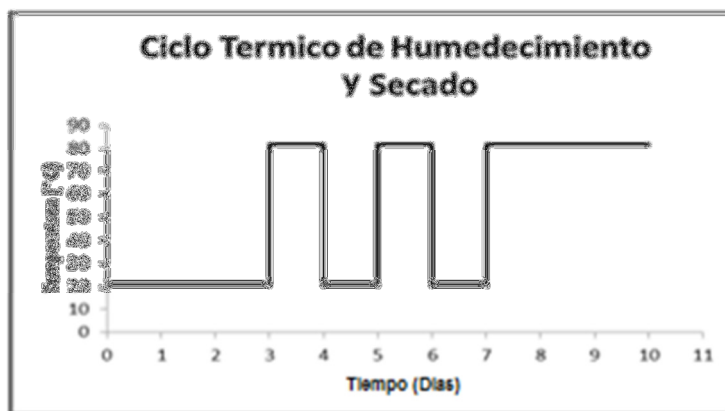
comportamiento de los cementos es variable por lo que un solo criterio de este tipo no es suficiente.

### **3.8.1 Ensayo Duggan.**

El ensayo consiste en fabricar probetas de hormigón o mortero de cemento las que son sometidas a un ciclo de curado acelerado a alta temperatura para luego extraer núcleos los cuales son sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, que pretenden alterar la microestructura y acelerar el fenómeno. Posteriormente los núcleos son almacenados bajo agua y controlados en su longitud durante 21 días.

Para cada hormigón estudiado, el ensayo original considera la confección de al menos 5 probetas prismáticas de 3 x 3 x 15 pulgadas (7,6 x 7,6 x 38 cm). Una vez construidas estas son mantenidas a temperatura ambiente durante 2 horas. Posteriormente son sometidas a un ciclo de curado acelerado en baño de agua, que comienza con una elevación de temperatura durante 2 horas hasta alcanzar los 85°C, la temperatura es mantenida en este nivel durante 4 horas para luego someterlas a enfriamiento y dejarlas al aire a temperatura ambiente.

Una vez finalizado el tratamiento de curado acelerado de las probetas, se procede a extraer a cada una de ellas testigos cilíndricos con  $50 \pm 5$  mm de largo y un diámetro de 22 mm. Estos núcleos son posteriormente sometidos a varios ciclos de humedecimiento y secado, el que comienza con 3 días de almacenamiento bajo agua a una temperatura de 21°C, seguido de 3 ciclos de secado y humedecimiento, como el que se puede ver en la siguiente figura.



**Figura 3.18. Ciclo Duggan de Humedecimiento y Secado.**

Terminado los ciclos de humedecimiento y secado, las probetas son almacenadas bajo agua para tomar las mediciones de expansión. La metodología original considera como día 0 al primer día luego de los 10 días de los ciclos de humedecimiento y secado. La

medición en este día es considerada como el largo inicial para calcular la expansión de las probetas.

Como ya menciono, la metodología original considera que una expansión de 0,05% a los 21 días de medición es un indicativo de un potencial comportamiento expansivo debido al fenómeno de formación de etringita retrasada, aunque este criterio es muchas veces discutido.

Estudios posteriores basados en esta metodología, aplicados tanto a hormigones como moteros, han concluido lo siguiente:

- La formación de etringita retardada (DEF) es la causa principal de la expansión de morteros u hormigones sometidos al Ensayo Duggan.
- El cemento, con las reacciones de los componentes calcio aluminosos con los sulfatos procedentes de la adición de yeso constituye el principal responsable de la expansión por este fenómeno.
- Los severos ciclos de humedecimiento y secado provoca la aparición de microgrietas, las cuales permiten una aceleración del fenómeno, esta se debe al debilitamiento de la microestructura, lo que facilita la entrada de agua y el aumento de los potenciales espacios para la nucleación de la etringita.
- La cantidad de etringita presente y la frecuencia de microfisuración son proporcionales a las expansiones finales medidas en las probetas de hormigón.
- El contenido de  $SO_3$  y  $K_2O$ , y la relación molar  $SO_3/A_2O_3$  son valores determinantes en las expansiones obtenidas mediante la metodología del Ensayo Duggan.

Sin embargo algunos autores han criticado la metodología planteada por Duggan y han llamado a tener ciertas consideraciones respecto a este ensayo. Se ha mencionado que el tamaño de los núcleos utilizados no son representativos de una estructura de hormigón, pudiéndose magnificar el efecto de este fenómeno al tratarse de testigos tan pequeños, la tendencia es aumentar el tamaño de estos, lo cual además facilita la medición y el cálculo de la expansión. Por otra parte se ha criticado el hecho de obtener los testigos mediante la extracción a partir de elementos mayores, esta extracción podría causar daños en los núcleos que alteren los resultados obtenidos. Se ha considerado que los ciclos de temperatura que incluye la metodología son demasiado severos y no son representativos de la realidad, sin embargo por tratarse de un ensayo acelerado es entendible la aplicación de condiciones más severas. Finalmente existe una crítica en cuanto al punto cero de medición de la expansión, la medición inicial inmediatamente después del ciclo de secado de 3 días puede verse alterada al no considerar una posible contracción de las probetas producto de estos severos ciclos de humedecimiento y secado.

La metodología que se utilizará para el desarrollo experimental de este trabajo de título estará basada en el Ensayo Duggan, sin embargo se realizarán ciertas modificaciones, estas modificaciones estarán justificadas en mejorar ciertos aspectos de la metodología como también en facilitar el desarrollo de ésta de acuerdo a los recursos con que se dispone.

# **CAPÍTULO 4: PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO**

## **EXPERIMENTAL**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se planteará un programa experimental que permitiría verificar la existencia de una influencia inhibidora de las adiciones incorporadas a los cementos chilenos sobre el fenómeno de formación de etringita retardada (DEF) en el hormigón expuesto a curado a altas temperaturas.

Para esto se fabricarán probetas de mortero utilizando cementos con distintas proporciones de adición, en este caso se estudiará el efecto de las adiciones puzolánicas (puzolanas naturales). El procedimiento se basará en el Método Duggan, el cual permite determinar, de forma acelerada, el potencial expansivo, debido al fenómeno DEF de los distintos cementos estudiados. Esta aceleración del proceso se logra, como se explico anteriormente, mediante la aplicación de varios ciclos de secado – humedecimiento los que alteran la microestructura de la pasta de cemento facilitando el desarrollo del fenómeno en estudio. Se debe mencionar que la metodología original será modificada en algunos aspectos, esto con el objetivo de mejorar algunos puntos conflictivos de la metodología así como también para facilitar su desarrollo de acuerdo a los recursos del laboratorio.

Dentro de la caracterización de los cementos chilenos, se realizará un análisis químico a los cementos contemplados en el estudio, con el objetivo de determinar la influencia de su composición química y contenido de adiciones en la eventual expansividad debida al fenómeno DEF que se intenta generar en forma acelerada. Paralelamente se realizaran ensayos, para determinar el efecto de un curado a alta temperatura y la influencia de las adiciones incorporadas, en las propiedades mecánicas de hormigones confeccionados con los cementos en estudio.

### **4.2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente trabajo de investigación considera la aplicación de un método que mediante varios ciclos térmicos, facilita de manera acelerada la generación del fenómeno expansivo DEF, al imponer a las probetas condiciones de curado a altas temperaturas. Con este procedimiento se puede determinar el potencial expansivo de un mortero de cemento previamente sometido a un tratamiento térmico a temperaturas de 85°C.

Se trabajará con cementos comerciales disponibles actualmente en Chile. Se utilizarán cementos con adiciones puzolánicas de la marca Melón, los cementos seleccionados poseen distintas proporciones de adición. Estos cementos serán sometidos a ensayos de

laboratorio con el objetivo de conocer su composición química y así determinar la composición de fases de los productos de hidratación formados y su influencia en el desarrollo del fenómeno DEF.

Paralelamente se confeccionarán probetas cúbicas de un hormigón patrón, las que se ensayarán a compresión a los 28 días luego de ser sometidas a un ciclo térmico a alta temperatura. Esto se realizará con el objetivo de conocer el efecto de las altas temperaturas iniciales sobre la resistencia mecánica del hormigón y al mismo tiempo poder verificar como influyen las temperaturas altas de curado en la resistencia de hormigones con y sin adiciones puzolánicas.

### **4.3. VARIABLES DE ESTUDIO**

Para la aplicación del ensayo de expansividad, se realizará una modificación de la metodología original, en este caso en lugar de hormigón, se utilizarán morteros confeccionados con una arena gruesa y se utilizará una razón agua / cemento de 0,50.

Una parte de las probetas fabricadas se almacenarán sumergidas bajo agua a temperatura ambiente como elementos de control inmediatamente después de la fabricación, el resto serán sometidas a un proceso de curado acelerado. Posteriormente, las probetas serán sometidas a varios ciclos de humedecimiento- secado, según la Metodología Duggan.

Para la fabricación de los hormigones para los ensayos de compresión, se utilizarán áridos con un tamaño máximo de  $\frac{3}{4}$ " (19 mm). Se trabajará con una razón agua/cemento de 0,45.

Una parte de las probetas fabricadas se almacenarán en una cámara húmeda como elementos de control inmediatamente después de la fabricación, el resto serán sometidas a un proceso de curado acelerado diferenciado, una parte será sometida a un ciclo de 3 días mientras que el resto será sometida a un ciclo de 7 días. Posteriormente se realizarán ensayos de compresión a los 28 días. Con esto se pretende conocer el efecto de las altas temperaturas iniciales de curado en la resistencia del hormigón.

### **4.4. MATERIAS PRIMAS**

#### ***4.4.1 Cemento***

Para este trabajo se utilizarán cementos comerciales de la marca Melón, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 4.1. Clasificación de Cementos Utilizados en el Estudio.**

<b>Código de Identificación</b>	<b>Nombre Comercial</b>	<b>Clasificación según NCh 148 Of.68</b>	<b>Clasificación según ASTM</b>
C1	Cemento Melón Súper	Cemento portland de alta resistencia.	I
C2	Cemento Melón Extra	Cemento portland puzolánico de alta resistencia	IP
C3	Cemento Melón Especial	Cemento puzolánico corriente	P

#### **4.4.2 Áridos**

Para la fabricación de los hormigones y morteros, se utilizarán áridos disponibles en Santiago de Chile. Estos áridos corresponden a una gravilla con un tamaño máximo de 3/4" (19 mm) y una arena gruesa. Estos áridos serán mezclados en una proporción que permita obtener el diseño de mezcla requerido.

#### **4.4.3 Mezclas e Identificación de las Muestras.**

Con cada uno de los cementos escogidos se realizan dos tipos de probetas, por una parte se confeccionarán barras de mortero para los ensayos de expansividad mientras que para los ensayos de compresión se confeccionaran probetas cubicas de hormigón.

Las barras de mortero serán confeccionadas con una proporción en peso de cemento/arena de 1/3. Cada mezcla considera 500 g de cemento; 250 g de agua y 1500 g de arena. Las cantidades de agua y arena serán ajustadas de acuerdo a la absorción de la arena, considerando su condición saturada superficialmente seca.

Con cada tipo de cemento se fabricarán 8 barras prismáticas de mortero las que tendrán un tamaño de 2,5 x 2,5 x 25 cm. Éstas serán identificadas de acuerdo al tipo de cemento utilizado (C1, C2 o C3). La mitad de estas serán marcadas como elementos de control con la letra C, el resto será identificado con la letra E, para ser sometidas a la metodología del ensayo de expansividad.

Por otra parte para los ensayos de compresión, con cada uno de los cementos escogidos se realizaran mezclas con razón agua/cemento 0,45. Con cada una de las mezclas se fabricarán 6 probetas cubicas de 15x15x15 cm para ser sometidas a ensayos de compresión. Esto da un total de 21 litros de cada una de las 3 mezclas.

Las dosificaciones para cada una de las mezclas se realizan basadas en las razones agua / cemento establecidas, un árido con un tamaño máximo de 20 mm considerando su condición saturada superficialmente seca y una trabajabilidad expresada en un descenso de cono de  $8 \pm 3$ . Las dosificaciones planteadas son las siguientes.

**Tabla 4.2. Dosificaciones Mezclas de Hormigón.**

<b>Tipo de Cemento</b>	<b>Identificación</b>	<b>Razón A/C</b>	<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Gravilla (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Arena (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso Especifico Cemento (g/ml)</b>
Cemento Melón Súper	C1	0,45	190	422	893	893	3,08
Cemento Melón Extra	C2	0,45	190	422	881	881	2,9
Cemento Melón Especial	C3	0,45	190	422	869	869	2,76

Las probetas fabricadas se identifican de acuerdo al tipo de cemento utilizado (C1, C2, C3). Para cada serie de probetas se dejan 2 como muestras de control, las que se identifican con la letra c; 2 para ser sometidas a un ciclo de temperatura de 3 días, estas serán identificadas con el número 3 y las restantes dos serán sometidas a un ciclo térmico de 6 días, estas serán identificadas con el número 6.

Un resumen de las probetas que se utilizarán en el estudio se presenta en la siguiente figura.



**Figura 4.1. Resumen e identificación de Probetas para cada tipo de cemento.**



#### **4.4.4 Estimación de Materiales**

De acuerdo a las probetas necesarias para el estudio se estima un volumen total de hormigón por cada tipo de mezclas de 21 litros, sin embargo, para un correcto trabajo, la mezcladora requiere una colada mínima de 40 litros. Por lo que de acuerdo a las dosificaciones planteada para cada caso, se estima que la cantidad necesaria de cada tipo de cemento corresponde a 18 kg y la cantidad total de áridos para la fabricación de todas las probetas del estudio es de 398 kg. (Considerando la gravilla y arena).

#### **4.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS**

Para tener una caracterización de los cementos, se obtendrán las siguientes particularidades de cada uno de ellos.

- Peso específico relativo, según Nch154 Of69.
- Superficie específica, según Nch159 Of70.
- Agua de consistencia normal, según Nch151 Of69.
- Tiempo de fraguado, según Nch152 Of71.
- Perdida por calcinación, según Nch147 Of69.
- Trióxido de azufre, según Nch147 Of69.
- Residuo insoluble, según Nch147 Of69.

#### **4.6. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES**

Para tener una caracterización de los hormigones frescos, se realizaran los siguientes ensayos.

- Densidad
- Asentamiento de cono
- Contenido de aire

#### **4.7. CARACTERIZACIÓN DE LOS ARIDOS**

Para tener una caracterización de los áridos utilizados se obtendrán las siguientes características físicas.

- Densidad real. De acuerdo a NCh 1117.E Of. 77 y NCh 1239 Of. 77.
- Densidad aparente. De acuerdo a NCh 1116.E Of. 77.
- Absorción. De acuerdo a NCh 1117.E Of. 77 y NCh 1239 Of. 77.

## **4.8. ENSAYO DE EXPANSIVIDAD**

El ensayo de potencial expansivo a causa del fenómeno de formación de etringita retardada (DEF) se basa en la metodología desarrollada por Ross Duggan llamada Método Duggan. Sin embargo, al procedimiento experimental utilizado en el presente estudio, se le ha incorporado algunas modificaciones que no alteran los fundamentos básicos de este ensayo. Un esquema del desarrollo experimental se puede ver en la Figura 4.4.

### ***4.8.1 Preparación de Probetas***

Como modificación a la metodología original, se fabricarán barras de mortero en lugar de hormigón. Con cada uno de los tipos de cemento seleccionados se fabricará un total de 8 barras de mortero. Esta modificación se justifica por una parte en la mayor facilidad para obtener probetas del tamaño adecuado para realizar la experiencia y las posteriores mediciones, por otra parte se elimina una posible influencia de los áridos gruesos en el desarrollo del fenómeno.

Cada serie será fabricada en forma paralela y serán desmoldadas tan pronto como sea posible. Una vez desmoldadas, en cada serie se seleccionan 4 barras que serán utilizadas como elemento de control, estas serán individualizadas con el código de identificación del tipo de cemento (C1, C2 O C3) y con una letra C como elemento de control, además serán individualizadas con un número correlativo del 1 al 4 para diferenciarlas. Estas probetas serán almacenadas inmediatamente bajo agua a temperatura ambiente.

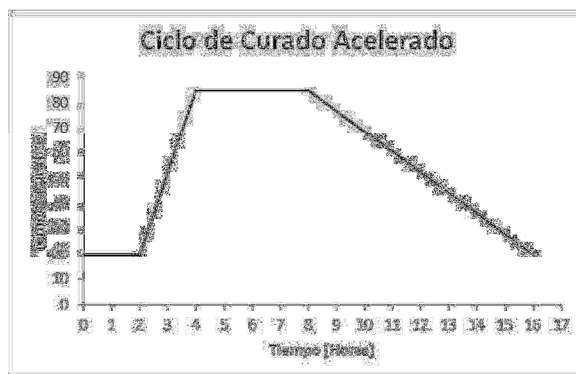
Las cuatro probetas restantes de cada serie serán utilizadas para el ensayo de expansividad, estas serán individualizadas con el código de identificación del tipo de cemento (C1, C2 O C3) y con la letra E, como elementos de ensayo, además serán individualizadas con un número correlativo del 1 al 4 para diferenciarlas.

Cada una de las probetas de mortero incluirá piezas de tope en los centros de ambos extremos, estas piezas (topes) de acero inoxidable que materializa los puntos de medición son utilizadas para medir sus expansiones mediante un comparador de mediciones, esto permitirá disminuir el error asociado.

### ***4.8.2 Tratamiento Térmico***

Una vez desmoldadas las probetas de ensayo, éstas serán sumergidas en agua a temperatura ambiente durante un periodo de dos horas, luego serán sometidas a un proceso de curado acelerado mediante la aplicación de un ciclo térmico, este ciclo consistirá en una elevación paulatina de temperatura hasta 85° C durante 2 horas,

manteniendo esta temperatura durante 4 horas, seguido de un enfriamiento durante 8 horas hasta alcanzar 21° C. Un esquema de este tratamiento térmico ve en la Figura 4.2.



**Figura 4.2. Ciclo Térmico de Curado Acelerado.**

Se debe mencionar que la aplicación de este ciclo térmico se desarrolla con la precisión que permiten los equipamientos disponibles en el laboratorio, por lo que podrá diferir, aunque no significativamente, de la metodología original.

Una vez finalizado el tratamiento térmico de curado acelerado y a diferencia de la metodología original, serán tomadas medidas referenciales con el objetivo de considerar una posible contracción por secado, la cual probablemente alteraría las mediciones de expansión posterior. Sin embargo, la medición inicial seguirá considerándose de acuerdo a la metodología original.

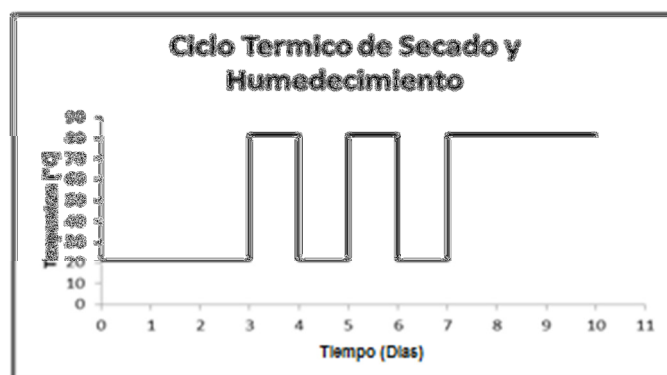
### ***4.8.3 Ciclos de Humedecimiento y Secado***

Posterior al tratamiento térmico de curado acelerado y las mediciones referenciales, las probetas en estudio son sometidas a varios ciclos de humedecimiento y secado en horno seco.

El ciclo térmico con secado al horno que implica el método Duggan, a los que deben ser sometidas las probetas y que reproduce de forma acelerada los efectos expansivos de las altas temperaturas de curado, es el siguiente:

- 3 días en agua a 21° C
- 1 día a 82° C
- 1 días en agua a 21° C
- 1 día a 82° C
- 1 días en agua a 21° C
- 3 días a 82° C

Cada vez que son retiradas las muestras del horno se deben dejar una hora a temperatura ambiente para luego ser sumergida en agua a temperatura ambiente.



**Figura 4.3** Ciclo de Secado - Humedecimiento.

#### ***4.8.4 Medición y Almacenamiento***

Finalizados los 3 días de secado al horno seco, que dan por terminados los ciclos de humedecimiento y secado, las probetas serán dejadas al aire hasta alcanzar temperatura ambiente, en este momento se tomarán mediciones, que servirán como medición inicial para determinar las expansiones a lo largo del tiempo.

Posteriormente, las probetas serán almacenadas bajo agua a 21°C y se continuará realizando mediciones periódicas con el objetivo de determinar la expansión de estas. Para determinar los resultados se tomarán medidas cada 2 o 3 días, tanto a los elementos de ensayo como a los elementos de control. Experiencia previa sobre este método indica que mediciones a los 20 días, desde el fin del ciclo térmico, son suficientes como para concluir acerca del potencial de expansión por formación retardada de etringita.

### **4.9. ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA**

Adicionalmente al ensayo de expansividad se realizan ensayos de compresión, estos ensayos tienen como objetivo determinar el efecto de temperaturas de curado por sobre 80°C y el tiempo de exposición (3 o 6 días), sobre las propiedades mecánicas del hormigón.

Los procedimientos para la preparación de mezclas y confección de probetas estarán basados en la Norma Chilena NCh 1018 mientras que los procedimientos para los ensayos de compresión estarán basados en la Norma Chilena NCh 1037.

Un esquema del desarrollo experimental se puede ver en la Figura 4.4.

#### ***4.9.1 Preparación de Mezclas y Confección de Probetas***

Con cada uno de los cementos seleccionados se confeccionan las 3 mezclas de hormigón planteadas, y se obtiene el conjunto de probetas contempladas.

Para cada una de las mezclas se confeccionan un total de 6 probetas cubicas de un tamaño de 15 x 15 x 15 cm. Luego de 24 horas desde la fabricación, las probetas son desmoldadas, dos de ellas se identifican como muestras de control, estas serán individualizadas con el código de identificación del tipo de cemento (C1, C2 O C3) y con una letra C como elemento de control, además serán individualizadas con letra “a” o “b” para diferenciarlas entre ellas. Estas probetas son posteriormente almacenadas en una cámara húmeda a una temperatura controlada de 21°C, mientras que las cuatro probetas restantes quedan sometidas a un ciclo inicial a altas temperatura (85°C).

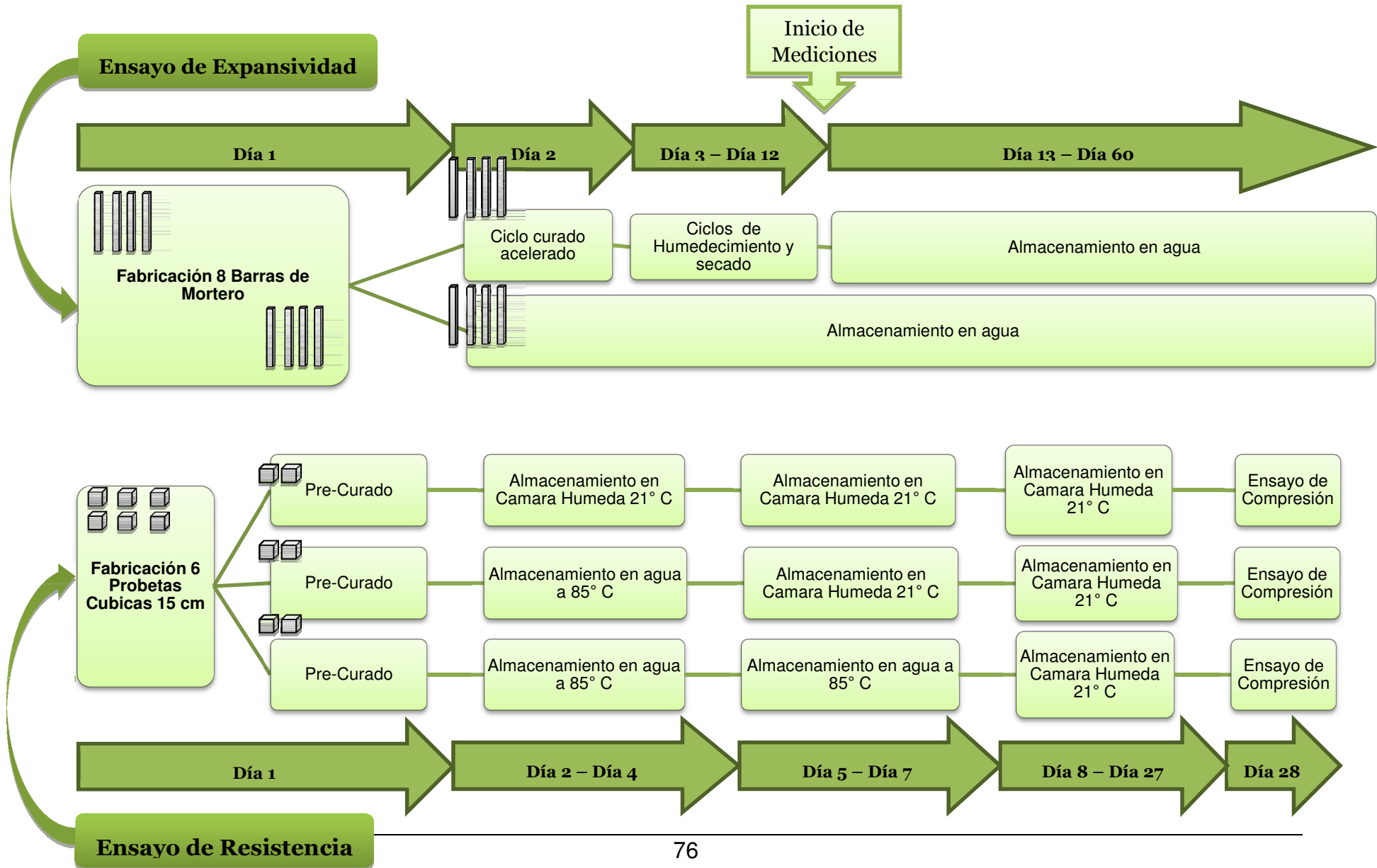
#### ***4.9.2 Ciclos de Temperatura y Ensayos de Compresión***

Luego de seleccionas las probetas de ensayo, dos distintos ciclos de temperatura serán aplicados. Dos de ellas serán sometidas a un tratamiento térmico de 3 días con una temperatura máxima de 82°C, mientras que las dos restantes serán sometidas a las mismas condiciones pero con una duración de 6 días. Éstas serán individualizadas con el código de identificación del tipo de cemento (C1, C2 O C3); con una letra E como elemento de ensayo, además serán individualizadas con letra “a” o “b” para diferenciarlas entre ellas y con un numero “3” o “6” dependiendo de la duración del ciclo a las que serán sometidas.

Para la aplicación de los tratamientos térmicos, se utilizarán estanques de agua equipados con calefactores para el control de la temperatura. Una vez instaladas las probetas, la temperatura será subida paulatinamente hasta alcanzar los 85° C. Luego de 3 días la mitad de las probetas serán retiradas y posteriormente almacenadas en una cámara húmeda a temperatura controlada, mientras que las probetas restantes serán retiradas del estanque luego de 3 días adicionales.

Finalizados los ciclos de curado a una temperatura de 85°C, todas las probetas son almacenadas en cámara húmeda a temperatura controlada durante 24 días hasta completar los 28 días de maduración. Una vez completados los 28 días de maduración, cada una de las probetas será sometida a ensayos de compresión según lo indicado en la norma NCh 1037 of77, para cada condición serán ensayadas 2 probetas cubicas.

Figura 4.4. Esquema de desarrollo experimental para cada mezcla de hormigón.



# CAPÍTULO 5: DESARROLLO DEL TRABAJO

## EXPERIMENTAL

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detallarán los procedimientos realizados para la obtención de los resultados de este estudio. Esta metodología está basada en el planteamiento experimental detallado en el capítulo anterior. Con el objetivo de tener una visión global del trabajo realizado, se detallarán los procedimientos adoptados y las características de los materiales y equipamientos utilizados.

### 5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

#### 5.2.1 Cementos

Como se menciona en el capítulo anterior, los cementos que se utilizan en este estudio corresponden a cementos comerciales, se escogieron 3 cementos clasificados según NCh 148 en relación al porcentaje de puzolana incorporada como adición junto con el yeso y el clínquer en la etapa de molienda. Los cementos que forman parte del estudio son los siguientes:

Tabla 5.1. Cementos Utilizados en el Desarrollo Experimental.

Nombre Comercial	Código de Identificación	Clasificación según NCh 148 Of.68	Contenido de Puzolana (%)
Cemento Melón Súper	C1	Cemento portland de alta resistencia.	0
Cemento Melón Extra	C2	Cemento portland puzolánico de alta resistencia	13
Cemento Melón Especial	C3	Cemento puzolánico corriente	39

Los valores que se presentan a continuación están basados en datos de control para la certificación de cementos producidos durante marzo del año 2012, misma fecha en que fueron fabricados los cementos que se utilizaron en el presente estudio. Tanto los ensayos físicos como químicos fueron realizados entre Marzo y Mayo del años 2012 en la

Sección Tecnología del Cemento y Hormigón de IDIEM. Los informes de ensayo oficiales se encuentran en los anexos de este trabajo.

Las propiedades físicas del cemento que establece la Norma chilena NCh 148 se presentan a continuación.

**Tabla 5.2. Propiedades Físicas Cementos del Estudio**

<b>Propiedad</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
<b>Peso Especifico (g/ml)</b>	3,08	2,9	2,76
<b>Superficie Especifica (cm<sup>2</sup>/g)</b>	4350	4950	4300
<b>Tiempo de Fraguado Inicial (hh:mm)</b>	01:30	1:40	3:00
<b>Tiempo de Fraguado Final (hh:mm)</b>	02:20	2:40	3:50
<b>Consistencia Normal (%)</b>	30	33	33

Las normas utilizadas para determinar cada una de las propiedades presentadas son las siguientes:

- **Peso Especifico:** NCh 154.Of1957 Cemento – Determinación del peso específico relativo.
- **Superficie Especifica:** NCh 159.Of1970 Cemento – Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine.
- **Tiempo de Fraguado:** NCh 152.Of1957 Cemento – Método de la determinación del tiempo de fraguado.
- **Consistencia Normal:** NCh 151.Of1968 Cemento – Método de la determinación de la consistencia normal.

Las propiedades mecánicas, establecidas en NCh 148, se presentan en la Tabla 5.3.



**Tabla 5.3. Propiedades Mecánicas Cementos del Estudio.**

<b>Propiedad</b>	<b>Edad (días)</b>	<b>Melón Súper (C1)</b>	<b>Melón Extra (C2)</b>	<b>Melón Especial (C3)</b>
<b>Resistencia a la Compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	3	332	380	185
	7	394	428	231
	28	481	511	332
<b>Resistencia a la Flexión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	3	62	61	36
	7	67	71	46
	28	77	78	68

Para determinar las propiedades mecánicas de los cementos estudiados se utilizó la Norma chilena NCh 158.Of1967 Cemento – Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento.

Las propiedades químicas, que se establecen como requisitos en NCh 148 , de los cementos estudiados se presentan en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4. Propiedades Químicas de los Cementos en Estudio.**

<b>Propiedad</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
<b>Perdida por Calcinación (%)</b>	1,1	2,3	3,3
<b>Residuo Insoluble (%)</b>	0,8	12,19	36,93
<b>Contenido de SO<sub>3</sub> (%)</b>	2,57	3,24	1,97
<b>Contenido de MgO (%)</b>	1,5	-	-

Para determinar las propiedades químicas de los cementos estudiados se utilizó la Norma chilena NCh 147.Of1969 Cemento – Análisis químico.

Adicionalmente, para caracterizar de mejor manera los cementos estudiados se solicitaron al fabricante datos respecto de la composición porcentual de los óxidos

principales presentes en cada tipo de cemento, información que se presenta en la Tabla 5.5

**Tabla 5.5. Análisis Químico, Óxidos Principales. Cementos del Estudio.**

Composición Óxidos (%)	Cemento		
	C1	C2	C3
SiO <sub>2</sub>	21,00	25,23	38,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,11	6,27	8,88
CaO	63,60	57,15	40,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,86	2,58	2,82
SO <sub>3</sub>	2,60	3,57	2,33
MgO	1,95	2,09	1,59
Na <sub>2</sub> O	0,51	0,91	1,78
K <sub>2</sub> O	0,40	0,66	1,62

### 5.2.1 Áridos

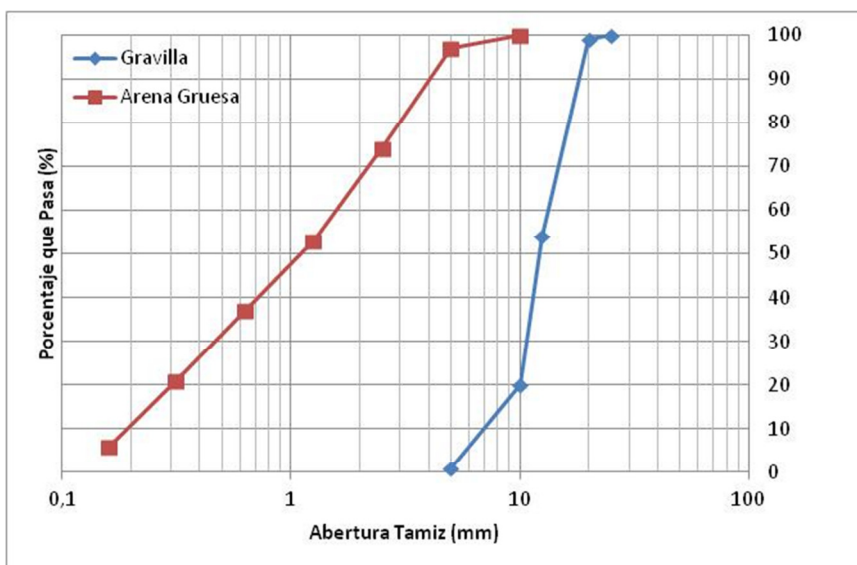
Los áridos que se utilizan para la confección de morteros y hormigones son proporcionados a IDIEM por la empresa Rio Maipo y corresponden a una gravilla con un tamaño máximo nominal de 20 mm y una arena gruesa con un tamaño máximo nominal de 5 mm.

La granulometría de lo áridos utilizados para el estudio se muestra en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.6. Granulometría de los Áridos.**

Tamiz (")	Tamiz (mm)	% Que Pasa	
		Gravilla	Arena
2"	50	-	-
1 1/2"	40	-	-
1"	25	100	-
3/4"	20	99	-
1/2"	12,5	54	-
3/8"	10	20	100
4	5	1	97
8	2,5	-	74
16	1,25	-	53
30	0,63	-	37
50	0,315	-	21
100	0,16	-	6

En la Figura 5.1 se presentan las curvas granulométricas de los áridos utilizados en este estudio.



**Figura 5.1. Granulometría de los Áridos.**

Para determinar la granulometría de los áridos utilizados en el estudio se utilizó la Norma chilena NCh 165.Of1977 Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría.

Junto con la granulometría se obtuvo una serie de características físicas de los áridos utilizados para el estudio. En la Tabla 5.7 se resumen los resultados de los análisis físicos realizados para la gravilla y arena.

**Tabla 5.7. Propiedades Físicas de los Áridos.**

<b>Propiedad</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>
Tamaño Máximo Nominal (mm)	20	5
Módulo de Finura	6,8	3,03
Densidad Real Árido sss (kg/m <sup>3</sup> )	2726	2700
Densidad Real Árido Seco (kg/m <sup>3</sup> )	2698	2664
Densidad Neta (kg/m <sup>3</sup> )	2775	2765
Absorción de Agua (%)	1,04	1,37
Densidad Aparente Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1596	1791
Densidad Aparente Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1502	1653
Contenido de Huecos (%)	44,3	38

Las normas utilizadas para determinar cada una de las propiedades presentadas son las siguientes:

- Módulo de finura: NCh165.Of1977 Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría.
- Densidad real, densidad neta y absorción de agua de la gravilla: NCh1117.Of1977 Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.
- Densidad real, densidad neta y absorción de agua de la arena: NCh1239.Of1977 Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las arenas.
- Densidad aparente: NCh1116.Of1977 Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidad aparente.
- Contenido de huecos: NCh1326.Of1977 Áridos para morteros y hormigones – Determinación de huecos.

### ***5.2.2 Agua de Amasado***

Para la confección de los hormigones y morteros necesarios para el estudio se utilizó agua potable a una temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

## **5.3. ENSAYO DE EXPANSIVIDAD**

A continuación se presenta una descripción de los procedimientos seguidos y de los equipamientos utilizados para determinar el potencial expansivo inducido por la formación de etringita retardada de los cementos estudiados. Como se ha mencionado el procedimiento que se realizó esta basado en la metodología denominada Ensayo Duggan pero se establecen algunas modificaciones a ésta.

### ***5.3.1 Dosificación de Materiales.***

Las dosificaciones utilizadas para la confección de los morteros de este ensayo son idénticas para cada uno de los cementos estudiados independiente de sus propiedades, de esta forma se pretende disminuir la variabilidad de los resultados productos de las dosificaciones.

La relación agua/cemento que se utilizó para la confección de morteros es de 0,5, en peso mientras que la relación arena/cemento es de 3. Para el caso de la arena se considera su condición saturada superficialmente seca.

Para cada tipo de cementos se considera la confección de un total de 2,250 kg de mortero. Para esta cantidad de mezcla se requiere la siguiente dosificación de los materiales.

**Tabla 5.8. Dosificación de Materiales para Morteros.**

<b>Material</b>	<b>Dosificación en Peso (kg)</b>
Agua	0,250
Cemento	0,500
Arena	1,500

El volumen teórico obtenido con esta dosificación varia entre 0,97 y 0,99 litros.

### **5.3.1 Confección de las Mezclas**

La mezcla de los morteros con cada tipo de cemento en estudio fue realizada en los laboratorios de IDIEM en la Sección de Aglomerantes. Estas mezclas fueron realizadas de manera consecutiva durante el mismo día.

Previamente al mezclado de los materiales se hace una corrección por humedad de la dosificación de los materiales. Para esto se determinó la humedad de la arena gruesa disponible y la humedad libre basada en la absorción de la arena presentada en la. Los valores para esta corrección se presentan en la Tabla 5.9.

**Tabla 5.9. Parámetros para Corrección de Dosificación por Humedad.**

Peso Arena Húmeda (kg)	1,000
Peso Arena Seca (kg)	0,963
Humedad Total Arena (%)	3,84
Absorción de Agua (%)	1,37
Humedad Libre (%)	2,47

Con estos valores se presenta la dosificación corregida por humedad de la arena.

**Tabla 5.10. Dosificación de Materiales Corregida por Humedad para Morteros.**

<b>Material</b>	<b>Dosificación en Peso (kg)</b>
Agua	0,213
Cemento	0,500
Arena	1,537

Una vez determinada la dosificación corregida por humedad se procede a confeccionar la mezcla, para esto se utiliza una mezcladora de mortero marca Tonindustrie con una capacidad de 5,75 litros.



**Figura 5.2. Mezcladora de Mortero.**

El procedimiento para la realización de la mezcla considera verter el agua y el cemento en el recipiente de la mezcladora. Luego, se enciende la mezcladora en velocidad lenta durante 30 segundos, en este momento se agrega la arena durante los siguientes 30 segundos. Una vez agregada la arena se cambia a velocidad rápida durante 30 segundos para luego detener la mezcladora, en este momento se debe raspar el mortero adherido a las paredes del recipiente con una espátula empujándolo al fondo, luego de esto se prende la mezcladora durante un 1 minuto a velocidad rápida.

### ***5.3.2 Preparación de las Probetas.***

Para la confección de las probetas se utilizan moldes prismáticos de tamaño 25,4 x 25,4 x 285 mm, con una longitud efectiva de 254 mm. Estas probetas están adaptadas para introducir topes de acero en los centros de cada extremo de las barras, estos topes permiten efectuar las mediciones posteriores.



**Figura 5.3 Moldes Prismáticos.**



**Figura 5.4. Piezas Metálicas de Tope**

Como primer paso se instalan los tope metálicos comprobando una longitud efectiva de tope a tope de 254 mm, luego se procede a aplicar desmoldante en las caras interiores del molde. El mortero es colocado en 2 capas aproximadamente iguales, cada capa es compactada mediante un pisón hasta obtener una probeta homogénea. Luego de compactada la capa superior se debe retirar el exceso de mortero y alisar la superficie mediante una espátula. Luego de preparadas las probetas estas son sometidas a un precurado de 2 horas en una cámara húmeda, luego de esto, las probetas de ensayo fueron sometidas a un curado acelerado, mientras que las muestras de control son mantenidas en la cámara húmeda.

### **5.3.3 Tratamiento de Curado Acelerado a Alta Temperatura.**

Posteriormente al pre-curado las probetas fueron sumergidas en un recipiente con agua, dentro de sus moldes, este recipiente fue ingresado en un horno con control de temperatura. Por limitaciones del equipo se logró una temperatura máxima de 50°C, la cual se logro en aproximadamente 5 horas, dadas estas condiciones se decidió mantener las probetas así hasta el siguiente día y cambiar el equipamiento utilizado para el control de la temperatura. Esta etapa será denominada como curado inicial.



**Figura 5.5. Curado Inicial de las Probetas de Mortero.**

Luego de permanecer aproximadamente 14 horas a 50°C se procedió a desmoldar las probetas luego de un lapso de 1 hora de enfriamiento hasta aproximadamente los 35°C, con el objetivo de poder manipularlas.

Inmediatamente después de desmoldadas las probetas, éstas fueron introducidas en un estanque de agua especialmente adaptado para controlar la temperatura del agua mediante un calefactor de inmersión de 1500 watts y un termostato con bulbo capilar que permite establecer la temperatura deseada. El estanque se mantuvo a una temperatura de 35°C hasta el momento de la introducción de las probetas. Dado el tamaño del estanque se adicionaron cubos de hormigón en desuso con el objetivo de disminuir el volumen de agua y así acelerar el aumento de la temperatura del agua. Esta etapa será denominada como curado final.





**Figura 5.6. Estanque Adaptado para la Calefacción Controlada de Agua.**



**Figura 5.7. Calefactor de Inmersión Utilizado para el Control de la Temperatura.**



**Figura 5.8. Termostato y Controles de Apagado y Encendido.**

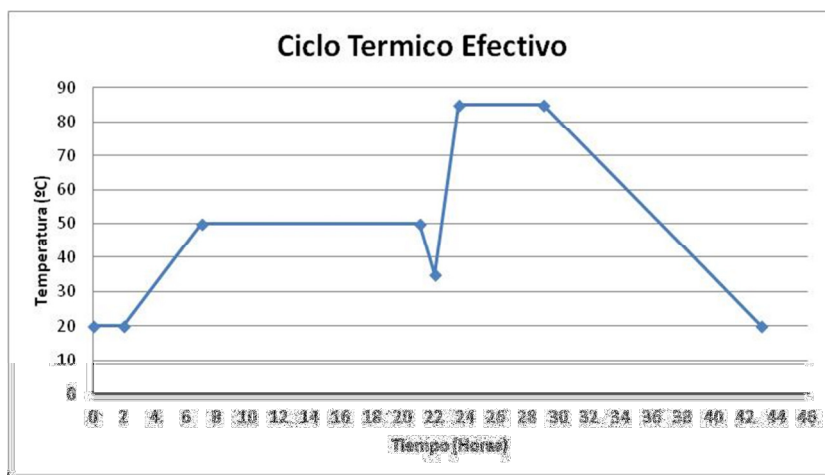
Una vez ubicadas las probetas en el estanque se comenzó a elevar paulatinamente la temperatura hasta alcanzar los  $85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  en un lapso de aproximadamente 1,5 horas.



**Figura 5.9. Curado Final Probetas de Mortero.**

Dadas las alteraciones del ciclo, producto de las situaciones imprevistas se decidió mantener la temperatura máxima durante un tiempo de 6 horas en lugar de las 4 horas planteadas en la metodología original. De esta forma se pretende asegurar la disolución de la etringita primaria que pudo haberse formado.

El ciclo térmico al que finalmente fueron sometidas las probetas es el que se presenta en la figura 5.10. Este ciclo difiere del ciclo establecido en la metodología original, sin embargo, de acuerdo a la experiencia de estudios posteriores como los que se describen en el Capítulo 3.8 se espera que esta alteración no afecte los resultados esperados.



**Figura 5.10. Ciclo Térmico de Curado.**

Finalizado el ciclo térmico y de manera referencial se tomaron medidas de longitud, mediante el comparador, de todas las probetas fabricadas, incluidas las muestras de control, esto con el objetivo de evaluar una posible contracción por secado producto de

los ciclos de humedecimiento y secado. El procedimiento para la toma de medidas se describirá más adelante.

#### ***5.3.4 Ciclos de Humedecimiento y Secado***

Luego de finalizado el ciclo térmico, las muestras son retiradas del estanque de agua utilizado para el tratamiento y almacenadas en un contenedor térmico sumergidas en agua durante 3 días a una temperatura de 21°C. En este contenedor serán almacenadas las muestras durante las siguientes etapas, incluidas las muestras de control.

Para realizar el sacado al horno seco, se utiliza un horno eléctrico adaptado para la realización de los ciclos de secado necesarios. El horno eléctrico cuenta con un termostato que permite controlar la temperatura a los niveles buscados, en este caso, la temperatura máxima a la que se realizará el secado es de 82°C ± 2°C.



**Figura 5.11. Inicio Secado de Probetas.**



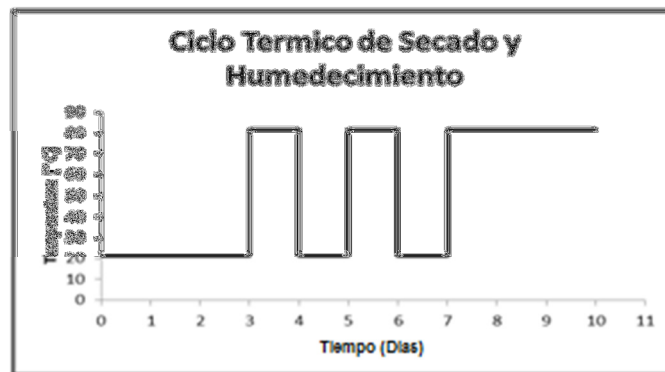
**Figura 5.12. Horno Eléctrico Durante el Ciclo de Secado.**



**Figura 5.13. Ciclo de Secado Finalizado.**

Como ya se mostro en el planteamiento experimental, los ciclos de humedecimiento y secado a los que fueron sometidas las probetas de ensayo corresponde al planteado en la metodología original del Ensayo Duggan y se resumen a continuación.

- 3 días en agua a 21° C
- 1 día a 82° C
- 1 días en agua a 21° C
- 1 día a 82° C
- 1 días en agua a 21° C
- 3 días a 82° C



**Figura 5.14 Ciclo de Secado - Humedecimiento.**

Cada vez que son retiradas las muestras del horno se dejan enfriar a temperatura ambiente durante 1 hora para posteriormente ser almacenadas sumergidas en agua en el contenedor térmico disponible para el ciclo de humedecimiento.

### **5.3.5 Medición de Expansiones y Almacenamiento.**

Luego de finalizado el último ciclo térmico de 3 días las probetas son dejadas enfriar durante una hora hasta alcanzar una temperatura ambiente, en este momento se toma la medición inicial de las probetas.

Para la realización de mediciones se utilizó un aparato comparador digital con una precisión de 0,001 mm el cual cuenta con una barra patrón de acero INVAR, con extremos de la misma forma de las piezas de tope que llevan montadas las probetas fabricadas, esta barra tiene la particularidad de tener un coeficiente de dilatación térmica muy bajo, menor o igual a  $0,000002 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 5.15. Aparato Comparador.**



**Figura 5.16. Barra Patrón.**

El procedimiento para la medición inicial es la siguiente:

- Se registrar la medida del aparato comparador con la barra patrón, este valor se registra como  $L_p$ .
- Se retira la probeta del agua y se secan con un paño las piezas metálicas de tope.
- Se gira lentamente la probeta en el aparato comparador y se registra la menor lectura como  $L_o$ .
- Se calcula la diferencia de longitud inicial  $L_i$  como la diferencia entre  $L_p$  y  $L_o$ .

Luego de realizadas las mediciones iniciales de todas las probetas, incluidas las muestras de control, estas son almacenadas sumergidas en agua en el contenedor térmico hasta la siguiente medición.



**Figura 5.17 Probetas Previo al Almacenamiento.**



**Figura 5.18. Almacenamiento de Probetas en Contenedor Térmico.**

El procedimiento para realizar las mediciones periódicas para cada serie de probetas es el siguiente.

- Se registrar la medida del aparato comparador con la barra patrón, este valor se registra como  $L_p$ .
- Se retira la probeta del agua y se secan con un paño las piezas metálicas de tope.
- Se gira lentamente la probeta en el aparato comparador y se registra la menor lectura como  $L_e$ .
- Se calcula la diferencia entre las lecturas de la probeta ( $L_e$ ) y de la barra patrón ( $L_p$ ) como  $L_x$ .
- El porcentaje de expansión de cada probeta a la edad de la medición se calcula según la siguiente fórmula:

**Ecuación 5.1. Expansión a x Días.**

$$\text{Expansión (\%)} = \frac{(L_x - L_i)}{254} \times 100$$

De esta manera se tomaron mediciones periódicas hasta aproximadamente los 70 días desde finalizados los ciclos de humedecimiento y secado.

### ***5.3.1 Análisis por Difracción de Rayos X a los morteros ensayados.***

Ya finalizado el registro de expansiones, se realizó un análisis por difracción de rayos x tanto a las muestras de control como a las muestras de ensayo. El análisis de difracción de rayos x permite identificar las fases cristalinas presentes en una muestra. De esta forma se pretende conocer los niveles de etringita presentes en las probetas, y permitir así un mejor análisis respecto de las expansiones medidas para cada tipo de cemento.

Para la realización de este análisis se deben preparar las muestras pulverizándolas hasta un tamaño inferior a 0,075 mm, es decir bajo la malla #200. La pulverización se realizó mediante la utilización de un mortero mecánico disponible en las instalaciones de IDIEM en Cerrillos.



**Figura 5.19. Muestras Pulverizadas Mediante Mortero Mecánico.**

Para cada tipo de cemento se escogió una probeta representante de las muestras de control y otra representante de las muestras de ensayo, estas fueron secadas previamente y luego pulverizadas y almacenadas en frascos de plásticos para su posterior análisis.

Los análisis de difracción de rayos x fueron realizados por el laboratorio de cristalografía del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

#### **5.4. ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA**

A continuación se presenta una descripción de los procedimientos seguidos y de los equipamientos utilizados para determinar el efecto de altas temperaturas de curado sobre la resistencia a la compresión de los hormigones estudiados.

##### ***5.4.1 Dosificación de Materiales.***

Se utilizará un hormigón patrón dosificado a partir e las siguientes condiciones.

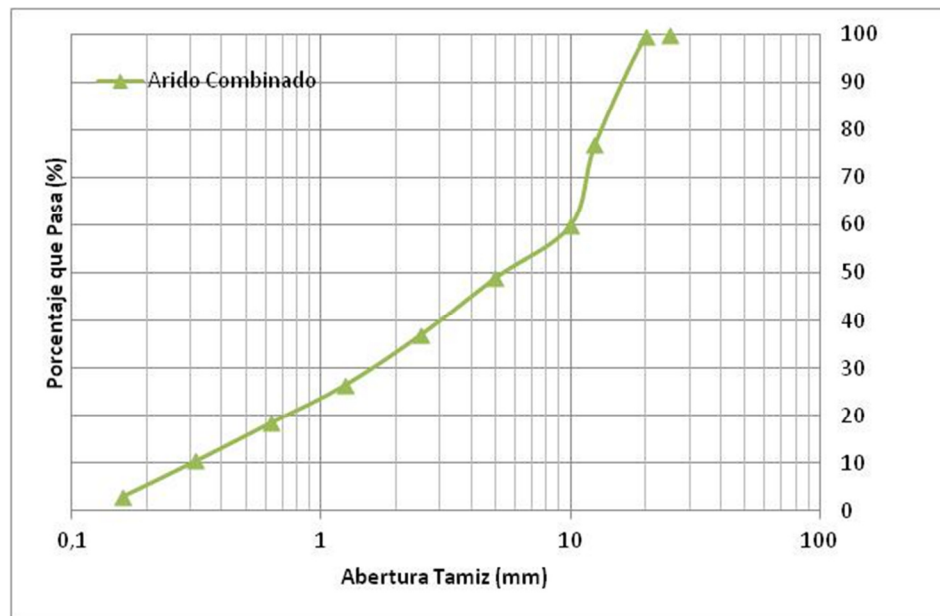
- Se utilizará una razón agua/cemento de 0,45 para todas las series contempladas.
- El tamaño máximo del árido utilizado es de 20 mm.
- La trabajabilidad expresada como asentamiento de cono se mantendrá en el nivel  $8 \pm 3$  cm.



- Los áridos serán combinados en una proporción de 50% de gravilla y 50% de arena. La granulometría del árido combinado se ajusta a la banda recomendada por la Norma chilena NCh 163. Esta se presenta a continuación.

**Tabla 5.11. Granulometría Árido Combinado.**

Tamiz (")	Tamiz (mm)	% Que Pasa
		Árido Combinado
2"	50	-
1 1/2"	40	-
1"	25	100
3/4"	20	99,5
1/2"	12,5	77
3/8"	10	60
4	5	49
8	2,5	37
16	1,25	26,5
30	0,63	18,5
50	0,315	10,5
100	0,16	3



**Figura 5.20. Granulometría del Árido Combinado.**

Considerando estas condiciones y utilizando las propiedades físicas de cementos y áridos presentadas anteriormente, se realizan las dosificaciones basándose en las recomendaciones e indicaciones de la Norma chilena NCh170. En la siguiente tabla se

presentan las dosificaciones planteadas para cada uno de los tipos de cemento contemplados.

**Tabla 5.12. Dosificación de Materiales para Hormigones Sometidos a Curado a Temperatura Elevada.**

<b>Material</b>	<b>C1 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>C2 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>C2 (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Agua</b>	190	190	190
<b>Cemento</b>	422	422	422
<b>Gravilla</b>	893	881	869
<b>Arena</b>	893	881	869

#### **5.4.2 Confección de las Mezclas**

La mezcla de los hormigones con cada tipo de cemento en estudio fue realizada en laboratorios de IDIEM en la Sección de Hormigones. Estas mezclas fueron realizadas de manera consecutiva durante el mismo día.

El día anterior a la fabricación de las probetas los áridos disponibles fueron mojados y homogenizados para alcanzar un estado de humedad cercano a la condición saturada superficialmente seca. Previamente al mezclado de los materiales se determina el contenido de humedad libre para ajustar la dosificación de los materiales. Para cada árido se determinó la humedad total y la humedad libre basada en las absorciones de cada uno presentados en la siguiente tabla. Los valores para esta corrección se presentan a continuación.

**Tabla 5.13. Parámetros para Corrección de Dosificación por Humedad.**

	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>
<b>Peso Húmedo (kg)</b>	1,001	0,600
<b>Peso Seco (kg)</b>	0,981	0,577
<b>Humedad Total (%)</b>	2,04	3,99
<b>Absorción de Agua (%)</b>	1,04	1,37
<b>Humedad Libre (%)</b>	1,00	2,62

Con estos valores se presenta la dosificación corregida por humedad de los áridos en la siguiente tabla.

**Tabla 5.14. Dosificación de Materiales Corregida por Humedad para Hormigones.**

	Dosificación para 40 l (kg)		
	C1	C1	C1
<b>Agua</b>	6,39	6,41	6,42
<b>Cemento</b>	17,12	17,12	17,12
<b>Gravilla</b>	36,56	36,09	35,59
<b>Arena</b>	37,15	36,67	36,16

Una vez establecida la dosificación corregida por humedad se procede a realizar la mezcla de los materiales para esto se utiliza una betonera eléctrica basculante con una capacidad para 150 l y una velocidad de rotación de aproximadamente 20 rev/min.



**Figura 5.21. Betonera Eléctrica.**

El procedimiento para la realización de las mezclas está basado en lo indicado en NCh1017. Este considera como primer paso el peso de los materiales de acuerdo a la dosificación corregida, una vez ubicados los materiales pesados en sus respectivos recipientes, se enciende la betonera y se ubica con una inclinación de 60°. De esta manera se ingresan los materiales primero la gravilla seguida de la arena y finalmente el cemento. Se mantiene el mezclado en seco durante 30 segundos, luego de esto se agregan  $\frac{3}{4}$  del agua total y se mantiene la mezcla por otros 30 segundos. Luego se agrega el agua restante y se mantiene el mezclado hasta alcanzar homogeneidad. Finalmente se vacía el contenido de la betonera en una carretilla de mano.

### **5.4.3 Caracterización del Hormigón Fresco**

Previo a la preparación de las probetas se realizaron ensayos al hormigón fresco con el objetivo de verificar las características de las mezclas realizadas. Los ensayos realizados y las normas utilizadas para su desarrollo son los siguientes:

- **Asentamiento del cono de Abrams:** Se realiza de acuerdo a lo establecido en NCh1019.Of1974. Hormigón – Determinación de la docilidad. Método del asentamiento del cono de Abrams. Este ensayo permite determinar la fluidez y la consistencia del hormigón fabricado.



**Figura 5.22. Equipo para Ensayo de Asentamiento de Cono de Abrams.**

- **Densidad aparente del hormigón fresco:** Se realiza de acuerdo a lo establecido en NCh1564.Of1979. Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco. Este ensayo permite obtener la densidad del hormigón fresco que considera los materiales utilizados en la mezcla y el aire atrapado durante el proceso de mezclado.
- **Contenido de aire:** Se realiza de acuerdo a lo establecido en NCh1564.Of1979. Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco. Este ensayo permite determinar la cantidad de aire atrapado en la mezcla durante el mezclado.



**Figura 5.23. Equipo para Ensayos de Densidad Aparente y Contenido de Aire.**

- Temperatura de la Mezcla: Se registró la temperatura del hormigón al término del amasado mediante un termómetro digital.

#### ***5.4.4 Preparación de las Probetas.***

Los procedimientos utilizados para la confección de las probetas que son sometidas a los ensayos de compresión están basados en NCh1017.

Para la confección de las probetas se utilizan moldes cúbicos de resina de un tamaño de 15 cm de arista. Estos moldes aseguran la planitud, perpendicularidad y paralelismo de las caras, cumpliendo así con los requisitos establecidos en NCh1017.



**Figura 5.24. Molde para la Confección de Probetas.**

Las probetas se llenaron de acuerdo a lo establecido en la norma, colocando en cada molde una sola capa y manteniendo un exceso por sobre el borde evitando la segregación. La compactación se realizó simultáneamente a todas las probetas de una misma serie mediante vibrado externo utilizando una mesa vibradora. Luego del vibrado se enrasó la superficie con regla como forma de terminación. Para su curado inicial, con el objetivo de evitar la evaporación, se cubrieron las superficies expuestas con plástico y se cubrieron completamente con arpilleras húmedas.

Las probetas fueron desmoldadas después de 20 horas. Previamente se verificó que las condiciones de endurecimiento eran las adecuadas para que no se genere daño. El desmolde se realizó utilizando una bomba de aire comprimido con la que se inyectó aire por un orificio en la base del molde, lo que permitió un fácil retiro de la probeta.

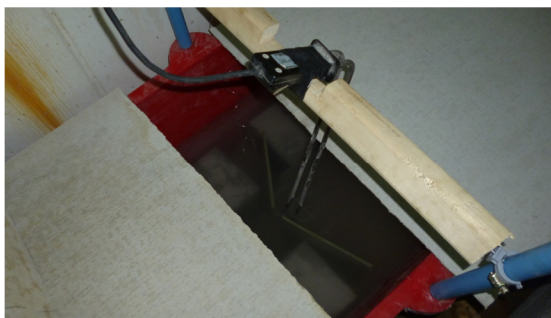
Luego de retiradas las probetas de los moldes fueron identificadas. Las muestras de control se trasladaron a una cámara húmeda, en condiciones de humedad del  $90\% \pm 2$  y a una temperatura controlada de  $23^{\circ}\text{C} \pm 1$  hasta el momento de la realización de los ensayos de compresión a los 28 días. Las probetas identificadas como muestras de ensayo, fueron trasladadas a un estanque de agua especialmente equipado para la aplicación del tratamiento térmico.

#### ***5.4.5 Tratamiento Térmico.***

El estanque de agua es el mismo que se utilizó para el ensayo de expansividad, es un estanque adaptado para controlar la temperatura del agua mediante un calefactor de inmersión de 1500 watts y un termostato con bulbo capilar que permite establecer las condiciones deseadas. Las probetas fueron introducidas al estanque con agua a una temperatura de  $19^{\circ}\text{C}$ . Las probetas identificadas para ser sometidas a un tratamiento térmico de 3 días fueron introducidas al agua dentro de bolsas de género, con el objetivo de facilitar y aumentar la seguridad del retiro luego de los 3 días.



**Figura 5.25. Estanque Adaptado para la Calefacción Controlada de Agua.**



**Figura 5.26. Probetas de Hormigón Durante el Tratamiento Térmico.**

Pasados los tres días la mitad de las probetas son retiradas, estas fueron dejadas enfriar al aire a un lado del estanque para disminuir la velocidad del cambio de temperatura, una vez que alcanzaron la temperatura ambiente fueron trasladadas a la cámara húmeda hasta ser ensayadas a los 28 días de edad. Las probetas restantes fueron retiradas luego de 6 días desde iniciado el tratamiento, cumplido este plazo el sistema de calefacción fue desconectado y se dejaron enfriar las probetas en agua hasta alcanzar temperatura ambiente. Luego de esto fueron trasladadas a la cámara húmeda hasta ser ensayadas junto al resto de las probetas.

#### ***5.4.6 Ensayos de Compresión.***

Cumplidos los 28 días desde la confección de las probetas estas son sometidas a los ensayos para conocer su resistencia a la compresión. La metodología para la realización de estos ensayos, está basada en lo indicado en Norma chilena NCh1037.Of1077 Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cubicas y cilíndricas. Para el posterior cálculo de la resistencia de las probetas se utiliza la misma norma.

El equipo utilizado para la realización de los ensayos corresponde a una prensa Toni Technik con una carga máxima de 300 toneladas.



**Figura 5.27. Prensa Toni Technik. Equipo Utilizado para los Ensayos de Resistencia a la Compresión.**

Previo al ensayo de cada probeta se determinó su masa. Se ensayó un total de 18 probetas, 2 por cada serie.

# CAPÍTULO 6: RESULTADOS OBTENIDOS

## 6.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos para los distintos ensayos realizados, los que fueron presentados en el capítulo anterior. Esto incluye los resultados del ensayo de expansividad por el fenómeno de formación retardada de etringita junto con el análisis de difracción de rayos x realizado a las muestras estudiadas. Además se incluye el resultado de los ensayos realizados al hormigón fresco y los ensayos de compresión realizados para determinar la influencia de un curado a alta temperatura sobre la resistencia mecánica del hormigón. Un análisis de los resultados mostrados en este capítulo serán presentados en el capítulo siguiente.

## 6.2. ENSAYO DE EXPANSIVIDAD

A continuación se presentan las expansiones medidas para cada una de las series estudiadas de acuerdo a la metodología indicada en el capítulo 5.3.5. Además se presenta el promedio de los valores obtenidos para una misma serie.

### 6.2.1 Ensayo de Expansividad Serie: C1-E

En la siguiente tabla se presentan las expansiones registradas a lo largo del tiempo para las probetas correspondientes a la serie C1-E.

Tabla 6.1. Expansión de las Probetas de la Serie C1-E.

Fecha	07-may	09-may	11-may	14-may	18-may	22-may	25-may	28-may
Edad (días)	0	2	4	7	11	15	18	21
Probeta	Expansión (%)							
C1-E-1	0,000	0,078	0,089	0,092	0,099	0,109	0,114	0,120
C1-E-2	0,000	0,059	0,063	0,073	0,078	0,087	0,092	0,097
C1-E-3	0,000	0,071	0,076	0,085	0,092	0,102	0,108	0,114
C1-E-4	0,000	0,072	0,074	0,083	0,097	0,100	0,106	0,111
Promedio	0,000	0,070	0,076	0,083	0,092	0,100	0,105	0,111



Continuación Tabla 6.1.

Fecha	01-jun	04-jun	08-jun	14-jun	19-jun	03-jul	17-jul
Edad (días)	25	28	32	38	43	57	71
Probeta	Expansión (%)						
C1-E-1	0,125	0,127	0,128	0,128	0,127	0,140	0,155
C1-E-2	0,102	0,104	0,108	0,115	0,119	0,121	0,124
C1-E-3	0,119	0,119	0,124	0,122	0,122	0,129	0,133
C1-E-4	0,116	0,117	0,122	0,126	0,132	0,137	0,140
<b>Promedio</b>	<b>0,116</b>	<b>0,117</b>	<b>0,121</b>	<b>0,123</b>	<b>0,125</b>	<b>0,132</b>	<b>0,138</b>

En la figura 6.1 se presenta la curva con lo valores de expansión promedio desarrolladas por las probetas correspondientes a la serie C1-E en el periodo de medición.

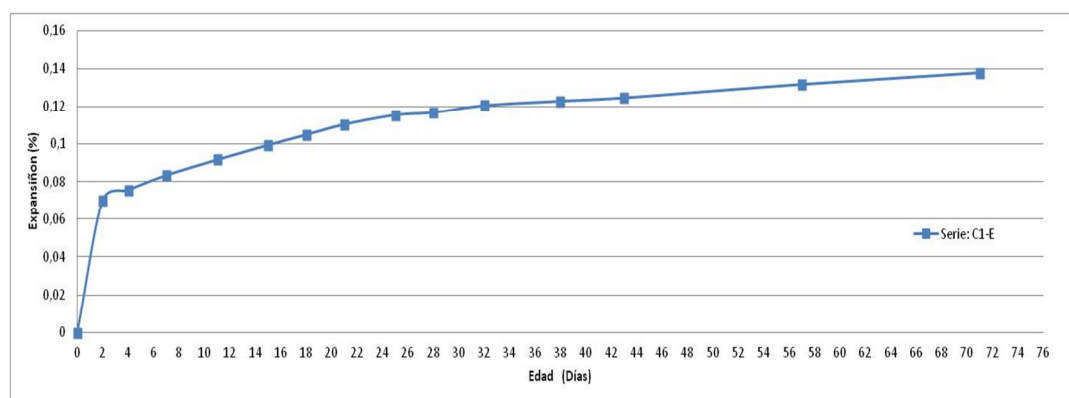


Figura 6.1. Expansiones Promedio Probetas de la Serie C1-E.

### 6.2.2 Ensayo de Expansividad Serie: C1-C (Control)

En la siguiente tabla se presentan las expansiones desarrolladas a lo largo del tiempo para las probetas correspondientes a la serie C1-C (control).

Tabla 6.2. Expansión de las Probetas de la Serie C1-C (control).

Fecha	07-may	09-may	11-may	14-may	18-may	22-may	25-may	28-may
Edad (días)	0	2	4	7	11	15	18	21
Probeta	Expansión (%)							
C1-C-1	0,000	0,003	0,004	0,004	0,004	0,006	0,005	0,005
C1-C-2	0,000	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005
C1-C-3	0,000	0,002	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,006
C1-C-4	0,000	0,006	0,004	0,005	0,004	0,007	0,006	0,005
<b>Promedio</b>	<b>0,000</b>	<b>0,004</b>	<b>0,004</b>	<b>0,005</b>	<b>0,004</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>

Continuación Tabla 6.2.

Fecha	01-jun	04-jun	08-jun	14-jun	19-jun	03-jul	17-jul
Edad (días)	25	28	32	38	43	57	71
Probeta	Expansión (%)						
C1-C-1	0,006	0,003	0,005	0,005	0,005	0,004	
C1-C-2	0,006	0,003	0,004	0,006	0,006	0,005	0,003
C1-C-3	0,006	0,003	0,005	0,003	0,007	0,004	0,003
C1-C-4	0,006	0,003	0,004	0,006	0,007	0,007	0,002
Promedio	0,006	0,003	0,004	0,005	0,006	0,005	0,003

En la figura 6.2 se presenta la curva con los valores de expansión promedio desarrolladas por las probetas correspondientes a la serie C1-C (control) en el periodo de medición.

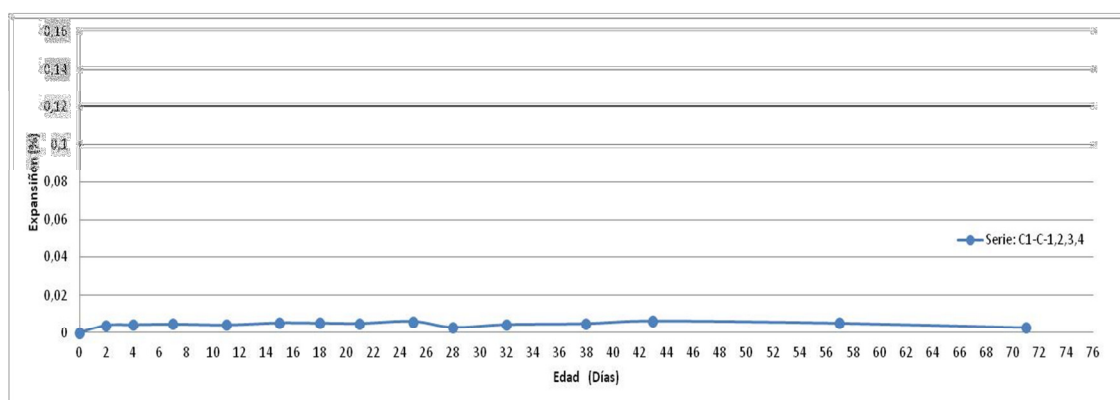


Figura 6.2. Expansiones Promedio Probetas de la Serie C1-C (control).

### 6.2.3 Ensayo de Expansividad Serie: C2-E

En la tabla 6.3 se presentan las expansiones desarrolladas a lo largo del tiempo para las probetas correspondientes a la serie C2-E.

Tabla 6.3. Expansión de las Probetas de la Serie C2-E.

Fecha	07-may	09-may	11-may	14-may	18-may	22-may	25-may	28-may
Edad (días)	0	2	4	7	11	15	18	21
Probeta	Expansión (%)							
C2-E-1	0,000	0,078	0,085	0,093	0,111	0,123	0,135	0,146
C2-E-2	0,000	0,075	0,081	0,089	0,101	0,114	0,125	0,135
C2-E-3	0,000	0,074	0,081	0,089	0,101	0,111	0,124	0,133
C2-E-4	0,000	0,073	0,083	0,091	0,107	0,130	0,135	0,140
Promedio	0,000	0,075	0,083	0,091	0,105	0,120	0,130	0,139

Continuación Tabla 6.3.

Fecha	01-jun	04-jun	08-jun	14-jun	19-jun	03-jul	17-jul
Edad (días)	25	28	32	38	43	57	71
Probeta	Expansión (%)						
C2-E-1	0,161	0,167	0,183	0,196	0,212	0,232	0,255
C2-E-2	0,155	0,159	0,165	0,180	0,194	0,219	0,243
C2-E-3	0,144	-	0,156	0,168	0,182	0,202	0,220
C2-E-4	0,152	0,157	0,170	0,182	0,196	0,213	0,231
<b>Promedio</b>	<b>0,153</b>	<b>0,161</b>	<b>0,168</b>	<b>0,181</b>	<b>0,196</b>	<b>0,217</b>	<b>0,237</b>

En la figura 6.3 se presenta la curva con lo valores de expansión promedio desarrolladas por las probetas correspondientes a la serie C2-E en el periodo de medición.

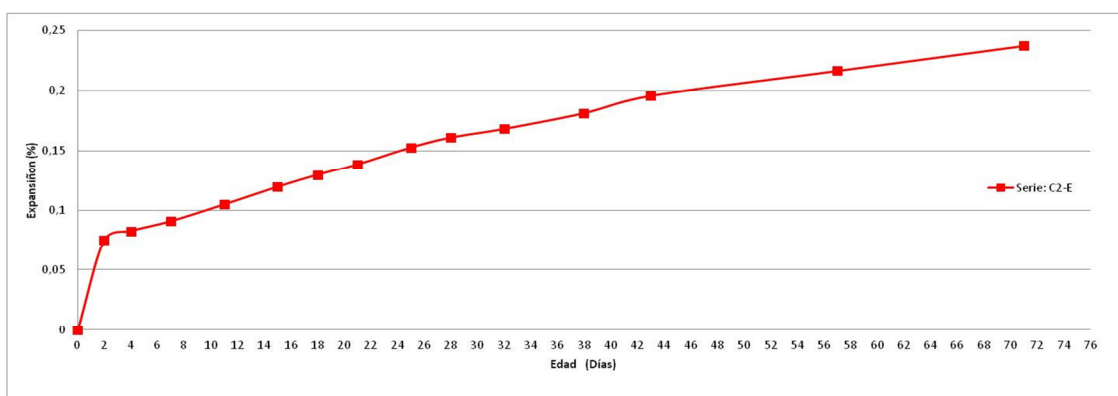


Figura 6.3. Expansiones Promedio Probetas de la Serie C2-E (control).

#### 6.2.4 Ensayo de Expansividad Serie: C2-C (Control)

En la siguiente tabla se presentan las expansiones desarrolladas a lo largo del tiempo para las probetas correspondientes a la serie C2-C (control).

Tabla 6.4. Expansión de las Probetas de la Serie C2-C (control).

Fecha	01-jun	04-jun	08-jun	14-jun	19-jun	03-jul	17-jul	01-jun
Edad (días)	25	28	32	38	43	57	71	25
Probeta	Expansión (%)							
C2-C-1	0,000	0,002	0,003	0,004	0,002	0,001	0,002	0,002
C2-C-2	0,000	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000	0,003	0,005
C2-C-3	0,000	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,004
C2-C-4	0,000	0,001	0,001	0,002	0,003	0,000	0,001	0,002
<b>Promedio</b>	<b>0,000</b>	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0,003</b>

Continuación Tabla 6.4.

Fecha	01-jun	04-jun	08-jun	14-jun	19-jun	03-jul	17-jul
Edad (días)	25	28	32	38	43	57	71
Probeta	Expansión (%)						
C2-C-1	0,003	-0,001	0,000	0,000	0,002	0,001	-0,001
C2-C-2	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,002
C2-C-3	0,004	-0,001	0,001	0,002	0,003	0,000	-0,001
C2-C-4	0,002	-0,003	-0,001	0,002	0,003	0,001	-0,001
Promedio	0,003	0,000	0,000	0,001	0,002	0,000	-0,001

En la figura 6.4 se presenta la curva con los valores de expansión promedio desarrolladas por las probetas correspondientes a la serie C2-C (control) en el periodo de medición.

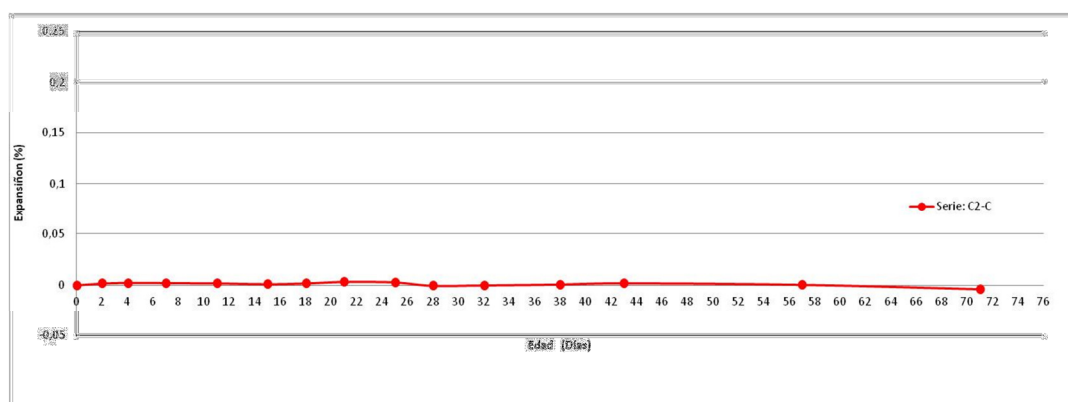


Figura 6.4. Expansiones Promedio Probetas de la Serie C2-C (control).

### 6.2.5 Ensayo de Expansividad Serie: C3-E

En la siguiente tabla se presentan las expansiones desarrolladas a lo largo del tiempo para las probetas correspondientes a la serie C3-E.

Tabla 6.5. Expansión de las Probetas de la Serie C3-E.

Fecha	07-may	09-may	11-may	14-may	18-may	22-may	25-may	28-may
Edad (días)	0	2	4	7	11	15	18	21
Probeta	Expansión (%)							
C3-E-1	0,000	0,072	0,078	0,089	0,098	0,108	0,108	0,108
C3-E-2	0,000	0,067	0,076	0,085	0,092	0,099	0,108	0,118
C3-E-3	0,000	0,067	0,075	0,082	0,109	0,097	0,103	0,105
C3-E-4	0,000	0,076	0,079	0,093	0,106	0,113	0,116	0,116
Promedio	0,000	0,071	0,077	0,087	0,101	0,104	0,109	0,112

Continuación Tabla 6.5.

Fecha	01-jun	04-jun	08-jun	14-jun	19-jun	03-jul	17-jul
Edad (días)	25	28	32	38	43	57	71
Probeta	Expansión (%)						
C3-E-1	0,111	0,108	0,111	0,115	0,116	0,117	0,119
C3-E-2	0,112	0,113	0,109	0,115	0,117	0,116	0,115
C3-E-3	0,112	0,107	0,107	0,110	0,112	0,110	0,109
C3-E-4	0,114	0,117	0,120	0,123	0,124	0,125	0,126
<b>Promedio</b>	<b>0,112</b>	<b>0,111</b>	<b>0,112</b>	<b>0,116</b>	<b>0,117</b>	<b>0,117</b>	<b>0,117</b>

En la figura 6.5 se presenta gráficamente las expansiones promedio desarrolladas por las probetas correspondientes a la serie C3-E.

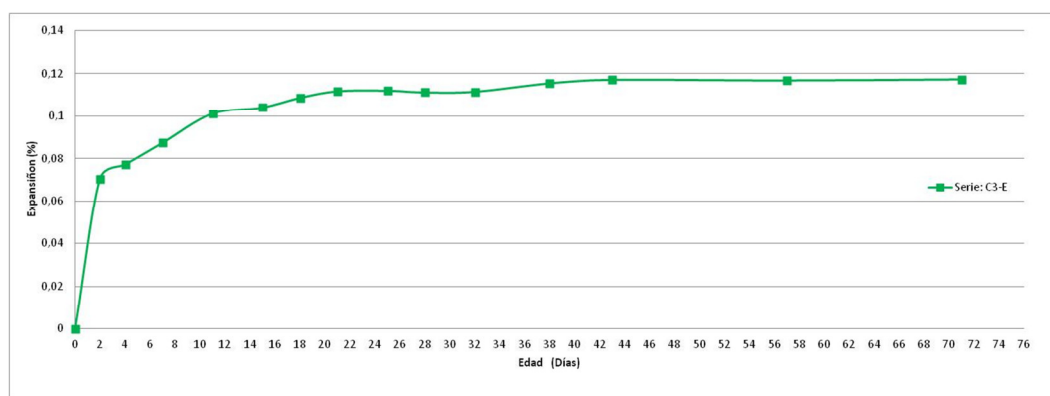


Figura 6.5. Expansiones Promedio Probetas de la Serie C3-E.

### 6.2.6 Ensayo de Expansividad Serie: C3-C (Control)

En la siguiente tabla se presentan las expansiones desarrolladas a lo largo del tiempo para las probetas correspondientes a la serie C3-C (control).

Tabla 6.6. Expansión de las Probetas de la Serie C3-C (control).

Fecha	07-may	09-may	11-may	14-may	18-may	22-may	25-may	28-may
Edad (días)	0	2	4	7	11	15	18	21
Probeta	Expansión (%)							
C3-C-1	0,000	-	-	-	-	-	-	-
C3-C-2	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003
C3-C-3	0,000	0,001	0,006	0,000	0,000	0,006	0,004	0,007
C3-C-4	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,005
<b>Promedio</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,003</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,003</b>	<b>0,003</b>	<b>0,005</b>

Continuación Tabla 6.6.

Fecha	01-jun	04-jun	08-jun	14-jun	19-jun	03-jul	17-jul
Edad (días)	25	28	32	38	43	57	71
Probeta	Expansión (%)						
C3-C-1							
C3-C-2	0,002	0,000	0,001	0,003	0,004	0,000	-0,001
C3-C-3	0,007	0,003	-0,001	0,002	0,002	0,000	0,002
C3-C-4	0,005	0,000	0,002	0,004	0,006	0,003	0,002
Promedio	0,005	0,001	0,001	0,003	0,004	0,001	0,001

En la figura 6.6 se presenta gráficamente las expansiones promedio desarrolladas por las probetas correspondientes a la serie C3-C (control).

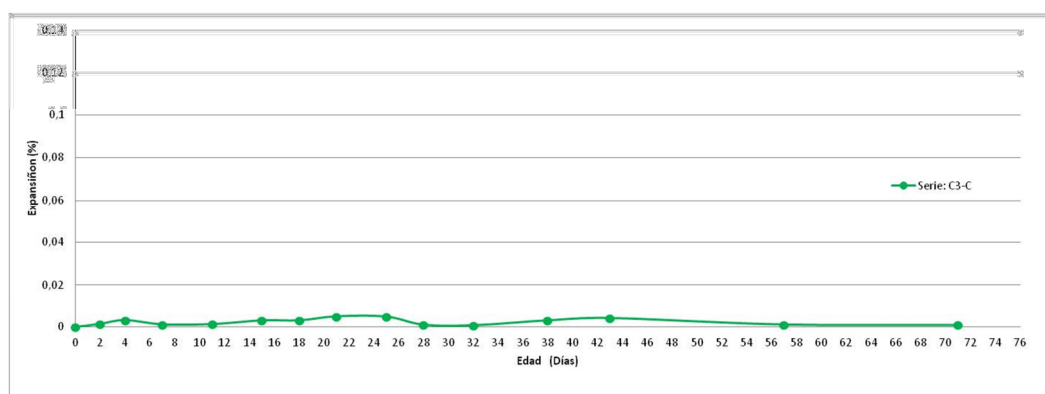


Figura 6.6. Expansiones Promedio Probetas de la Serie C3-C (control).

### 6.3. DIFRACTOMETRÍA DE RAYOS X

A continuación se presentan los difractogramas de rayos x correspondientes a la caracterización mineralógica de las muestras estudiadas después de efectuados los ciclos térmicos y finalizadas las mediciones. Estos análisis fueron llevados a cabo en el laboratorio de cristalografía del Departamento de Física de la Universidad de Chile. Los análisis se realizaron bajo las siguientes especificaciones.

- Instrumento: Difractómetro SIEMENS D5000.
- Longitud de onda:  $\lambda=1,54 \text{ \AA}$ , ánodo de cobre.
- Potencia: 40 KV/30 Ma.
- Rango de medición: 2-Theta=  $2^\circ - 80^\circ$ .
- Paso:  $0,02^\circ / \text{segundo}$

El análisis se realizó mediante el Software MDI Jade 6. Un resumen de los principales peaks de los difractogramas de cada muestra se presenta en los anexos de este trabajo. El análisis de estos resultados será desarrollado en el siguiente capítulo.

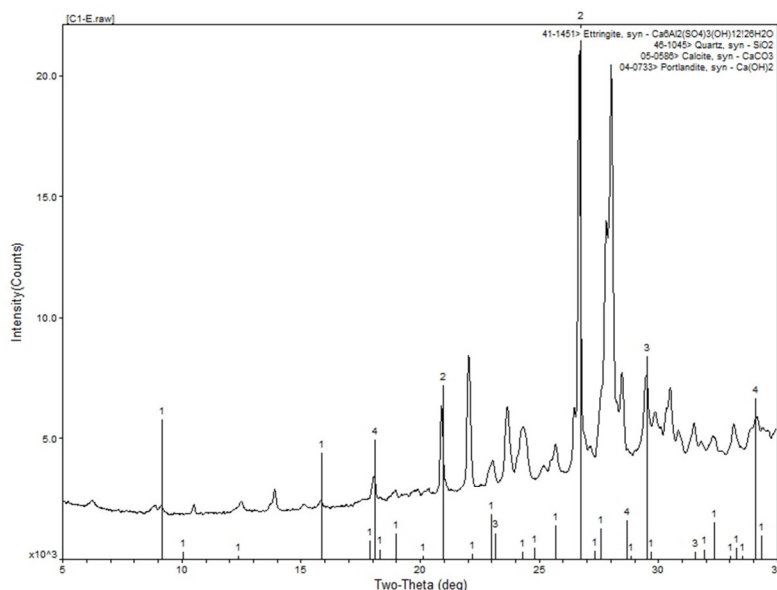
En cada difractograma se presentan los siguientes compuestos:

- 1- Etringita
- 2- Cuarzo
- 3- Calcita
- 4- Portlandita

Los peaks no marcados no fueron reconocidos por el software y corresponden a otras fases del cemento hidratado como el gel de Tobermorita (C-S-H)

### **6.3.1 Difractometría de Rayos X Serie: C1-E**

En la figura 6.7 se presenta el difractograma obtenido para la muestra de la serie C1-E.

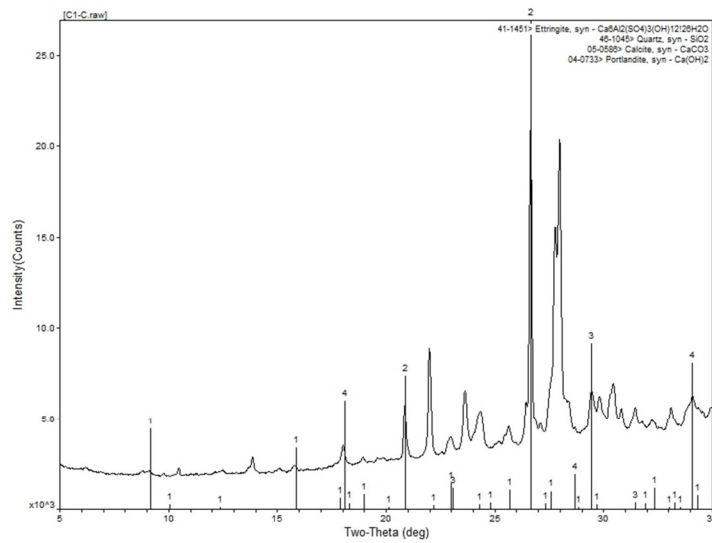


**Figura 6.7. Difractograma Rayos X. Serie C1-E.**

### **6.3.2 Difractometría de Rayos X Serie: C1-C**

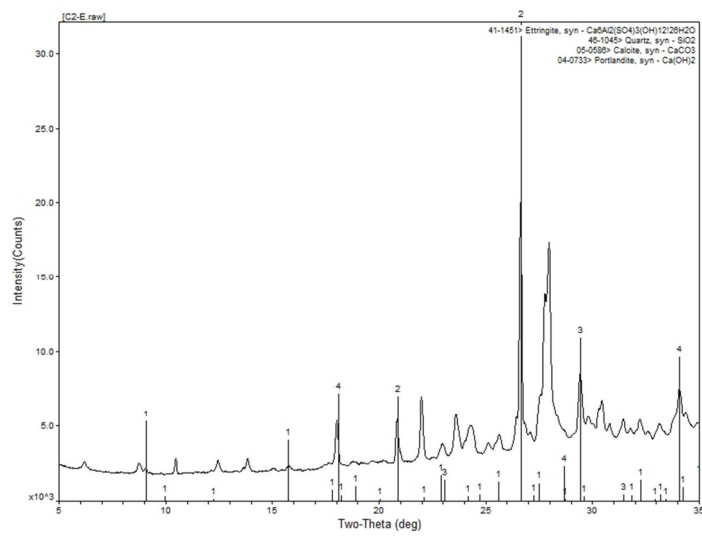
En la figura 6.8 se presenta el difractograma obtenido para la muestra de la serie C1-C.

**Figura 6.8. Difractograma Rayos X. Serie C1-C.**



### **6.3.3 Difractometría de Rayos X Serie: C2-E**

En la figura 6.9 se presenta el difractograma obtenido para la muestra de la serie C2-E.



**Figura 6.9. Difractograma Rayos X. Serie C2-E.**



### 6.3.4 Difractometría de Rayos X Serie: C2-C

En la figura 6.10 se presenta el difractograma obtenido para la muestra de la serie C2-C.

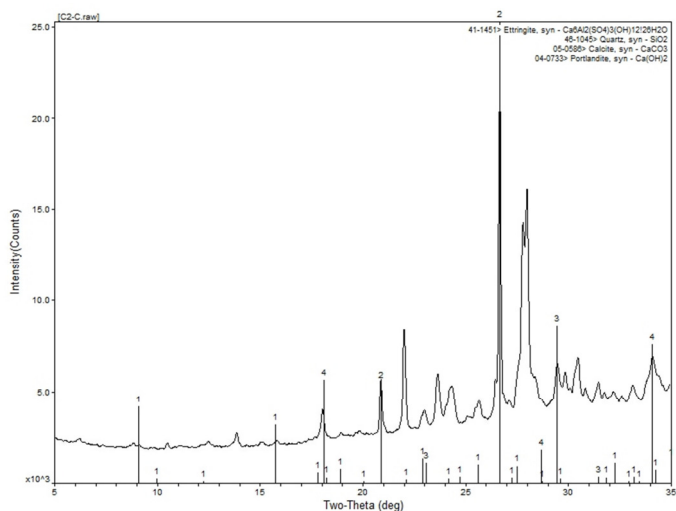


Figura 6.10. Difractograma Rayos X. Serie C2-C.

### 6.3.5 Difractometría de Rayos X Serie: C3-E

En la figura 6.11 se presenta el difractograma obtenido para la muestra de la serie C3-E.

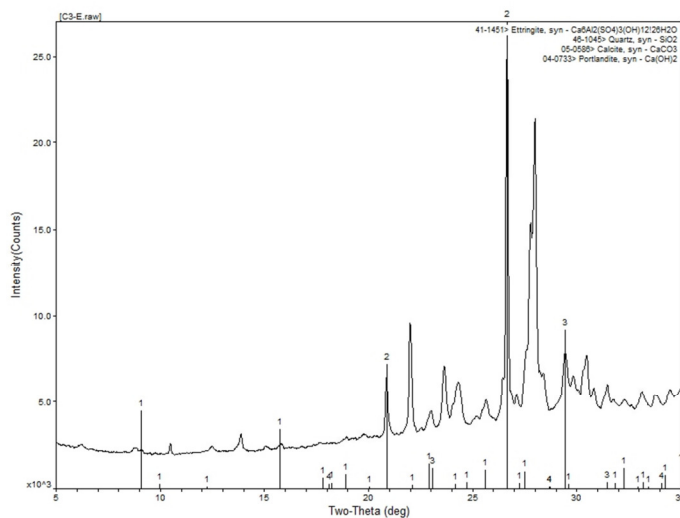


Figura 6.11. Difractograma Rayos X. Serie C3-E.

### 6.3.6 Difractometría de Rayos X Serie: C3-C

En la figura 6.12 se presenta el difractograma obtenido para la muestra de la serie C3-C.

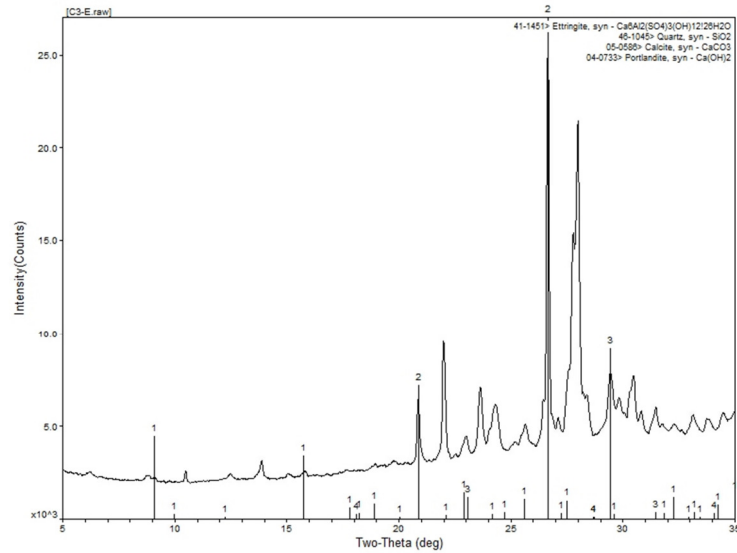


Figura 6.12. Difractograma Rayos X. Serie C3-C.

## 6.4. ENSAYOS AL HORMIGÓN FRESCO

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados en el hormigón fresco previamente a la confección de las probetas del estudio. Estos ensayos incluyen descenso del cono de Abrams, densidad aparente y contenido de aire, además se presenta el valor de la temperatura de la mezcla luego de su preparación.

### 6.4.1 Ensayos Hormigón Fresco Serie C1.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los ensayos aplicados al hormigón fresco para la serie C1.

**Tabla 6.7. Propiedades del Hormigón Fresco. Serie C1.**

<b>Propiedad</b>	<b>Serie C1</b>
<b>Descenso de Cono (cm)</b>	8,5
<b>Densidad Aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.398
<b>Contenido de Aire (%)</b>	1,7
<b>Temperatura (°C)</b>	18,6

#### ***6.4.2 Ensayos Hormigón Fresco Serie C2.***

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los ensayos aplicados al hormigón fresco para la serie C2.

**Tabla 6.8. Propiedades del Hormigón Fresco. Serie C2.**

<b>Propiedad</b>	<b>Serie C2</b>
<b>Descenso de Cono (cm)</b>	7,5
<b>Densidad Aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.387
<b>Contenido de Aire (%)</b>	1,5
<b>Temperatura (°C)</b>	18,7

#### ***6.4.3 Ensayos Hormigón Fresco Serie C3.***

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los ensayos aplicados al hormigón fresco para la serie C3.

**Tabla 6.9. Propiedades del Hormigón Fresco. Serie C3.**

<b>Propiedad</b>	<b>Cemento Melón Especial (C3)</b>
<b>Descenso de Cono (cm)</b>	7,0
<b>Densidad Aparente (kg/m3)</b>	2.368
<b>Contenido de Aire (%)</b>	1,4
<b>Temperatura (°C)</b>	18,0

## **6.5. ENSAYOS DE COMPRESIÓN**

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión a los 28 días de cada una de las series estudiadas. Estos ensayos fueron realizados en la Sección de Hormigones de IDIEM de acuerdo a NCh1037.Of1977. Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cubicas y cilíndricas. El cálculo de las resistencias se realizó según lo indicado en la misma norma.

### **6.5.1 Ensayos de Compresión Serie C1-E-3**

En la tabla 6.11 se presentan los resultados para el ensayo de compresión a los 28 días para las probetas de la serie C1-E-3 ensayadas después de 28 días de los cuales 3 fueron en condiciones de curado a alta temperatura.

**Tabla 6.10. Resistencia a la Compresión a los 28 Días. Serie C1-E-3.**

<b>Fecha</b>	<b>04-jun</b>		
<b>Edad (días)</b>	<b>28</b>		
<b>Probeta</b>	<b>Carga Máxima (kN)</b>	<b>Sección (cm2)</b>	<b>Resistencia (kgf/cm2)</b>
<b>C1-E-3-a</b>	1071	226	474
<b>C1-E-3-b</b>	1078	226	478
<b>Promedio</b>			<b>476</b>

### **6.5.2 Ensayos de Compresión Serie C1-E-6**

En la tabla 6.12 se presentan los resultados para el ensayo de compresión a los 28 días para las probetas de la serie C1-E-6 ensayadas después de 28 días de los cuales 6 fueron en condiciones de curado a alta temperatura.

**Tabla 6.11. Resistencia a la Compresión a los 28 Días. Serie C1-E-6.**

<b>Fecha</b>	<b>04-jun</b>		
<b>Edad (días)</b>	<b>28</b>		
<b>Probeta</b>	<b>Carga Máxima (kN)</b>	<b>Sección (cm2)</b>	<b>Resistencia (kgf/cm2)</b>
<b>C1-E-6-a</b>	1069	226	474
<b>C1-E-6-b</b>	1067	228	468
<b>Promedio</b>			<b>471</b>

### **6.5.3 Ensayos de Compresión Serie C1-C (Control)**

En la tabla 6.13 se presentan los resultados para el ensayo de compresión a los 28 días para las probetas de la serie C1-C (control) ensayadas después de 28 días.

**Tabla 6.12. Resistencia a la Compresión a los 28 Días. Serie C1-C (control).**

<b>Fecha</b>	<b>04-jun</b>		
<b>Edad (días)</b>	<b>28</b>		
<b>Probeta</b>	<b>Carga Máxima (kN)</b>	<b>Sección (cm2)</b>	<b>Resistencia (kgf/cm2)</b>
<b>C1-C-a</b>	1145	228	503
<b>C1-C-B</b>	1142	226	506
<b>Promedio</b>			<b>504</b>

### **6.5.4 Ensayos de Compresión Serie C2-E-3**

En la tabla 6.14 se presentan los resultados para el ensayo de compresión a los 28 días para las probetas de la serie C2-E-3 ensayadas después de 28 días de los cuales 3 fueron en condiciones de curado a alta temperatura.

**Tabla 6.13. Resistencia a la Compresión a los 28 Días. Serie C2-E-3.**

<b>Fecha</b>	<b>04-jun</b>		
<b>Edad (días)</b>	<b>28</b>		
<b>Probeta</b>	<b>Carga Máxima (kN)</b>	<b>Sección (cm2)</b>	<b>Resistencia (kgf/cm2)</b>
<b>C2-E-3-a</b>	1282	228	563
<b>C2-E-3-b</b>	1271	226	563
<b>Promedio</b>			<b>563</b>

### 6.5.5 Ensayos de Compresión Serie C2-E-6

En la tabla 6.15 se presentan los resultados para el ensayo de compresión a los 28 días para las probetas de la serie C2-E-6 ensayadas después de 28 días de los cuales 6 fueron en condiciones de curado a alta temperatura.

Tabla 6.14. Resistencia a la Compresión a los 28 Días. Serie C2-E-6.

Fecha	04-jun		
Edad (días)	28		
Probeta	Carga Máxima (kN)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )
C2-E-6-a	1283	226	567
C2-E-6-b	1286	228	564
Promedio			566

### 6.5.6 Ensayos de Compresión Serie C2-C (Control)

En la tabla 6.16 se presentan los resultados para el ensayo de compresión a los 28 días para las probetas de la serie C2-C (control) ensayadas después de 28 días.

Tabla 6.15. Resistencia a la Compresión a los 28 Días. Serie C2-C.

Fecha	04-jun		
Edad (días)	28		
Probeta	Carga Máxima (kN)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )
C2-C-a	1267	226	560
C2-C-B	1252	227	552
Promedio			556

### 6.5.7 Ensayos de Compresión Serie C3-E-3

En la tabla 6.17 se presentan los resultados para el ensayo de compresión a los 28 días para las probetas de la serie C3-E-3 ensayadas después de 28 días de los cuales 3 fueron en condiciones de curado a alta temperatura.

Tabla 6.16. Resistencia a la Compresión a los 28 Días. Serie C3-E-3.

Fecha	04-jun		
Edad (días)	28		
Probeta	Carga Máxima (kN)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )
C3-E-3-a	736	228	323
C3-E-3-b	718	225	319
<b>Promedio</b>			<b>321</b>

### 6.5.8 Ensayos de Compresión Serie C3-E-6

En la tabla 6.18 se presentan los resultados para el ensayo de compresión a los 28 días para las probetas de la serie C3-E-6 ensayadas después de 28 días de los cuales 6 fueron en condiciones de curado a alta temperatura.

Tabla 6.17. Resistencia a la Compresión a los 28 Días. Serie C3-E-6.

Fecha	04-jun		
Edad (días)	28		
Probeta	Carga Máxima (kN)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )
C3-E-6-a	737	225	327
C3-E-6-b	752	228	330
<b>Promedio</b>			<b>328</b>

### 6.5.9 Ensayos de Compresión Serie C3-C

En la tabla 6.19 se presentan los resultados para el ensayo de compresión a los 28 días para las probetas de la serie C3-C (control) ensayadas después de 28 días.

Tabla 6.18. Resistencia a la Compresión a los 28 Días. Serie C3-C.

Fecha	04-jun		
Edad (días)	28		
Probeta	Carga Máximo (kN)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )
C3-C-a	683	226	302
C3-C-b	697	228	306
<b>Promedio</b>			<b>304</b>

## CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se analizarán los resultados y datos obtenidos, buscando dar respuesta a los objetivos planteados para este Trabajo de Título. Para esto se analizan los datos obtenidos referentes a las propiedades de los cementos utilizados en el estudio, luego se analizan los resultados obtenidos en los ensayos de expansividad y compresión.

### 7.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS CEMENTOS.

En la tabla 7.1 se presentan los datos referentes a las propiedades físicas de los cementos utilizados en este estudio. Posteriormente se presentan comparaciones entre los distintos cementos y los análisis respectivos.

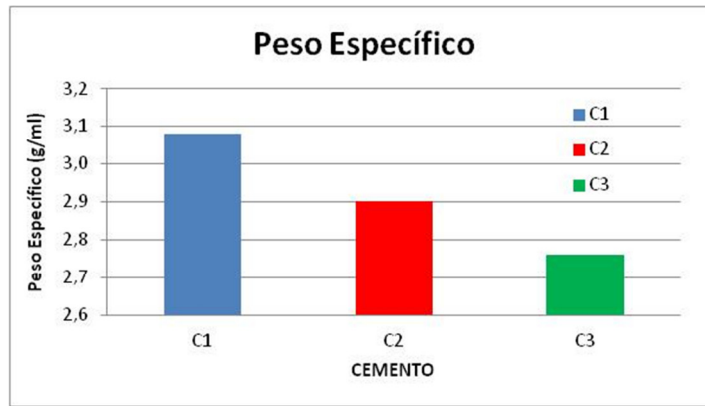
Tabla 7.1. Propiedades Físicas de los Cementos.

Propiedad	CEMENTO		
	C1	C2	C3
Peso Específico (g/ml)	3,08	2,9	2,76
Superficie Específica (cm <sup>2</sup> /g)	4350	4950	4300
Tiempo de Fraguado Inicial (hh:mm)	01:30	1:40	3:00
Tiempo de Fraguado Final (hh:mm)	02:20	2:40	3:50
Consistencia Normal (%)	30	33	33

#### 7.1.1 *Peso Específico.*

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.1 se presenta el siguiente grafico donde se comparan los pesos específicos de cada uno de los cementos estudiados, que son coherentes con los contenidos de adición incorporadas a cada uno de ellos.



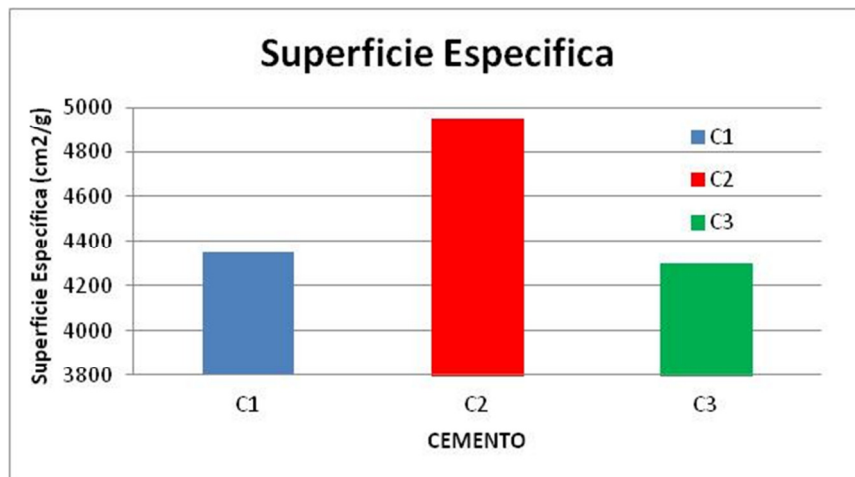


**Figura 7.1. Comparación Pesos Específicos de los Cementos.**

Se observa que el cemento C1 es el que posee un peso específico mayor, seguido del cemento C2, mientras que el cemento C3 es el que tiene un menor peso específico. Esto se explica debido a que el cemento C1 corresponde a un cemento Portland puro, mientras que el cemento C2 corresponde a un cemento Portland puzolánico y el cemento C3 a un cemento puzolánico. Estos últimos dos poseen un menor peso específico debido a que la puzolana, es más liviano que el cemento y por lo tanto al ser mezclado con cemento, hace disminuir el peso específico de esta mezcla. Por esta misma razón se explica el hecho de que el cemento C3, con mayor porcentaje de adición, tenga un peso específico menor que el cemento C2. Es decir, a mayor porcentaje de adición puzolánica menor será el peso específico.

### 7.1.2 Superficie Específica.

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.1, en la figura 7.2 se comparan las superficies específicas de cada uno de los cementos estudiados.



**Figura 7.2. Comparación Superficies Específicas de los Cementos.**

Estas características son propias de la fabricación del cemento, en cementos más finos se espera un desarrollo de resistencia mayor en edades tempranas, quizás la mayor finura del cemento C2 se explica por el hecho de que a pesar de ser un cemento Portland puzolánicas se diseño un cemento de alta resistencia, por lo que probablemente este aumento en la finura del cemento contrarresta el efecto de la puzolana sobre las resistencias tempranas del cemento. Por otra parte el cemento C1 al ser un cemento Portland puro no requiere una mayor finura para desarrollar las resistencias deseadas para un cemento de alta resistencia como está catalogado. Finalmente el cemento C3 está catalogado como corriente por lo que no requiere desarrollar grandes resistencias en su edad temprana. En otro ámbito, el cemento con mayor finura, se espera que tenga una mayor trabajabilidad que un cemento de las mismas características pero de menor finura.

### 7.1.3 Tiempos de Fraguado.

De acuerdo los datos de la Tabla 7.1 se presenta el siguiente grafico donde se comparan los tiempos de fraguado de cada uno de los cementos estudiados.

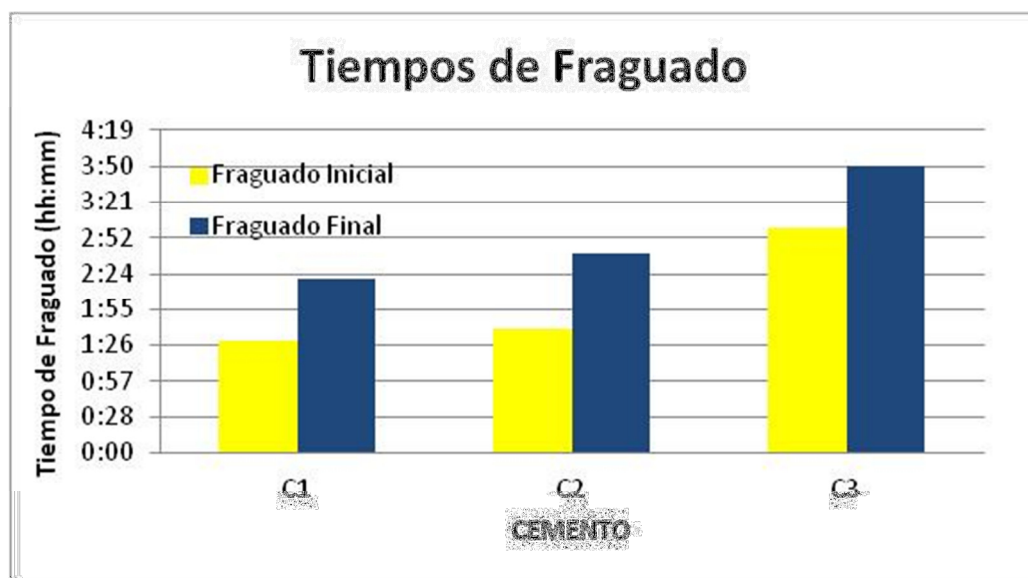


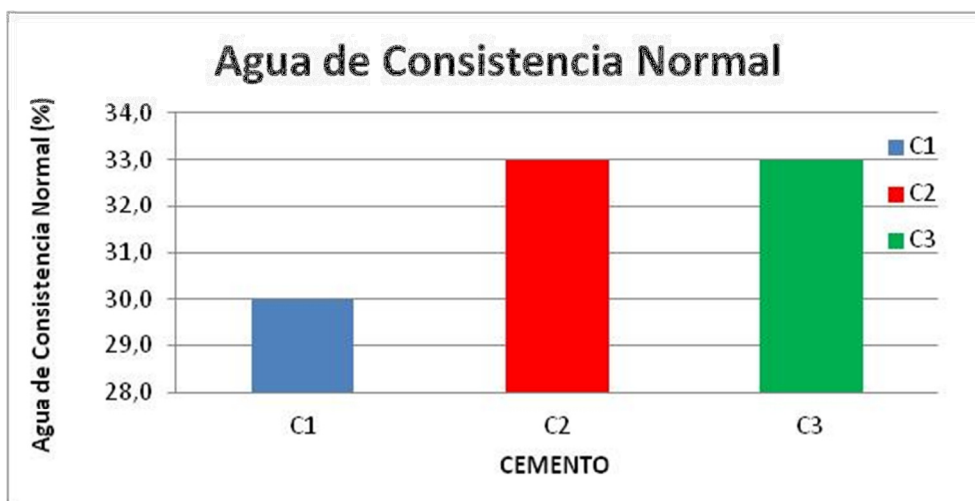
Figura 7.3. Comparación Tiempos de Fraguado de los Cementos.

Se observa que los tiempos de fraguado, inicial y final son similares entre los cementos C1 Y C2, con tiempos levemente superiores en el cemento C2. Por otra parte se tiene que los tiempos de fraguado del cemento C3 es considerablemente superior que los otros dos. Esto se explica en el hecho de que el cemento C3 tiene una cantidad de puzolana considerablemente superior lo que hace retrasar el desarrollo de las reacciones de hidratación. Por otra parte a pesar de que el cemento C2 tiene un porcentaje de adición, este tienen tiempos de fraguado muy similares al cemento C1, esto se explica por la

mayor finura que posee y que de alguna forma contrarresta los efectos de la puzolana permitiendo desarrollar las reacciones de hidratación con mayor velocidad.

### **7.1.4 Consistencia Normal.**

De acuerdo los datos de la Tabla 7.1 se presenta el siguiente grafico donde se compara el agua de consistencia de cada uno de los cementos estudiados.



**Figura 7.4. Comparación Tiempos de Fraguado de los Cementos.**

Se observa que los cementos C2 y C3 requieren un porcentaje de agua mayor que el cemento C1, esto se explica por el hecho de que los cementos con adiciones puzolánicas requieren una mayor cantidad de agua para hidratarse, debido a la reducción de la permeabilidad provocada por las puzolanas. Por otra parte un cemento con mayor finura requerirá mayor cantidad de agua.

## **7.2. PROPIEDADES MECANICAS**

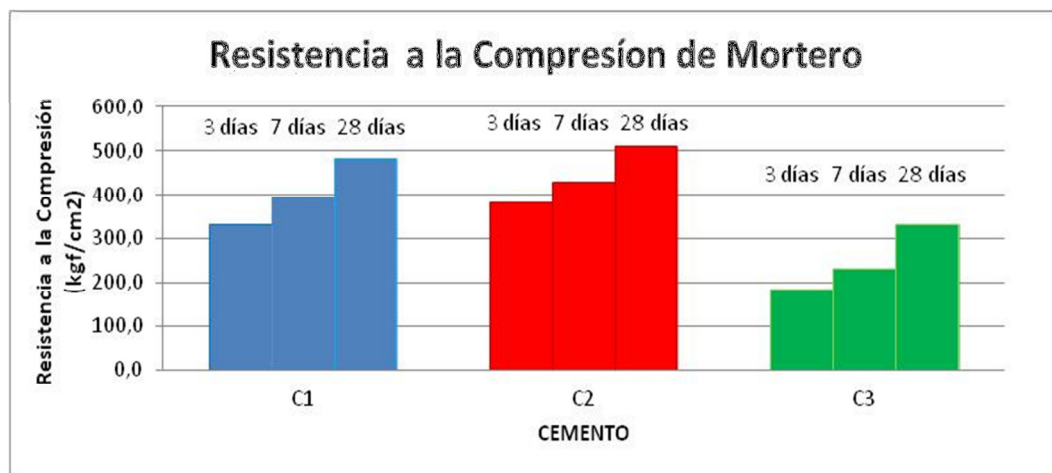
### **7.2.1 Resistencia a la Compresión de Mortero.**

En la siguiente tabla se presentan los datos referentes a la resistencia a la compresión a distintas edades de morteros fabricados con los cementos utilizados en este estudio de acuerdo a la NCh 158. Posteriormente se presentan comparaciones entre los distintos cementos y los análisis respectivos.

**Tabla 7.2. Resistencia de Morteros de Cemento a los 3, 7 y 28 días.**

Edad	Resistencia a la Compresión del Mortero (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	C1	C2	C3
3 días	332	380	185
7 días	394	428	231
28 días	481	511	332

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.2 se presenta el siguiente grafico donde se comparan para cada uno de los cementos estudiados las resistencias a la compresión de morteros ensayados a edades de 3, 7 y 28 días.



**Figura 7.5. Resistencia de Morteros de Cemento a los 3, 7 y 28 días.**

Se puede observar que las mayores resistencias las tiene el cemento C2 seguido muy de cerca por el cemento C1 mientras que el cemento con menores resistencias corresponde al cemento C3, éste orden se da para todas las edades en que se dispone de datos. Estas resistencias son consecuentes con el tipo de cemento al que corresponde cada uno, por una parte el cemento con mayor cantidad de puzolana y clasificado como corriente es el que posee menor resistencia, mientras que el cemento con una cantidad moderada de puzolana pero que al mismo tiempo tiene la mayor superficie específica es el de mayor resistencia, las cuales son muy similares al cemento Portland puro pero que posee una superficie específica menor.

### **7.3. PROPIEDADES QUÍMICAS.**

A continuación se presentan los análisis respecto a las propiedades químicas de los cementos estudiados. En la Tabla 7.3 se presentan los valores porcentuales de los óxidos principales mientras que en Tabla 7.4 se presentan los resultados de los análisis químicos realizados de acuerdo a la NCh 147 según los requisitos que indica la NCh 148.

Posteriormente se presentan comparaciones entre los distintos cementos y los análisis respectivos

**Tabla 7.3. Óxidos Principales Presentes en el Cemento.**

Composición Óxidos (%)	Cemento		
	C1	C2	C3
SiO <sub>2</sub>	21,00	25,23	38,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,11	6,27	8,88
CaO	63,60	57,15	40,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,86	2,58	2,82
SO <sub>3</sub>	2,60	3,57	2,33
MgO	1,95	2,09	1,59
Na <sub>2</sub> O	0,51	0,91	1,78
K <sub>2</sub> O	0,40	0,66	1,62

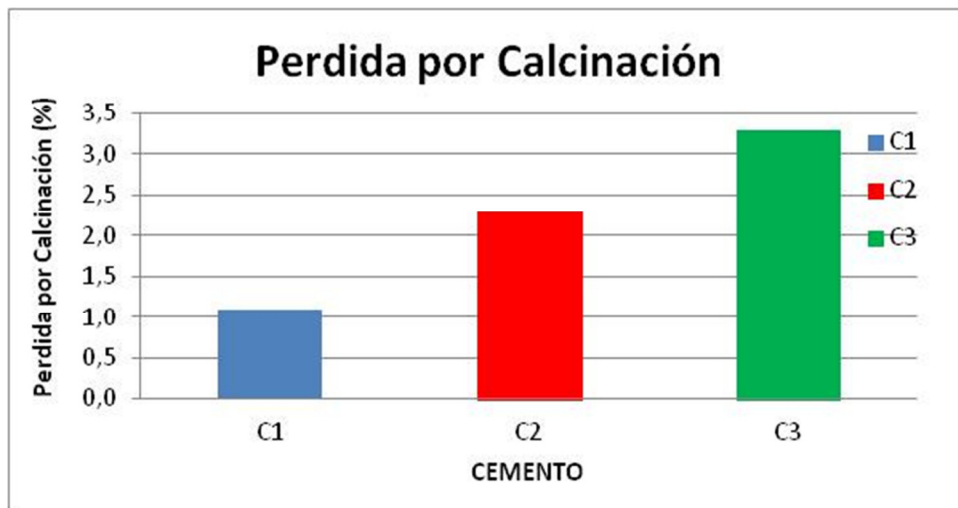
**Tabla 7.4. Propiedades Químicas de los Cementos.**

Propiedad	Cemento		
	C1	C2	C3
Perdida por Calcinación (%)	1,1	2,3	3,3
Residuo Insoluble (%)	0,8	12,19	36,93
Contenido de SO <sub>3</sub> (%)	2,57	3,24	1,97
Contenido de MgO (%)	1,5	-	-

Se debe mencionar que para el caso de los valores que difieren entre una metodología y otra, serán considerados para el análisis los valores más completos que corresponden a el análisis de óxidos principales.

### **7.3.1 Perdida por Calcinación.**

De acuerdo los datos de la Tabla 7.4 se presenta el siguiente grafico donde se comparan los valores del porcentaje de pérdida por calcinación de cada uno de los cementos del estudio.

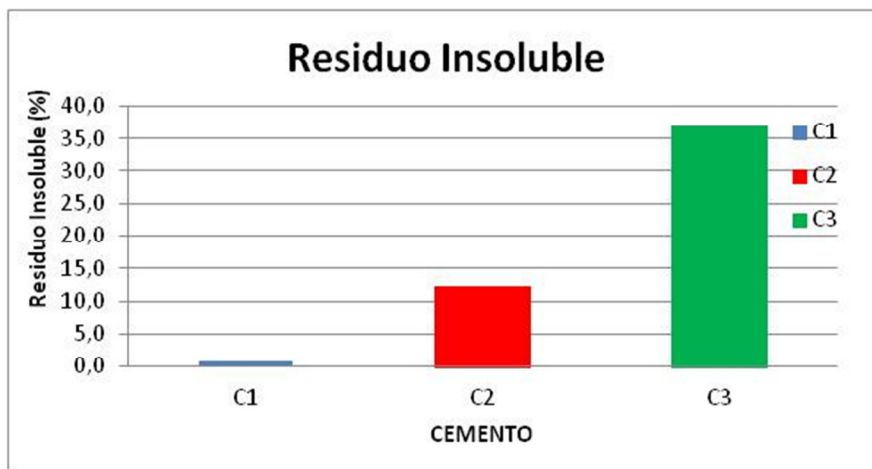


**Figura 7.6. Comparación de la Pérdida por Calcinación de los Cementos.**

Se observa que los valores de pérdida por calcinación aumentan de acuerdo a la cantidad de puzolana que posee el cemento, siendo el cemento C1 el con menor pérdida por calcinación y el cemento C3 el que posee una pérdida por calcinación mayor. Este valor es un indicativo de los contenidos de agua, CO<sub>2</sub> y cal carbonatable por calcinación. Por lo que se puede entender que los cementos con adiciones puzolánicas tengan una pérdida por calcinación mayor producto del contenido de óxido de cal en la puzolana.

### **7.3.2 Residuo Insoluble.**

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 7.4 se presenta el siguiente gráfico donde se comparan los valores del porcentaje de residuo insoluble de cada uno de los cementos del estudio.



**Figura 7.7. Comparación del Residuo Insoluble de los Cementos.**

El residuo insoluble es un indicativo del contenido de material insoluble en ácido ( $\text{SiO}_2$ ) el cual en el caso de los cementos portland puros, refleja la efectividad del proceso de clínquerización llevado a cabo en el horno, mientras que en cementos con adiciones puzolánicas, refleja el material de este tipo aportado por la adición. Por lo que en el caso de cemento C1, que corresponde a un cemento Portland puro, el valor obtenido de un 0,8% es un reflejo de un proceso llevado a cabo de buena forma pues cumple con la normativa chilena que indica que este valor debe ser menor a un 1,5%. Por otra parte los cementos C2 Y C3, tienen valores considerablemente más altos pues estos reflejan los contenidos de materiales insolubles en las adiciones puzolánicas y es coherente con los porcentajes de adición que posee cada cemento.

### 7.3.3 Trióxido de Azufre.

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.3 se presenta el siguiente gráfico donde se comparan los valores del porcentaje de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) de cada uno de los cementos del estudio.

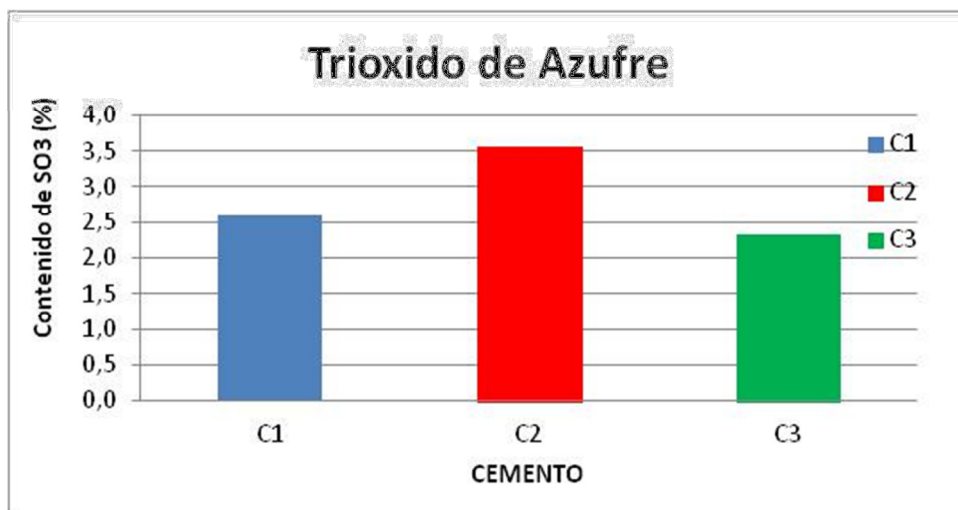


Figura 7.8. Comparación del Trióxido de Azufre de los Cementos.

Se puede ver que el mayor contenido de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) se encuentra en el cemento C2, mientras que el contenido menor los presenta el cemento C3 aunque con valores cercanos a los que posee el cemento C1. Esto se explica por el contenido de yeso de cada mezcla, el alto contenido de trióxido de azufre en cemento C2 se debe al hecho de ser un cemento con un alto valor de superficie específica lo que obliga a los productores a agregar mayor contenido de yeso con el objetivo de retrasar el fraguado, los cementos con altos contenidos de este compuesto pueden verse más expuesto al desarrollo de expansiones producto de la formación retardada de etringita.

### 7.3.4 Óxido de Magnesio.

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.4 se presenta el siguiente grafico donde se comparan los valores del porcentaje de oxido de magnesio (MgO) de cada uno de los cementos del estudio.

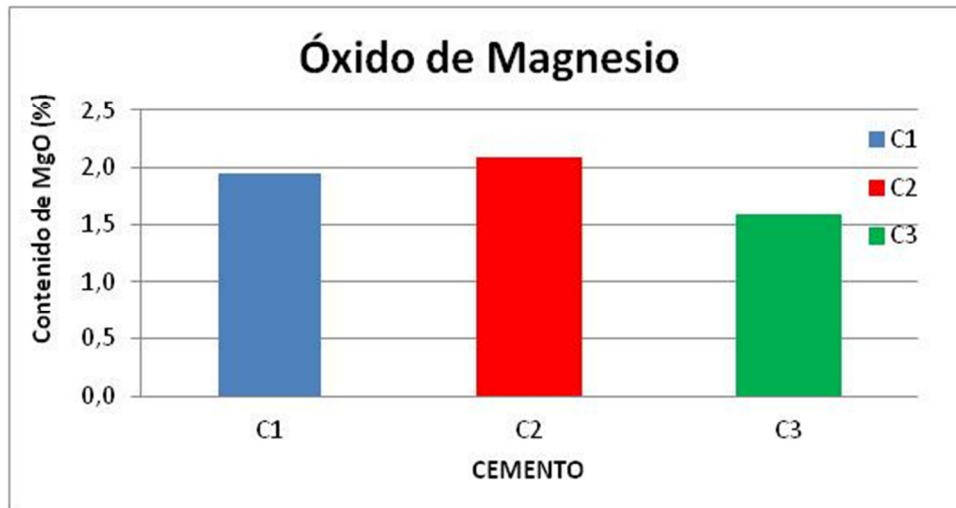


Figura 7.9. Comparación del Oxido de Magnesio de los Cementos.

Se observan contenidos similares de oxido de magnesio en los tres cementos estudiados con valores ligeramente superiores en los cementos C1 y C2. Se espera tener valores bajos de éste compuesto, puesto que un exceso podrá llevar a la generación de tensiones indeseables en el futuro, en este caso todos los cementos cumple con las normativas la respecto.

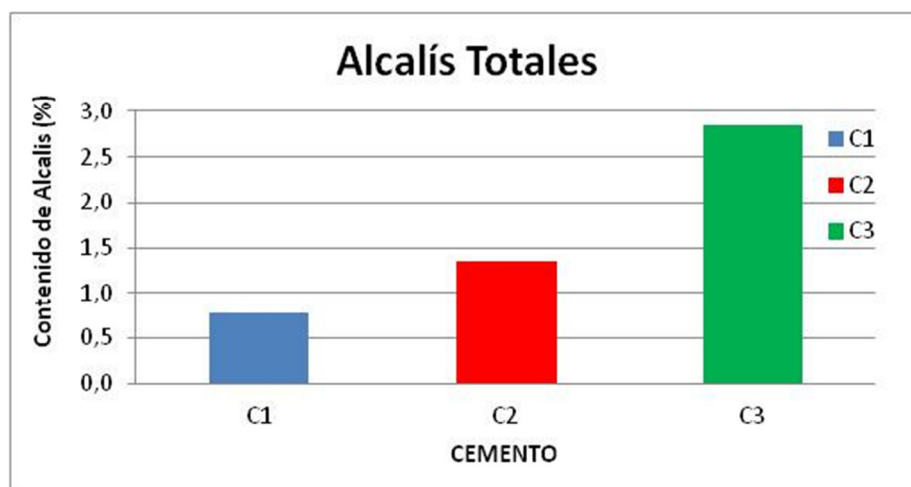
### 7.3.5 Álcalis Totales.

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.3 se presenta el siguiente grafico donde se comparan los valores del porcentaje álcalis totales de cada uno de los cementos del estudio. Este valor se calcula como la suma de proporciones de óxido de sodio ( $Na_2O$ ) y óxido de potasio ( $K_2O$ ) de acuerdo a la siguiente formula.

Fórmula 7.1. Álcalis Totales.

$$\text{Alcalís Totales (\%)} = Na_2O (\%) + 0,658 \cdot K_2O$$





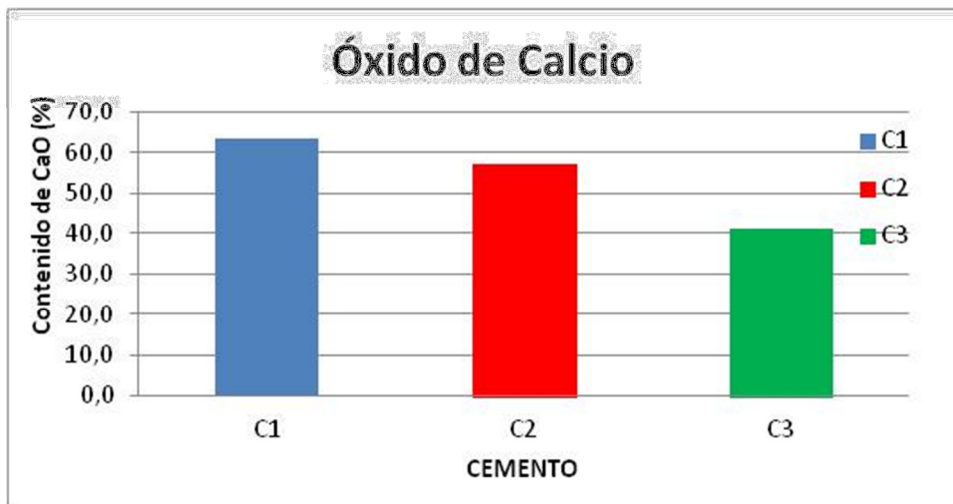
**Figura 7.10. Comparación Álcalis Totales de los Cementos.**

Se observa que los mayores contenidos de álcalis los tiene el cemento C3 seguido del cemento C2, ambos con contenido de adiciones puzolánicas, mientras que el cemento C1 es el que menor contenido tiene. Estos compuestos se intentan limitar ya que pueden reaccionar con ciertos áridos y provocar expansión y grietas en el hormigón. Para el caso del cemento C1 se tienen bajos contenidos de álcalis lo que no implicaría un riesgo de reacciones indeseables, sin embargo en el caso de los otros dos cementos estos contenidos aumentan, esto no significa necesariamente un riesgo, puesto que las puzolanas en caso de desarrollarse el fenómeno, inhiben el deterioro provocado por la reacción de los álcalis con los áridos reactivos.

### **7.3.6 Óxidos Fundamentales.**

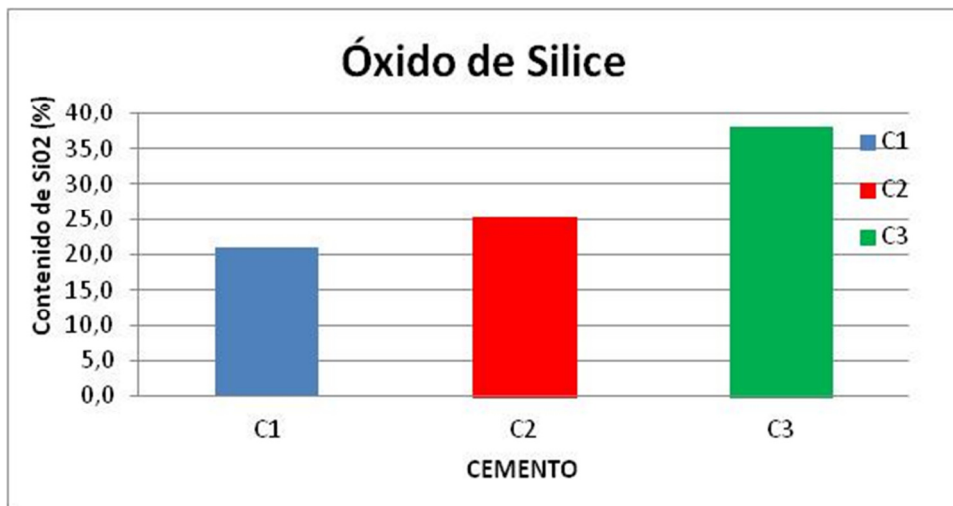
A continuación se presentan gráficos comparativos de los óxidos fundamentales de cada uno de los cementos estudiados, estos óxidos son los responsables de formar los compuestos responsables del fraguado y de la resistencia del hormigón y por lo tanto son los que mayor importancia tienen en la formación de las fases mineralógicas del cemento. Estos óxidos corresponden al óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Lugo a partir de los valores que se presentan en la Tabla 7.3 se realizará una estimación, mediante las ecuaciones de Bogue, de la composición mineralógica de cada uno de los cementos.

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.3 se presenta el siguiente gráfico donde se comparan los valores del contenido de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) de cada uno de los cementos del estudio.



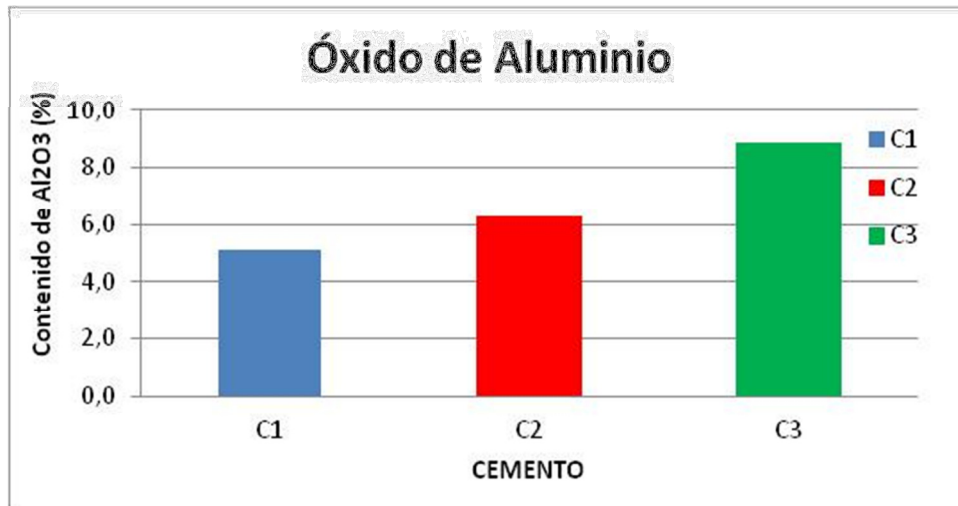
**Figura 7.11. Comparación del Oxido de Calcio de los Cementos.**

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.3 se presenta el siguiente grafico donde se comparan los valores del contenido de oxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de cada uno de los cementos del estudio.



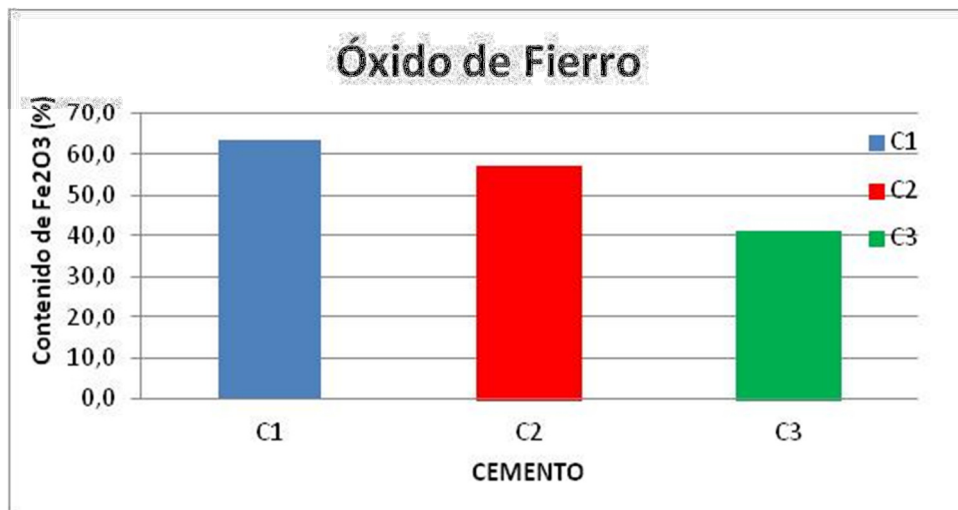
**Figura 7.12. Comparación del Oxido de Sílice de los Cementos.**

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.3 se presenta el siguiente grafico donde se comparan los valores del contenido de oxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de cada uno de los cementos del estudio.



**Figura 7.13. Comparación del Oxido de Aluminio de los Cementos.**

De acuerdo a los datos de la Tabla 7.3 se presenta el siguiente grafico donde se comparan los valores del contenido de oxido de fierro ( $Fe_2O_3$ ) de cada uno de los cementos del estudio.



**Figura 7.14. Comparación del Oxido de Fierro de los Cementos.**

El análisis químico de los cementos en términos de sus óxidos no tiene mucho significado respecto de las propiedades del mismo, ya que son los compuestos que se forman a partir de estos, los responsables del desarrollar las propiedades del hormigón. Por esta razón, a partir de estos valores se hará una estimación de los componentes mineralógicos del clínquer utilizando las ecuaciones de Bogue.

## 7.4. ENSAYO DE EXPANSIVIDAD.

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos luego de realizar el ensayo acelerado de expansividad para evaluar el fenómeno de formación de etringita retardada en los morteros en estudio. En la tabla 7.11 se presentan las expansiones promedio obtenidas a distintas edades para cada una de las series estudiadas, incluidas las muestras de control las cuales no fueron sometidas a los ciclos térmicos. Para la medición de las expansiones se tomo como día cero el siguiente día luego de finalizados los ciclos de humedecimiento y secado, posteriormente se hará un análisis crítico respecto de este punto.

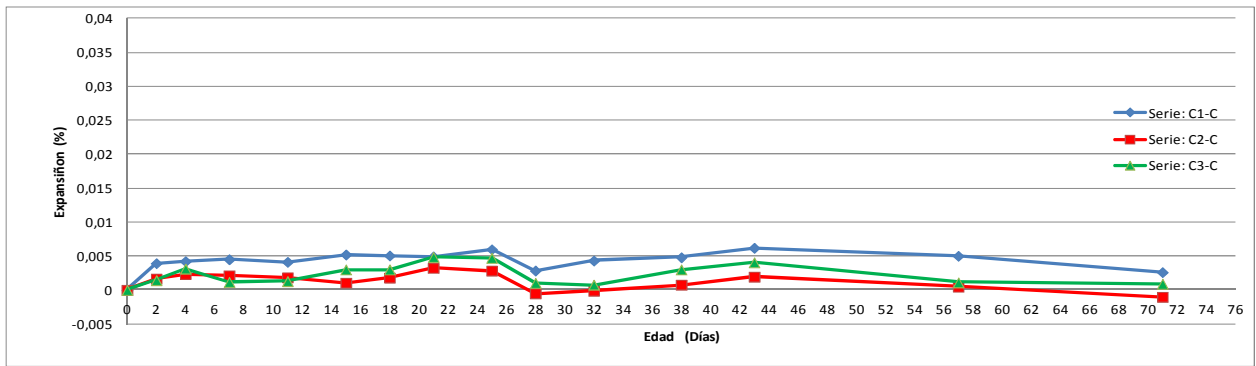
Tabla 7.5. Expansiones Promedio Obtenidas Hasta los 71 Días de Medición.

Fecha	07-may	09-may	11-may	14-may	18-may	22-may	25-may	28-may
Día	0	2	4	7	11	15	18	21
<b>Probeta</b>	<b>Expansión (%)</b>							
<b>C1-E</b>	0,000	0,070	0,076	0,083	0,092	0,100	0,105	0,111
<b>C1-C</b>	0,000	0,004	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005
<b>C2-E</b>	0,000	0,075	0,083	0,091	0,105	0,120	0,130	0,139
<b>C2-C</b>	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,003
<b>C3-E</b>	0,000	0,071	0,077	0,087	0,101	0,104	0,109	0,112
<b>C3-C</b>	0,000	0,001	0,003	0,001	0,001	0,003	0,003	0,005
Fecha	01-jun	04-jun	08-jun	14-jun	19-jun	03-jul	17-jul	
Día	25	28	32	38	43	57	71	
<b>Probeta</b>	<b>Expansión (%)</b>							
<b>C1-E</b>	0,116	0,117	0,121	0,123	0,125	0,132	<b>0,138</b>	
<b>C1-C</b>	0,006	0,003	0,004	0,005	0,006	0,005	<b>0,003</b>	
<b>C2-E</b>	0,153	0,161	0,168	0,181	0,196	0,217	<b>0,237</b>	
<b>C2-C</b>	0,003	0,000	0,000	0,001	0,002	0,000	<b>-0,001</b>	
<b>C3-E</b>	0,112	0,111	0,112	0,116	0,117	0,117	<b>0,117</b>	
<b>C3-C</b>	0,005	0,001	0,001	0,003	0,004	0,001	<b>0,001</b>	

Con el objetivo de facilitar la comprensión de los resultados se presentaran gráficos comparativos entre las series de un mismo tipo.

### 7.4.1 Expansividad en Elementos de Control.

En la figura 7.15, se presenta un grafico comparativo de las expansiones promedio obtenidas para cada una de las series que consideran las muestras de control.

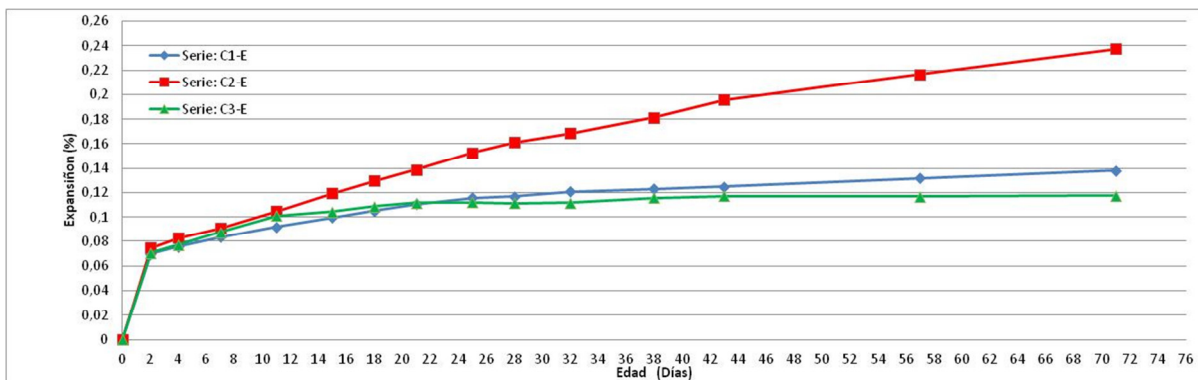


**Figura 7.15. Expansiones Promedio Muestras de Control.**

Se puede ver que en general, las muestras de control de todas las series tienen un comportamiento similar, obteniéndose expansiones que no superan el 0,006%. Esta expansión máxima es solo alcanzada por el cemento C1 en mediciones puntuales. Las expansiones finales a los 71 días no superan el 0,003% correspondiente al cemento C1, mientras que el cemento C2 sufre una pequeña contracción de un 0,001% la cual puede ser atribuible a errores de medición, ya que este comportamiento solo se observa en la última medición.

#### **7.4.2 Expansividad en Elementos de Ensayo.**

En la figura 7.16, se presenta un grafico comparativo de las expansiones obtenidas para cada una de las series de ensayos, las cuales fueron sometidas a la metodología que acelera el proceso de formación de etringita retardada.



**Figura 7.16. Expansiones Promedio Muestras de Ensayo.**

Como se puede ver en el grafico las expansiones finales son mayores al 0,117% en todos los casos, sin embargo se observa una marcada diferencia de comportamiento para la series C2-E. Se observa claramente que las expansiones alcanzadas por el cemento C2 son considerablemente mayores que las de los otros cementos, mientras que las expansiones del cemento C1 son levemente mayores que las alcanzadas por el cemento

C3. Sin embargo antes de realizar un análisis mayor se debe distinguir la naturaleza de estas expansiones. Como se menciona, la metodología original llamada Método Duggan, considera que el punto cero para calcular las expansiones relativas corresponde al día siguiente a finalizados los ciclos de humedecimiento y secado. Este punto es criticado por varios autores ya que estos resultados estarían alterados al no considerar las contracciones que sufren las probetas luego del secado al horno seco y el posterior aumento de volumen producto de la absorción de agua. Este punto crítico es coherente con el grafico, donde se observa que las expansiones y su desarrollo son similares en todas las series estudiadas hasta aproximadamente los 12 días, donde se nota un desacople de la curva correspondiente al cemento C2, por lo que se podría suponer que recién en este punto se comienzan a desarrollar las expansiones debido al fenómeno estudiado. Sin embargo, esta afirmación no sería rigurosa, puesto que no necesariamente todas las series se comportan de la misma forma ni desarrollarán las posibles expansiones de forma similar, esto se confirma al observar las expansiones desarrolladas por los cementos C1 Y C3 los cuales se comportan de manera similar hasta el día 25 aproximadamente donde se observa un desacople. Por esta razón y considerando las críticas al respecto de algunos autores es que previo al sometimiento a los ciclos de humedecimiento y secado se tomaron mediciones referenciales con el objetivo de determinar las contracciones sufridas producto de los ciclos de secado al horno seco y así distinguir las expansiones producto de la absorción de agua de las generadas por el fenómeno de formación de etringita retardada.

En la siguiente tabla se presentan las contracciones promedio experimentadas por las series correspondientes a las muestras de ensayo, estos resultados consideran como medición inicial el momento previo a el sometimiento al primer ciclo de sacado luego se un almacenamiento en agua por 3 días.

**Tabla 7.6. Contracción Inicial por Secado Probetas de Ensayo.**

<b>Serie</b>	<b>Contracción por Secado (%)</b>
<b>C1-E</b>	0,113
<b>C2-E</b>	0,123
<b>C3-E</b>	0,115

Se observa que las contracciones experimentadas producto de los ciclos de secado son bastante altas y que el comportamiento de todas las series es similar, con una contracción levemente superior para el cemento C2.

Para realizar un mejor análisis y tener una mayor comprensión de los resultados, se realizará una corrección las expansiones obtenidas sobre series correspondientes a las probetas sometidas a los ciclos a altas temperaturas. La corrección se realizará descontando la expansión correspondiente a la absorción de agua producto de las contracciones iniciales por secado.

De esta manera, las expansiones corregidas, con las cuales se realizarán los análisis posteriores se presentan en la Tabla 7.7.

Tabla 7.7. Expansiones Promedio Corregidas.

Fecha	07-may	09-may	11-may	14-may	18-may	22-may	25-may	28-may
Día	0	2	4	7	11	15	18	21
<b>Probeta</b>	<b>Expansión (%)</b>							
<b>C1-E</b>	-0,113	-0,043	-0,037	-0,029	-0,021	-0,013	-0,008	-0,002
<b>C2-E</b>	-0,123	-0,048	-0,040	-0,032	-0,018	-0,003	0,007	0,016
<b>C3-E</b>	-0,115	-0,044	-0,038	-0,027	-0,014	-0,011	-0,006	-0,003
<b>Fecha</b>	<b>01-jun</b>	<b>04-jun</b>	<b>08-jun</b>	<b>14-jun</b>	<b>19-jun</b>	<b>03-jul</b>	<b>17-jul</b>	
<b>Día</b>	<b>25</b>	<b>28</b>	<b>32</b>	<b>38</b>	<b>43</b>	<b>57</b>	<b>71</b>	
<b>Probeta</b>	<b>Expansión (%)</b>							
<b>C1-E</b>	0,003	0,004	0,008	0,010	0,012	0,019	0,025	
<b>C2-E</b>	0,030	0,038	0,045	0,059	0,073	0,094	0,114	
<b>C3-E</b>	-0,003	-0,004	-0,003	0,001	0,002	0,002	0,003	

### 7.4.3 Comparación entre Elementos de Control y de Ensayo.

Una comparación de las expansiones promedio corregidas versus las expansiones desarrolladas por los elementos de control construidos con un mismo tipo de cemento serán presentados en los siguientes gráficos junto con los análisis respectivos.

A continuación se presenta un grafico comparativo entre las expansiones desarrolladas por las probetas consideradas como muestras de control y las probetas sometidas a la metodología de ensayo para el caso del cemento C1.

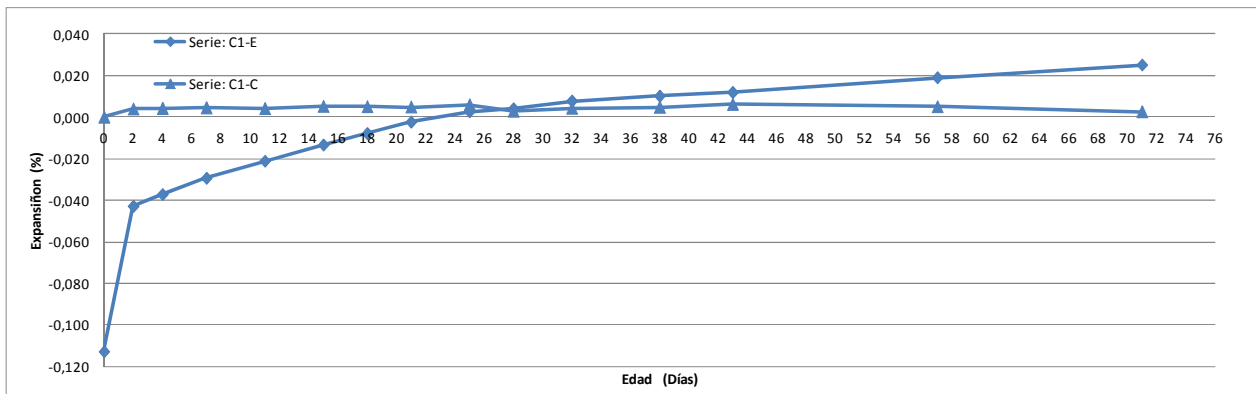
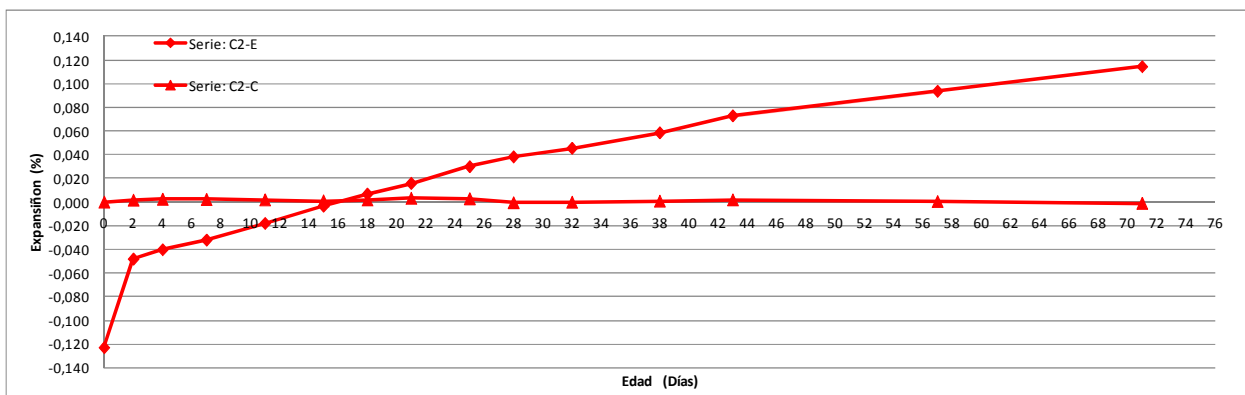


Figura 7.17. Serie C1. Expansiones desarrolladas por Elementos de Control en Comparación a los Elementos Ensayados.

Desde el grafico anterior se puede observar que la serie C1-C correspondiente a las muestras de control fabricadas con el cemento C1, presenta un comportamiento regular a lo largo del tiempo sin desarrollar expansiones considerables como tales las cuales solo alcanzan un 0,003%, por otra parte se observa que para el caso de las muestras sometidas a la metodología de ensayo estas desarrollan una expansión atribuible a la absorción de agua luego del secado hasta los 28 días, luego de este punto las probetas comienzan a desarrollar expansiones mayores las cuales pueden ser atribuibles a un fenómeno expansivo producto de la formación de etringita retardada, la expansión final a los 71 días es de un 0,025%.

Se pueden observar tres etapas referentes a las expansiones desarrolladas, una primera etapa ocurre en los 2 primeros días donde se recupera rápidamente parte de la contracción desarrollada producto del secado, luego una segunda etapa entre los 3 y 28 días donde se recupera con menor velocidad la contracción, finalmente una tercera etapa, que se desarrolla entre los 28 y 71 días en que se desarrollan expansiones con una velocidad aún menor, estas expansiones serían atribuibles a la formación de etringita retardada. Se podría considerar que el periodo de latencia antes del desarrollo del presumible fenómeno es en este caso de 28 días.

A continuación se presenta un grafico comparativo entre las expansiones desarrolladas por las probetas consideradas como muestras de control y las probetas sometidas a la metodología de ensayo para el caso del cemento C2.



**Figura 7.18. Serie C2. Expansiones desarrolladas por Elementos de Control en Comparación a los Elementos Ensayados.**

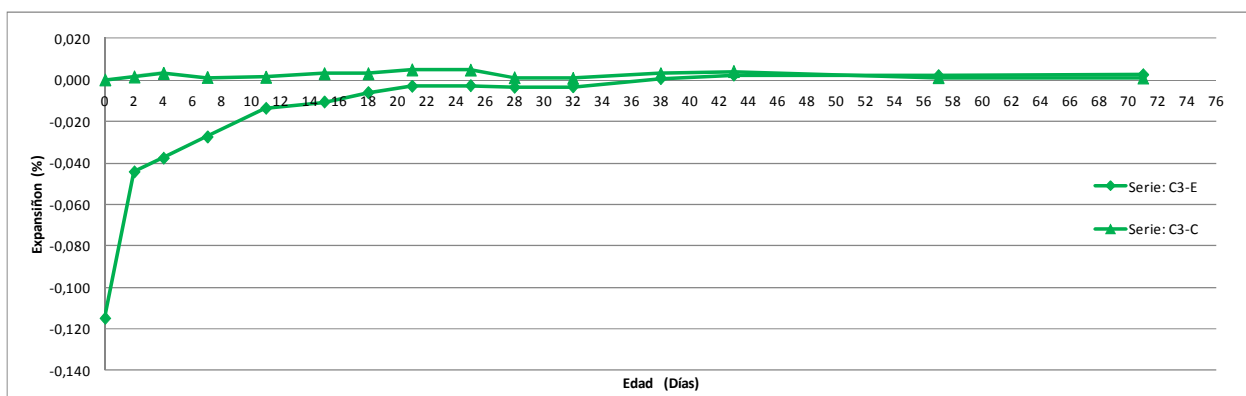
Se puede ver en el grafico que la serie C2-C, que corresponde al promedio de las muestras de control fabricadas con el cemento C2, presenta un comportamiento regular a lo largo del tiempo sin desarrollar expansiones considerable, finalizado la etapa de mediciones, a los 71 días, se registra una contracción de un 0,001% las cual puede considerarse despreciable. Por otra parte en el caso de las muestras sometidas a la metodología de ensayo, se observa que estas desarrollan una expansión atribuible a la absorción de agua, luego del secado, hasta aproximadamente los 16 días, que es donde se recupera el 100% de la contracción, luego de este punto las probetas comienzan a



desarrollar expansiones mayores las cuales pueden ser atribuibles a un fenómeno expansivo producto de la formación de etringita retardada, la expansión final a los 71 días es de un 0,114%.

Se pueden observar tres etapas referentes a las expansiones desarrolladas, una primera etapa ocurre en los 2 primeros días donde se recupera rápidamente parte de la contracción desarrollada producto del secado, luego una segunda etapa entre los 3 y 16 días donde se recupera la totalidad de la contracción inicial con una velocidad menor, finalmente una tercera etapa entre los 17 y 71 días en que se desarrollan expansiones con una velocidad similar, estas expansiones serían atribuibles a la formación de etringita retardada. Se podría considerar que el periodo de latencia antes del desarrollo del fenómeno expansivo es en este caso de 16 días.

A continuación se presenta un grafico comparativo entre las expansiones desarrolladas por las probetas consideradas como muestras de control y las probetas sometidas a la metodología de ensayo para el caso del cemento C3.



**Figura 7.19. Serie C3. Expansiones desarrolladas por Elementos de Control en Comparación a los Elementos Ensayados.**

Se puede ver en el grafico que la serie C3-C, que corresponde al promedio de las muestras de control fabricadas con el cemento C3, presenta un comportamiento regular a lo largo del tiempo sin desarrollar expansiones considerables, a los 71 días se registra una pequeña expansión de un 0,001% las cual puede considerarse nula. Por otra parte en el caso de las muestras sometidas a la metodología de ensayo, se observa que estas desarrollan una expansión atribuible a la absorción de agua, luego del secado, hasta aproximadamente los 38 días, que es donde se recupera el 100% de la contracción, luego de este punto las probetas se comportan de manera muy similar a las muestras de control y no presentan expansiones atribuibles a la formación de etringita retardada. La expansión final registrada a los 71 días es de un 0,003%.

Se pueden distinguir cuatro etapas referentes a las expansiones desarrolladas, una primera etapa ocurre en los 2 primeros días donde se recupera rápidamente parte de la contracción desarrollada producto del secado, luego una segunda etapa entre los 3 y 21

días donde se recupera alrededor de un 97% de la contracción inicial, la cual se desarrolla con una menor velocidad, luego una tercera etapa entre los 22 y 38 días, donde se recupera la totalidad de la contracción inicial, finalmente una cuarta etapa entre los 39 y 71 días en que el comportamiento es similar al desarrollado por las muestras de control sin el desarrollo de expansiones por sobre la longitud inicial.

#### 7.4.4 Expansividad Corregida en los Elementos de Ensayo.

Una comparación de las expansiones promedio corregidas, para cada una de las series ensayadas se presenta en el siguiente grafico.

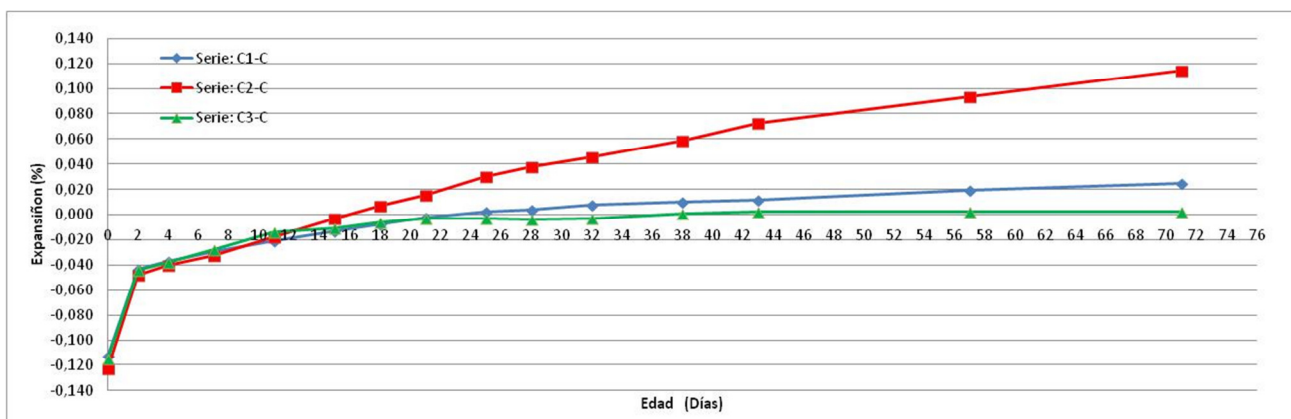


Figura 7.20. Expansiones Corregidas Desarrolladas en el Tiempo.

Considerando estos nuevos valores corregidos, se observa que la mayor expansión desarrollada a los 71 días de medición corresponde al cemento C2, esta serie desarrolla una expansión final promedio de un 0,114%, la cual es considerablemente mayor a la desarrollada por el cemento C1, el cual desarrolla una expansión de un 0,025%, mientras que para el cemento C3 la expansión medida es de un 0,003%, es decir prácticamente nula.

Como era de esperar, las expansiones desarrolladas son atribuibles a la metodología de ensayo a las que fueron sometidas las probetas, metodología que contempló la aplicación de severos ciclos térmicos. Esto se confirma al comparar el comportamiento de las muestras de ensayo con el comportamiento de las muestras de control, donde se observa que estas últimas no desarrollan expansión en ningún caso. La metodología a la que fueron sometidas las muestras de ensayo, según la literatura revisada, pretende acelerar el fenómeno expansivo originado por la formación de etringita retardada, por lo que las expansiones experimentadas por las series construidas con los cementos C1 y C2 serían atribuibles al desarrollo de etringita expansiva en la pasta de cemento de estas probetas. Esta hipótesis se intentará confirmar realizando un análisis entre los factores, que según la literatura, influyen en el desarrollo o no de este fenómeno y las expansiones medidas en el tiempo. De esta forma se intentará por una parte confirmar la naturaleza de las

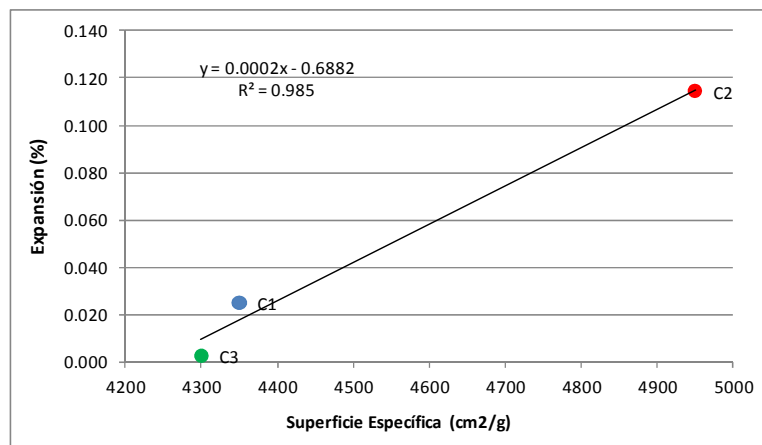
expansiones y por otro lado confirmar cuales son los factores influyen en el desarrollo de este fenómeno y cuáles de estos son determinantes para que este suceda.

#### 7.4.4.1 Efectos de las Propiedades Físicas del Cemento.

A continuación se presentará el efecto de las propiedades físicas más relevantes del cemento en cuanto a una potencial influencia en el desarrollo de expansiones producto de la formación de etringita retardada, en este caso se evaluará tanto el efecto del pesos específico del cemento como también la influencia de las superficie especifica de estos mismos.

- Superficie Específica:

En la siguiente figura se presenta un grafico que muestra la relación entre las expansiones promedio desarrolladas por cada una de las probetas de ensayo a los 71 días de medición y la superficie especifica de los cementos utilizados para su confección.



**Figura 7.21. Influencia la Superficie Específica en la Expansión.**

Se observa una correlación entre la finura del cemento y las expansiones de las probetas confeccionadas con estos. Se puede ver que a mayor superficie especifica son mayores las expansiones desarrolladas con un coeficiente de correlación de  $R^2=0,985$  el cual es bastante alto. De acuerdo con la literatura cementos con finura mayor son más susceptibles a sufrir del fenómeno de formación de etringita retardada, por una parte un grano más fino acelera los procesos químicos por lo que el desarrollo de la etringita retardada se daría con mayor velocidad y con una ocurrencia más temprana, como es el caso del cemento C2. Por otra parte un cemento más fino aumenta el calor de hidratación lo que en este caso, dado el tamaño de las probetas, no sería considerable en el efecto sobre la expansión final.

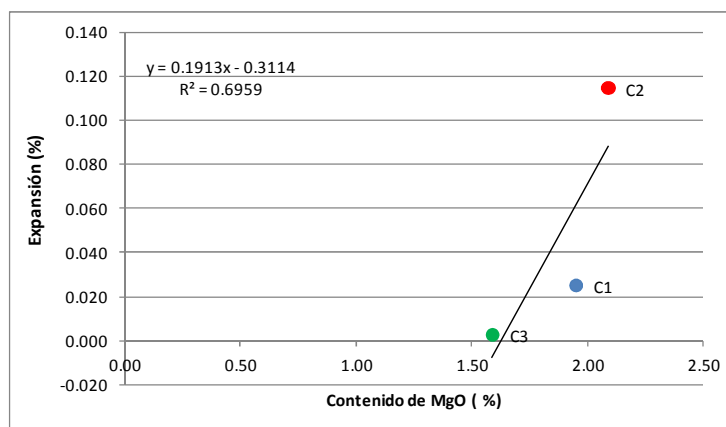
En otro ámbito un cemento más fino obliga a la utilización de una mayor cantidad de yeso, con el objetivo de regular los procesos de fraguado, el cual contiene un alto contenido de trióxido de azufre, lo que de acuerdo a la literatura es un factor determinante en el desarrollo de este fenómeno. Esto puede ser también una explicación de las expansiones mayores experimentadas por el cemento C2.

#### 7.4.4.2 Efectos de las Propiedades Químicas del Cemento.

A continuación se presentará el efecto de las propiedades químicas más relevantes del cemento en cuanto a una potencial influencia en el desarrollo de expansiones producto de la formación de etringita retardada, en este caso se evaluará la influencia de los óxidos que de acuerdo a la literatura tienen mayor efecto sobre las expansiones debido al fenómeno estudiado, al mismo tiempo se evaluará el efecto del contenido de puzolanas y la fase mineralógica mas importante en este aspecto. Posteriormente se presentara el efecto de índices y relaciones que pretenden predecir la aparición de este fenómeno.

- Óxido de Magnesio (MgO).

En la Figura 7.22 se presenta un grafico que relaciona las expansiones promedio desarrolladas por cada una de las probetas de ensayo a los 71 días de medición y los contenidos de óxido de magnesio (MgO) en los cementos estudiados.



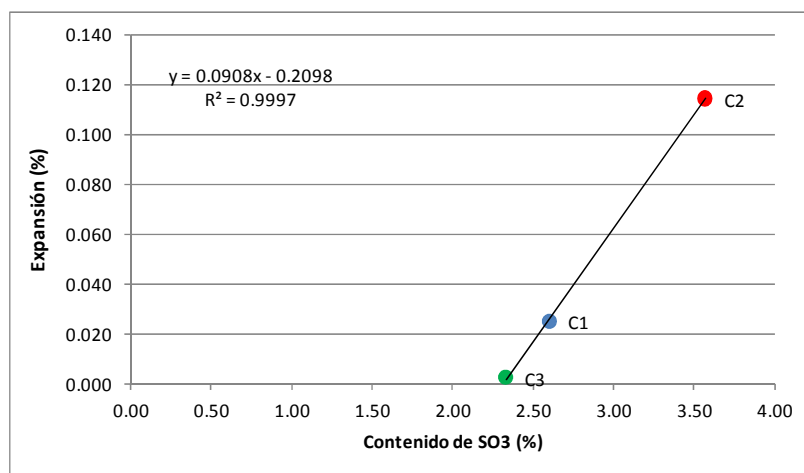
**Figura 7.22. Influencia del Óxido de Magnesio en la Expansión.**

Se observa cierta correlación entre las expansiones desarrolladas y los contenidos de óxido de magnesio, aun que esta correlación es solo de  $R^2=0,696$ , siendo bastante similares los contenidos de este óxido en los cementos C1 y C3, que son los que sufren de expansiones. En estudios anteriores también se han dado correlaciones similares, estas son explicables por la formación de hidróxido de magnesio el cual precipita disminuyendo el pH lo que facilitaría la descomposición del Gel de Tobermorita (CSH) propiciando así la formación de etringita. Sin embargo este aspecto no está

suficientemente estudiado y no sería un factor determinante en el desarrollo de expansión por el fenómeno en estudio.

- Trióxido de Azufre (SO<sub>3</sub>).

En la figura 7.23 se presenta un grafico que relaciona las expansiones promedio desarrolladas por cada una de las probetas de ensayo a los 71 días de medición y los contenidos de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) en los cementos estudiados.

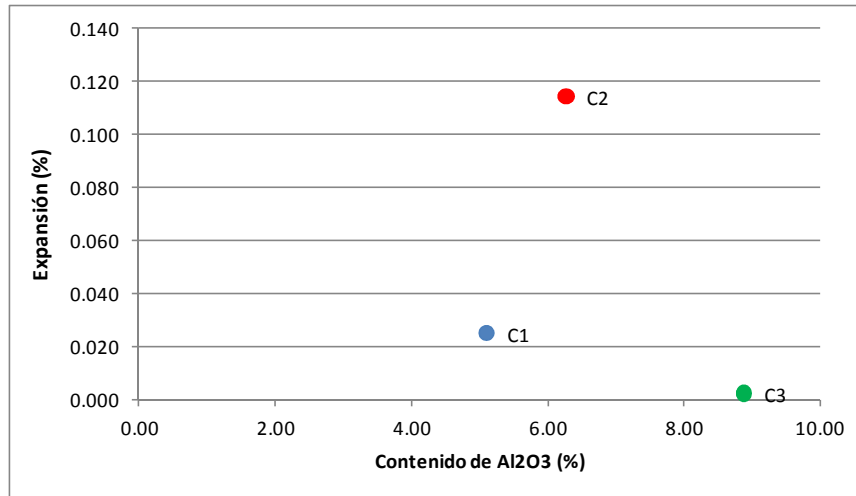


**Figura 7.23. Influencia del Trióxido de Azufre (SO<sub>3</sub>) en la Expansión.**

Se observa una clara correlación entre los contenidos de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y las expansiones desarrolladas a los 71 días. El coeficiente de correlación obtenido es, en este caso, de  $R=0,999$  lo que establece una relación directa entre el contenido de este óxido y el desarrollo del fenómeno. Por otra parte se confirma de cierta forma la naturaleza de la expansión producto de la formación de etringita retardada dado que este compuesto es esencial para la formación de esta al ser uno de sus componentes mayoritarios y más reactivos. De acuerdo a la literatura altos contenidos de este compuesto facilitan la formación de etringita en desmedro de la formación de monosulfatos, por lo que la correlación obtenida es coherente con la teoría y con correlaciones obtenidas en estudios anteriores. Esto confirmaría la denominación del fenómeno estudiado como un ataque de sulfatos internos. El estudio en que se establece la metodología en la que se basa este trabajo indica que cementos con un contenidos de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) superiores a un 2,5% son cementos con potencial desarrollo del fenómeno lo que en este caso se confirma, sin embargo se deben analizar otros factores que puedan propiciar o evitar el desarrollo de expansiones por etringita retardada. Se puede concluir que las expansiones desarrollada por el cemento C1 y en menor medida por el cemento C2 tienen directa relación con su contenido de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y con la formación de etringita retardada.

- Oxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

En la figura 7.24 se presenta un grafico que relaciona las expansiones promedio desarrolladas por cada una de las probetas de ensayo a los 71 días de medición y los contenidos de oxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en los cementos estudiados.

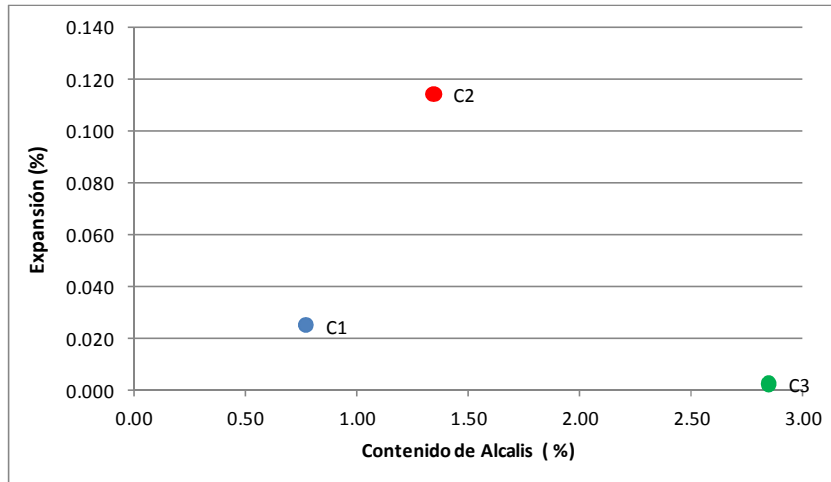


**Figura 7.24. Influencia del Óxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en la Expansión.**

Como se puede ver en el grafico anterior no se ve una correlación directa entre el contenido de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y las expansiones desarrolladas a pesar de que este compuesto es esencial para la formación de los compuestos aluminosos. Esto se debe a que existe relación entre las cantidades de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en que distintas proporciones de cada uno de estos compuestos trae como consecuencias distintas cantidades de etringita y monosulfatos. Una alta concentración de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en desmedro del trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) facilita la formación de monosulfatos en lugar de etringita, por otra parte altos contenidos de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) en relación al contenido de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aumenta la probabilidad de la formación de etringita expansiva. Se debe considerar que no todas las cantidades de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) están disponibles para la formación de sulfoaluminatos, como la etringita y monosulfatos, por lo que habría una proporción óptima de estos dos compuestos que maximizarían la formación de etringita expansiva. Estudios realizados anteriormente determinaron que la razón molar  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  es un buen indicativo de este comportamiento determinando que las expansiones mayores se encuentran en cementos con una razón molar  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  cercano a 1,0. Un grafico de la influencia de este índice en la expansividad de los cementos se presenta más adelante.

- Álcalis Totales ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \text{K}_2\text{O}$ ).

Los álcalis totales equivalentes se determinan como una relación entre proporciones de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), un gráfico con la influencia de este parámetro se presenta en la siguiente figura.

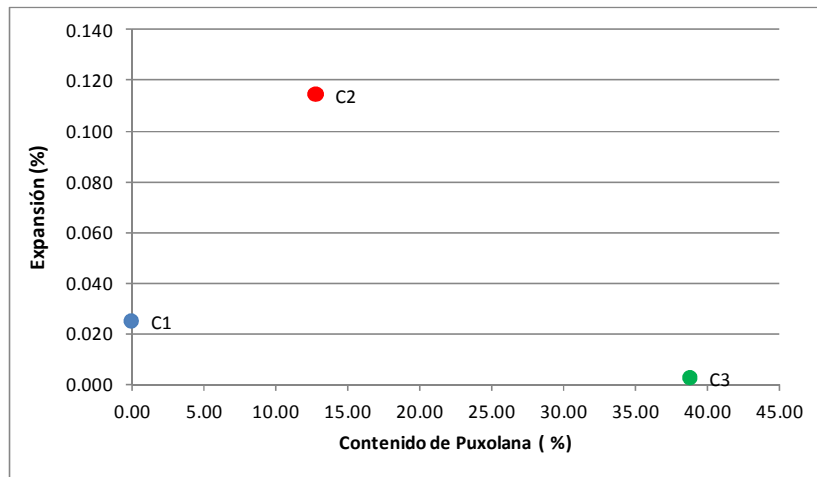


**Figura 7.25. Influencia de los Álcalis Totales en la Expansión.**

No se observa una correlación directa entre los contenidos de álcali del cemento, esto, por una parte descarta la posibilidad de expansiones producidas por algún tipo de reacción álcali – arido, lo que reafirma la idea de que las expansiones son producto de la formación de etringita retardada. Por otra parte no se puede descartar una influencia de este parámetro en las expansiones obtenidas, de acuerdo a la literatura contenidos de álcalis mayores contribuyen a la inestabilidad de la etringita durante su formación primaria, descomponiéndola con mayor facilidad y facilitando un potencial desarrollo expansivo a futuro, sin embargo se ha establecido que este efecto se daría solo en cementos con un alto contenido de sulfatos, por lo que sería coherente pensar que en los cementos con mayor contenido de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) el contenido de álcalis contribuiría a las expansiones desarrolladas.

- Contenido de Puzolanas.

En la figura 7.26 se presenta un gráfico que relaciona las expansiones promedio desarrolladas por cada una de las probetas de ensayo a los 71 días de medición y los contenidos de puzolana en los cementos estudiados, estos contenidos fueron estimados a partir de lo indicado en la norma europea CEN/TR 196-4:2007.



**Figura 7.26. Influencia del Contenido de Puzolana en la Expansión.**

Como se puede ver no existe una correlación entre los contenidos de puzolana y las expansiones desarrolladas, sin embargo el efecto que pudieran tener las puzolanas sobre la inhibición de este fenómeno pueden verse opacados por los altos contenidos de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) que tiene el cemento C2. Por otra parte en la literatura se ha establecido que el reemplazo de porciones de cemento por puzolanas de distinto origen inhibe e incluso eliminan la ocurrencia de este fenómeno, en estos estudios se establecen que este reemplazo debe ser de entre un 30 a un 40%. De esta forma si se consideran los cementos C1 y C3, los cuales tienen contenidos relativamente parecidos de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) se puede ver que un reemplazo de un 38% de cemento por puzolana elimina por completo la expansividad, este efecto inhibitor de la puzolana se explica por los contenidos de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) reactiva que estas poseen los cual contribuiría a formar monosulfato en desmedro de etringita. Se puede concluir que un reemplazo considerable de cemento por puzolana en cementos con un contenido moderado de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) contribuye a controlar y hasta eliminar la expansión, mientras que un reemplazo bajo no tendría mayor influencia en el desarrollo del fenómeno.

- Contenido de Aluminato Tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ).

El contenido de aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) es uno de las propiedades del cemento, que según la literatura, influyen directamente sobre el fenómeno estudiado. Si bien no se cuenta con la composición mineralógica de cada uno de los cementos, se realizará una estimación a partir de las ecuaciones de Bogue, considerando el porcentaje de adiciones que tienen cada cemento.



**Tabla 7.8. Ecuación de Bogue para C<sub>3</sub>A (ASTM C150).**

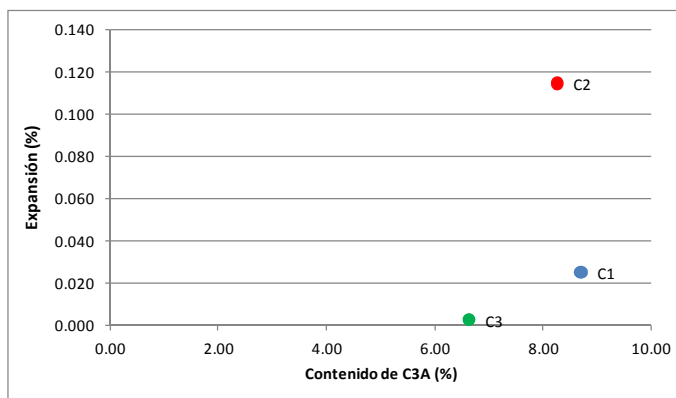
Compuesto	Nombre	Fórmula
C <sub>3</sub> A	Aluminato Tricálcico (3 CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$2,65 \cdot Al_2O_3 - 1,692 \cdot Fe_2O_3$

A partir de la ecuación para el aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) se obtiene una aproximación del contenido de este compuesto en cada uno de los cementos estudiados.

**Tabla 7.9. Estimación del contenido de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A).**

Proporción aluminato tricálcico C <sub>3</sub> A. (%)		
C1	C2	C3
8,7	8,26	6,64

En la Figura 7.27 se presenta un grafico que relaciona las expansiones promedio desarrolladas por cada una de las probetas de ensayo a los 71 días de medición y los contenidos de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) en los cementos estudiados.



**Figura 7.27. Influencia del Contenido de Aluminato Tricálcico (C<sub>3</sub>A) en la Expansión.**

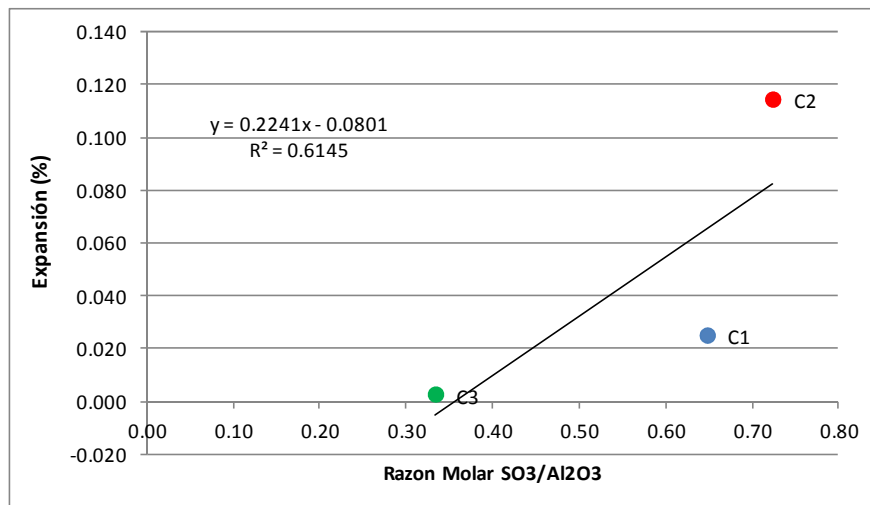
A pesar de que no se observa una correlación entre esta fase del cemento portland y las expansiones obtenidas si se puede observar que para los cementos C1 y C2 los cuales tienen un contenido similar y superior al 8,2% se desarrollan expansiones las que sin embargo no se relacionan con este contenido, esto puede estar influenciado por otros factores como lo es el contenido de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) de cada cemento. El efecto del Aluminato Tricálcico (C<sub>3</sub>A) está relacionado con el desarrollo de etringita puesto que este es uno de los compuestos que gobiernan la reacción química que la produce.

- Razón Molar (SO<sub>3</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

En la Figura 7.28 se presenta un grafico que relaciona las expansiones promedio desarrolladas por cada una de las probetas de ensayo a los 71 días de medición y la razón molar SO<sub>3</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Esta relación está establecida como un factor determinante para predecir el desarrollo del fenómeno estudiado, esta relación se calcula considerando los pesos moleculares del trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de 80,06 g/mol y 101,96 g/mol respectivamente y los contenidos de estos óxidos en cada cemento según lo que se indica en la Tabla 7.3 estos valores se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 7.10. Razón Molar SO<sub>3</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.**

Razón Molar SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Cemento	Valor
C1	0,65
C2	0,72
C3	0,33



**Figura 7.28. Influencia de la Razón Molar SO<sub>3</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la Expansión.**

Se observa una correlación de pendiente positiva entre la razón molar SO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y las expansiones desarrolladas aunque esta tienen un coeficiente de correlación moderado de solo R<sup>2</sup>=0,615. Sin embargo las relaciones obtenidas son coherentes con la literatura donde se establece que las mayores expansiones se desarrollan con razones molares entorno a 1,0 mientras que con razones molares menores a 0,5 no se desarrolla este fenómeno. Este parámetro se relaciona con las proporciones óptimas de estos dos compuestos que propicien la formación de etringita en lugar de monosulfatos. Se puede ver que para el caso del cemento C3 el cual contiene una cantidad moderada de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y una cantidad moderada de óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no presenta

expansiones, acá la importancia de este parámetros que considera el real efecto que tienen las adiciones puzolánicas incorporadas al cemento.

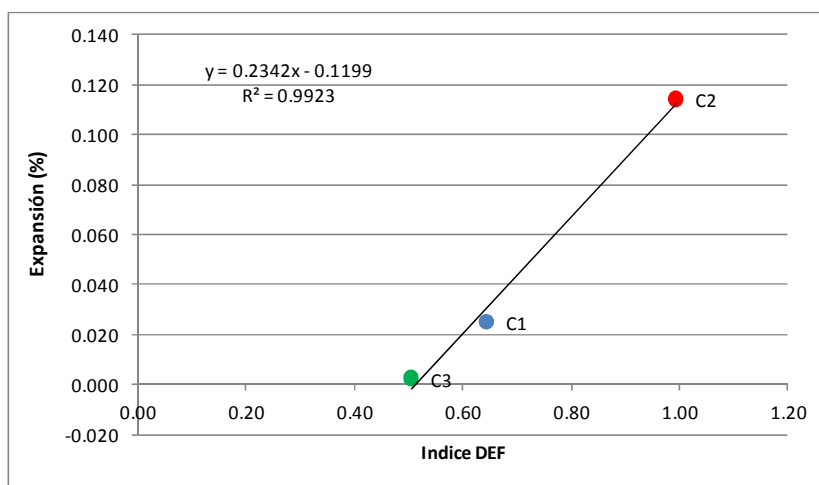
- Índice DEF.

El año 2002 Zhang et al propuso un índice para predecir el desarrollo del fenómeno expansivo por formación de etringita retardada, este índice considera los parámetros que según literatura y estudios realizados contribuyen mayormente al fenómeno estudiado. Este índice se obtiene a partir de la formula presentada en la Ecuación 3.3, los valores de este indicie para cada uno de los cementos estudiados se presentan en la Tabla 7.11.

**Tabla 7.11. Índice DEF.**

Índice DEF	
Cemento	Valor
C1	0,64
C2	0,99
C3	0,51

En la Figura 7.29 se establece la relación entre el Índice DEF y las expansiones desarrolladas por cada uno de los cementos a los 71 días de medición.



**Figura 7.29. Relación entre el Índice DEF y las Expansiones Desarrolladas.**

Se puede ver una clara correlación entre el Índice DEF y las expansiones desarrolladas, con un coeficiente de correlación muy alto con un valor de  $R^2=0,992$ . Este resultado permite reafirmar que las expansiones desarrolladas son producto de la formación de etringita retardada, por otra parte este índice considera el efecto proporcional de cada uno de los factores más influyentes por lo que tiene una confiabilidad mayor que las

correlaciones obtenidas por los parámetros individuales. Se puede concluir además que este índice es un buen predictor de las expansiones desarrolladas y que los parámetros determinantes y de mayor influencia corresponden al óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), Aluminato Tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) y Álcalis Totales ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \text{K}_2\text{O}$ ), no todas estas relaciones se reconocen en análisis individuales sin embargo al combinarlos mediante esta fórmula se nota una clara relación. Se debe notar la gran importancia que tienen el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) en este índice lo cual se refleja también en la correlación obtenida para este compuesta, por otra parte se debe notar que este índice considera el posible efecto de las puzolanas incorporadas lo cual viene implícito en la relación molar  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  la cual es parte del índice y cuyo resultado es altamente sensible a la variación de los contenidos de puzolana, la cual es rica en óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

#### ***7.4.5 Análisis por Difractometría de Rayos X.***

A continuación se realizará un análisis de los difractogramas obtenidos para cada una de las series estudiadas, a forma de validar la teoría en que se basa el fenómeno expansivo que presentan algunos hormigones a temperatura de curado elevada y así confirmar el desarrollo de etringita retardada como causante de las expansiones obtenidas.

El análisis fue realizado en el Laboratorio de Cristalografía del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, estos análisis fueron llevados a cabo sobre muestras extraídas de cada una de las series estudiadas luego de los 71 días de medición. Estas muestras fueron secadas a baja temperatura ( $40^\circ\text{C}$ ) y luego pulverizadas bajo la malla N°200. En las figuras 6.13 a 6.18, se presentan los difractogramas resultantes del análisis.

Cualitativamente se tiene que en todas las series, tanto las de control como las series de ensayo, se observa la presencia de etringita, la cual se manifiesta con su peak característico ubicado en el valor  $2\text{-Theta} = 9,1^\circ$  el cual se observa levemente insinuado. El patrón de difracción de la etringita se puede ver en los anexos. Se considera que la etringita presente en las series correspondientes a las muestras de control, corresponde a etringita primaria, formada durante la hidratación del aluminato tricálcico, la cual no genera problemas de expansión, por generarse cuando el mortero no posee rigidez para oponer resistencia a la expansión. Por otra parte, la etringita presente en las muestras ensayadas, se considera que corresponde a formación de etringita retardada, potencialmente expansiva junto con cantidades de etringita primaria que no alcanzo a disolverse durante el curado.

Cuantitativamente es muy difícil establecer órdenes en cuanto a las cantidades de etringita detectada, esto se debe a lo escaso de este mineral dentro de las muestras analizadas y la gran cantidad de fases minerales presentes en el cemento, las cuales interfieren con sus peaks característicos opacando a los de la etringita. Por otra parte,

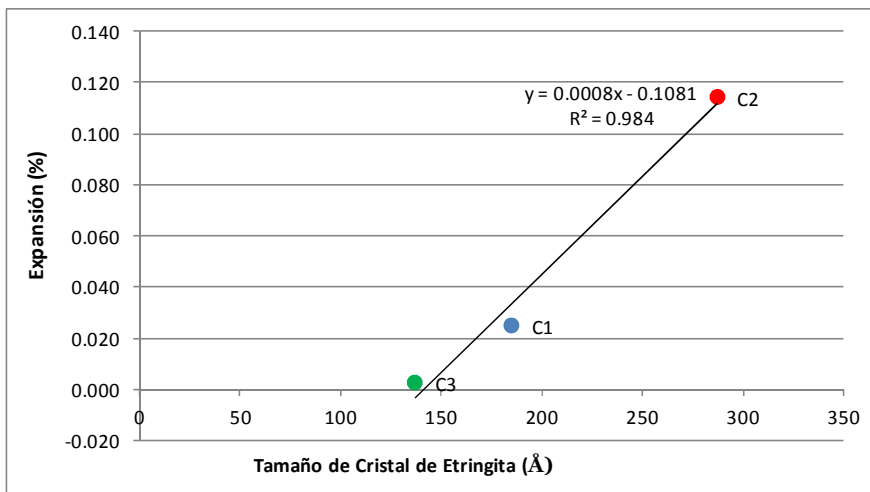
distintos estudios (Grabowski et al. 1992, Tyalor et al. 2001) han mostrado que las cantidades de etringita observadas en hormigones y morteros sometidos a condiciones que favorecen el fenómeno DEF, no son necesariamente proporcionales a las expansiones desarrolladas, esto se debe a los distintos tipos y zonas de nucleación que esta presenta, lo cual lleva a una diversidad de tamaños y morfología de los cristales formados. Por una parte se pueden observar cristales de etringita primaria, los cuales crecen de manera desordenada mientras el hormigón está fresco, de esta manera no genera expansiones. Por otra parte se encuentra la etringita retardada, este tipo de etringita, la cual es la responsable del desarrollo de expansiones, se presenta como una estructura ordenada de agujas de pequeño tamaño pero en gran cantidad, las cuales generan tensiones de tracción en el hormigón, luego, a medida que se desarrolla la expansión, la etringita retardada recristaliza en los nuevos espacios alrededor de los áridos y las micro fisuras generadas producto de la expansión de la pasta de cemento, esta es la denominada etringita secundaria, la cual se caracteriza por un tamaño mayor de sus cristales, los cuales no generan expansiones, pero sin embargo dan cuenta del desarrollo del fenómeno estudiado, al ser una consecuencia de este. Dado esto, se realizará un análisis semicuantitativo respecto del tamaño de los cristales, este análisis se basará en las propiedades del peak característico de la etringita (2-Theta = 9,1), en este caso su altura y área. Luego, a partir de estos valores, los cuales son calculados automáticamente por el software MDI Jade 6, mediante la ecuación de Scherrer, se calcula el parámetro FWHM, que corresponde al ancho a la altura media del peak. Finalmente a partir de este parámetro el software obtiene el tamaño del cristal. Este concepto se refiere al volumen del material donde es posible aplicar rigurosamente la difracción de rayos x. Se debe mencionar que este análisis es una estimación de los valores reales, dado que el ancho y altura de los peaks son alterados por distintos factores, sin embargo se considera que es un buen comparador debido a la similitud de las condiciones en que fueron realizados los análisis de cada serie.

Los datos representativos del peak característico de la etringita (2-Theta = 9,1) para cada una de las series analizadas se presentan en la siguiente tabla, los datos correspondientes al resto de los peaks de los difractogramas se pueden ver en los anexos de este informe.

**Tabla 7.12. Análisis Semicuantitativo. Tamaño de Cristales de Etringita.**

Serie	Ubicación	Distancia Interplanar	Altura	Área Normalizada	Tamaño de Cristal
	2-Theta (rad)	(Å)	(cuentas)	(cuentas x rad)	(Å)
C1-E	9.1700	9.6363	327	170.2	185
C1-C	9.1330	9.6753	243	138.0	169
C2-E	9.0930	9.7178	359	124.6	287
C2-C	9.1520	9.6549	163	108.9	143
C3-E	9.1490	9.6578	218	151.6	137
C3-C	9.1340	9.6742	283	172.1	157

A partir de estos datos se puede ver que en el caso de las series que consideran las muestras de control, los tamaños estimados de los cristales son relativamente similares y del orden de los 150 Å, estos cristales corresponderían a etringita primaria no expansiva. Por otra parte, en las series correspondientes a las muestras de control se observa que los tamaños difieren bastante entre cada una de las series, con un valor máximo de 287 Å para el cemento C2. En la siguiente figura se presenta un grafico que relaciona las expansiones desarrolladas a los 71 días por las muestras de ensayo con el tamaño de los cristales estimados mediante la difracción de rayos x.



**Figura 7.30. Relación entre Expansiones Desarrolladas y Tamaño de Cristales Estimados Mediante XRD.**

Se puede ver que existe una buena correlación entre los tamaños estimados de los cristales de etringita y las expansiones desarrolladas por cada una de las series, con un coeficiente de correlación de  $R^2=0.984$ . Estas correlaciones confirmarían en parte, junto con los datos ya analizados, que las expansiones medidas son producto de un fenómeno expansivo generado por la formación de etringita retardada. Se debe tener en consideración que no toda la etringita detectada es necesariamente responsable de las expansiones, pues como se explico con anterioridad, la etringita secundaria no genera expansión aunque es la mas fácil de detectar cuando el fenómeno ocurre.

## **7.5. ENSAYO DE RESISTENCIA.**

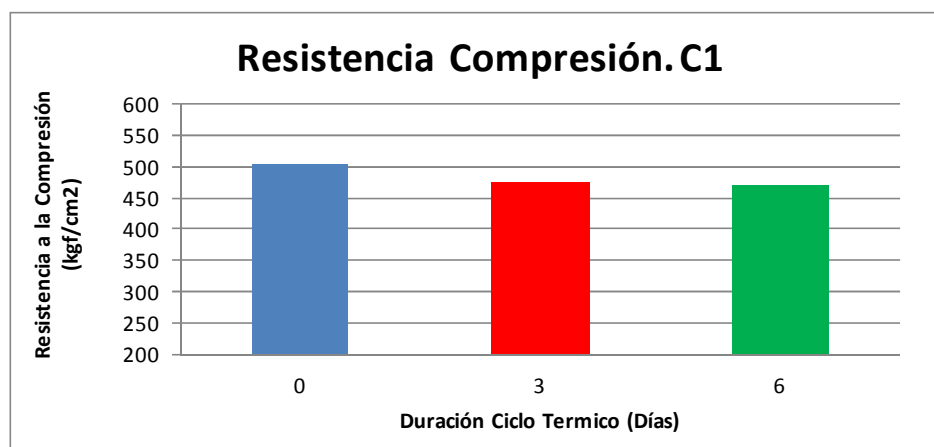
A continuación se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos de compresión sobre probetas cubicas de hormigón, las cuales fueron sometidas a distintos ciclos térmicos durante sus primeros días de curado, con el objetivo de determinar de qué manera influyen las temperaturas de curado por sobre los 80°C, en la resistencia a la compresión del hormigón, de manera de evaluar el efecto de las altas temperaturas que se podría alcanzar en el núcleo de elementos de hormigón masivo resultantes de la generación de calor de hidratación.

En la tabla Tabla 7.13 se resumen los resultados promedio obtenidos mediante los ensayos de resistencia a la compresión realizados sobres las probetas de cada serie a una edad de 28 días, para los distintos ciclos térmicos aplicados.

**Tabla 7.13. Resistencia a la Compresión de las Probetas de Hormigón a los 28 Días.**

Serie	Cemento	Duración Tratamiento Térmico (días)	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )
C1-C	C1	0	504
C1-E-3		3	476
C1-E-6		6	471
C2-C	C2	0	556
C2-E-3		3	563
C2-E-6		6	566
C3-C	C3	0	304
C3-E-3		3	328
C3-E-6		6	321

A partir de los datos presentados en la Tabla 7.13 en el siguiente grafico se muestra una comparación de las resistencias desarrolladas a los 28 días por las probetas de las series fabricadas con el cemento C1 según a la duración del ciclo térmico aplicado.

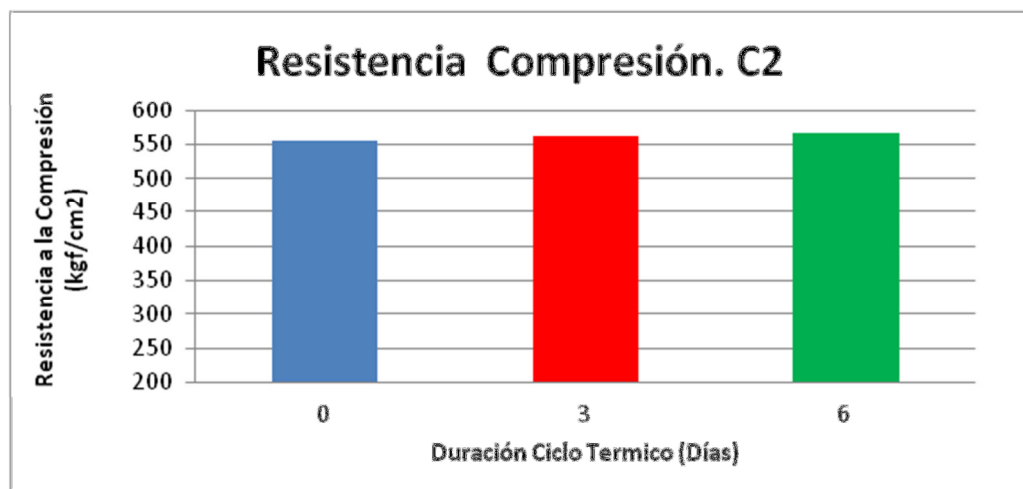


**Figura 7.31. Resistencias Obtenidas a los 28 Días. Series C1.**

Se puede ver que los hormigones fabricados con el cemento C1, en el caso de la series de control, las cuales no fueron sometidas a ciclos térmicos, tienen una resistencia promedio a la compresión de 504 kgf/cm<sup>2</sup>. Las probetas a las cuales se les aplico un ciclo térmico presentan resistencias menores, las sometidas a un ciclo de 3 días alcanza una resistencia promedio de 476 kgf/cm<sup>2</sup> mientras que a las que se le aplico un ciclo de 6

días alcanzan una resistencia promedio de 471 kgf/cm<sup>2</sup>, esto representa una pérdida de resistencia de un 5,6% y un 6,5% respectivamente. Si bien es cierto que temperaturas elevadas durante los primeros días de curado del hormigón aceleran la formación de cristales y por lo tanto generan un mayor desarrollo de resistencia temprana, también puede darse un comportamiento adverso, sobre todo en hormigones que desarrollan la mayor parte de su resistencia tempranamente, al tratarse de productos de hidratación con estructuras poco ordenadas la pasta de cemento puede volverse más porosa y provocar una disminución de su resistencia a los 28 días. Este es probablemente el fenómeno que ocurrió en la pérdida de resistencia producto de los ciclos térmicos, además se puede ver que las series sometidas a un ciclo térmico mayor tienen una pérdida de resistencia levemente superior, esto confirmaría la influencia de estos ciclos térmicos en la pérdida de resistencia, aunque esta no es proporcional a la duración de los ciclos.

En la figura 7.32 se presenta un gráfico comparativo entre las resistencias desarrolladas a los 28 días por las probetas de las series fabricadas con el cemento C2 según a la duración del ciclo térmico aplicado.



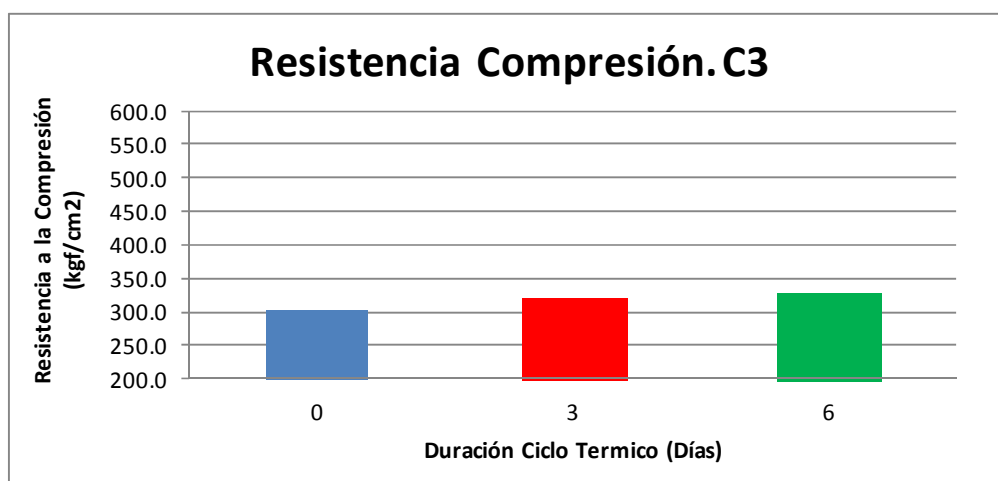
**Figura 7.32. Resistencias Obtenidas a los 28 Días. Series C1.**

Se puede ver que los hormigones fabricados con el cemento C2 en el caso de las series de control, las cuales no fueron sometidas a ciclos térmicos, tienen una resistencia a la compresión de 556 kgf/cm<sup>2</sup>. Las probetas a las cuales se les aplicó un ciclo térmico presentan resistencias levemente mayores, las que fueron sometidas a un ciclo de 3 días alcanza una resistencia promedio de 563 kgf/cm<sup>2</sup> mientras que a las que se le aplicó un ciclo de 6 días alcanzan una resistencia promedio de 566 kgf/cm<sup>2</sup>, esto representa un aumento de resistencia de un 1,3% y un 1,8% respectivamente. Este comportamiento es contrario al presentado en el cemento C1, esto se debe probablemente a que el cemento C1 corresponde a un cemento Portland puro mientras que en este caso se trata de un cemento Portland puzolánico, el cual a pesar de tener una alta finura y desarrollar resistencias tempranas, tiene adiciones que desarrollan resistencias con mayor lentitud



las cuales se pueden haberse visto aceleradas con los ciclos térmicos aplicados. Se puede ver que las probetas sometidas a un ciclo térmico más largo presentan una resistencia levemente superior, sin embargo, esta diferencia es muy pequeña por lo que podrían considerarse como similares.

En la figura 7.33 se presenta un grafico comparativo entre las resistencias desarrolladas a los 28 días por las probetas de las series fabricadas con el cemento C3 según a la duración del ciclo térmico aplicado.



**Figura 7.33. Resistencias Obtenidas a los 28 Días. Series C3.**

Se puede ver que los hormigones fabricados con el cemento C3, tienen una resistencia a la compresión de 304 kgf/cm<sup>2</sup> en el caso de las probetas de las series de control, las cuales no fueron sometidas a ciclos térmicos. Las probetas a las cuales se les aplico un ciclo térmico presentan resistencias mayores. Las probetas sometidas a un ciclo de 3 días alcanza una resistencia promedio de 321 kgf/cm<sup>2</sup> mientras que a las que se le aplico un ciclo de 6 días alcanzan una resistencia promedio de 328 kgf/cm<sup>2</sup>, esto representa un aumento de su resistencia de un 5,6% y un 7,9% respectivamente. Este comportamiento es similar al presentado en el cemento C2 pero se puede ver que el aumento de resistencia desarrollado en este caso es considerablemente mayor, esto puede deberse a que el cemento C3 corresponde a un cemento puzolánico, el cual tiene un porcentaje elevado de puzolana lo que en condiciones normales provoca un desarrollo de resistencia bastante lento el cual pudo verse acelerado mediante los ciclos térmicos. En este caso se repite el comportamiento en que la serie que fue sometida a un ciclo térmico de mayor duración presenta un mayor aumento de resistencia.

## CAPÍTULO 8: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este capítulo se exponen las principales conclusiones obtenidas a partir del trabajo experimental desarrollado, además y previo a estas conclusiones se expondrán puntos que se estiman relevantes en cuanto a las características de los hormigones masivos y a la formación de etringita retardada “DEF”.

En primer lugar, no obstante no existe una definición única para la calificación de estructuras como de “hormigón masivo”, si está establecido que su principal característica es la alta tasa de generación de calor producto de la masividad de los elementos estructurales lo cual trae como consecuencia potenciales problemas de fisuración tanto a corto como a largo plazo. Esta característica permite diferenciarlos de otro tipo de estructuras. Los principales efectos a corto plazo tienen que ver con fisuración producto de gradientes térmicos mientras que a largo plazo la principal preocupación radica en una posible fisuración provocado por el fenómeno de formación de etringita retardada (DEF). Estos potenciales problemas obligan a tomar costosas medidas durante la construcción con el fin de controlar estos dos fenómenos, generalmente manteniendo un gradiente térmico menor a 20°C y una temperatura en el núcleo de la masa menor a 70°C. Estas medidas, como se pudo ver en el caso real presentado en el capítulo 2 de este estudio, no siempre logran mantener las temperaturas en los rangos deseados.

Por otra parte, respecto al fenómeno de formación de etringita retardada (DEF), fenómeno que se aborda en el presente estudio, de acuerdo a la literatura revisada, está bien establecido que las condiciones necesarias para su desarrollo son por una parte altas temperaturas (por sobre los 70°C) durante el curado del hormigón, que permite disolver la etringita primaria y por otra parte, condiciones de alta humedad durante su etapa de servicio lo que permite la recristalización posterior de la etringita. Sin embargo, estas dos condiciones no son suficientes ya que el fenómeno sólo se desarrolla cuando se utilizan cementos susceptibles y con características determinadas.

Respecto de la metodología experimental para determinar la susceptibilidad de determinados hormigones ante este fenómeno, si bien el trabajo experimental está orientado a estudiar la susceptibilidad a la formación etringita retardada (DEF) en hormigones, éste fue realizado utilizando morteros, lo cual en base a los resultados obtenidos y a la literatura, que indica que los áridos no tienen una influencia considerable en el fenómeno, es considerado como un modelo aceptable y los análisis son aplicables a elementos de hormigón confeccionados con los mismos cementos. Por otra parte, se realizaron algunas modificaciones a la metodología original en la cual se baso este trabajo, de acuerdo a los resultados obtenidos se considera que estas modificaciones no alteraron estos resultados aunque no se pueden realizar comparaciones directas ni establecer los mismos criterios limite que en la metodología original o estudios similares.

Respecto a los resultados obtenidos mediante los ensayos de expansividad realizados en esta investigación, se puede concluir lo siguiente:

- La metodología aplicada, considerando sus modificaciones respecto de la metodología original, permite realizar un análisis comparativo entre distintos tipos de cemento para conocer un potencial comportamiento expansivo provocado por la formación de etringita retardada (DEF) en elementos de hormigón masivo. Aunque no es posible predecir las expansiones cuantitativamente, si se puede dar un orden cualitativo respecto de la susceptibilidad de desarrollo del fenómeno. Por otra parte, este análisis no pudo ser realizado en 20 días como se proponía originalmente dado el comportamiento variable de las expansiones, aunque los plazos que se utilizaron si son considerablemente menores que los propuestos por otros autores.
- Los análisis mediante difracción de rayos X, además del análisis de índices y relaciones, que de acuerdo con la literatura están directamente relacionadas con el desarrollo del fenómeno estudiado, confirman que las expansiones obtenidas tienen directa relación con la formación de etringita retardada (DEF).
- Dentro de los cementos estudiados, el que presenta una mayor expansión corresponde al cemento C2, el cual está clasificado como un cemento Portland puzolánico, con un contenido de puzolana de un 13%, mientras que el cemento C3, corresponde a un cemento puzolánico con un contenido de puzolana de un 38% no desarrolla expansión alguna. El cemento C1 que corresponde a un cemento Portland, desarrolla expansiones moderadas. Cada uno de estos cementos tienen un comportamiento distinto luego de recuperar las contracciones producto de los ciclos de humedecimiento y secado, estos comportamientos son atribuibles principalmente a la composición de cada uno de los cementos estudiados, dado que son los únicos parámetros variables en este estudio, a continuación se plantearán las conclusiones sobre los componentes más relevantes.
- El trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), aportado por el yeso, es sin duda un factor determinante para el desarrollo del fenómeno, este compuesto interviene directamente en la formación de etringita y de acuerdo a los resultados obtenidos es determinante en las expansiones desarrolladas coincidiendo perfectamente las expansiones desarrolladas con los contenidos de este elemento, esto es acorde a lo indicado en la literatura referente a este tema. Se confirma la definición de este fenómeno como un “ataque interno de sulfatos”.
- También se determinó que la finura del cemento es de gran influencia dentro de las expansiones desarrolladas, esta relación se explica por dos motivos. Por una parte están las propiedades de un cemento más fino con mayor reactividad y mayor generación de calor y por otra parte está la necesidad de los fabricantes de

adicionar una mayor cantidad de yeso con el objetivo de retrasar el fraguado que producto de la alta superficie específica se desarrolla con una mayor velocidad. El yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) por la solubilidad del ion influye directamente en la formación de etringita.

- Respecto a las puzolanas incorporadas, si bien es cierto que no se obtuvieron correlaciones directas entre los contenidos de puzolana y las expansiones desarrolladas, si se determinó su influencia inhibidora en el desarrollo de éstas, además se determinó que esta influencia es considerable sólo cuando se trata de cementos fabricados con un porcentaje de adición alto. Esta influencia está ligada directamente con los contenidos de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de la puzolana utilizada, si bien este compuesto es parte fundamental de la etringita, altos contenidos de éste respecto del trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) facilitan la formación de monosulfatos y desestabilizan la formación de etringita. De esta forma, reemplazos considerables de cemento portland puro por puzolanas hacen disminuir la razón molar  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ , parámetro que es considerado determinante para evaluar un cemento susceptible. Esto se confirma al ver el comportamiento del cemento puzolánico el cual a pesar de tener características químicas similares a las del cemento Portland puro, no desarrolla expansiones. Si bien este efecto inhibidor no se dio en el caso del cemento C2, esto se debe al bajo nivel de reemplazo y a los altos contenidos de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) de este.
- Existen otros aspectos propios del cemento que de acuerdo a la literatura influyen directamente en el desarrollo del fenómeno, estas relaciones no fueron obtenidas mediante coeficientes de correlación elevados. Sin embargo, aplicando la fórmula establecida para el Índice DEF, sí se obtiene una buena correlación entre este índice y las expansiones desarrolladas. Por una parte se concluye que este índice puede servir como un buen predictor del potencial expansivo de distintos cementos y por otra parte se confirma la influencia de otros aspectos del cemento como son los álcalis totales presentes y el contenido de aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) el cual sin duda tiene un efecto dada su composición y características.
- Respecto al análisis por difracción de rayos x, fue posible obtener resultados coherentes a los esperados, mas, dadas las proporciones relativas de etringita son mucho menores que los compuestos del cemento es bastante difícil realizar un análisis más acabado y de mayor precisión por lo que, para estudios posteriores, sería de gran interés complementarlo con análisis adicionales como puede ser un estudio mediante microscopio electrónico de barrido, con lo cual se podría determinar sin lugar a muchas dudas la presencia y origen de la etringita en probetas que han sido expuestas al tratamiento térmico especificado.
- Como recomendaciones para futuros estudios, se debe considerar regular de mejor manera los ciclos térmicos aplicados, específicamente en lo referente al ciclo de curado acelerado aplicado luego de la fabricación de las probetas, el cual

idealmente debió ser aplicado a las dos horas de confeccionadas las probetas en los moldes. Sin embargo, dados los resultados obtenidos y el respaldo en la literatura referente a este tema se considera que esto no afectó el resultado final ni las conclusiones del estudio. Por otra parte, se considera que la utilización de barras de mortero en lugar de núcleos de hormigón son una mejor forma de comparar el desempeño de distintos cementos respecto a este fenómeno. Finalmente, sería de gran interés que futuros estudios se realizarán con una mayor cantidad de cementos, tanto comerciales como preparados en laboratorio, de esta manera se pueden confirmar con mayor certeza las relaciones obtenidas además de determinar algunos otros factores que dada la limitación de muestras pudo no haber sido detectadas. Al mismo tiempo se podrían establecer criterios límite respecto de los parámetros más relevantes los cuales estén enfocados en los materiales presentes en Chile y en una metodología de aplicación estándar.

- Finalmente, de acuerdo a los resultados ya mostrados, se considera que las limitaciones establecida para evitar el desarrollo de este fenómeno en hormigones masivos, que en general obliga a tomar medidas para no superar una temperatura de 70°C en el núcleo del hormigón, no siempre son necesarias puesto que ya está demostrado que no todos los cementos son susceptibles de desarrollar el fenómeno de formación de etringita retardada (DEF). Por lo tanto la elección o el diseño de un cemento con características favorables pueden evitar el desarrollo de este fenómeno y así enfocar los recursos en controlar otros aspectos como puede ser el agrietamiento por diferenciales de temperatura o la realización de un buen curado.

Respecto a los resultados obtenidos mediante los ensayos de compresión realizado sobre hormigones sometidos a distintos ciclos térmicos se puede concluir lo siguiente:

- El comportamiento ante altas temperaturas durante el curado del hormigón difiere bastante según el tipo de cemento utilizado para su fabricación, por lo que se concluye que la cantidad de adiciones puzolánicas incorporadas a estos es un factor determinante. Sin embargo, el nivel de temperatura aplicado ( $\pm 82^{\circ}\text{C}$ ) no tiene un efecto considerable en ninguno de los casos, siendo las reducciones de resistencia no mayores al 8% para el ciclo más severo. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que dado que el estudio consideró la comparación de la resistencia a los 28 días, no es posible derivar que las altas temperaturas en la etapa inicial de curado no afecta a las resistencias finales, de servicio, de la estructura.
- El cemento Portland puro, a diferencia de los que contienen adiciones, disminuye su resistencia a los 28 días producto de los ciclos térmicos durante su curado. Este comportamiento se explicaría por su rápido desarrollo de resistencia y un posible aumento de su porosidad producto de la temperatura.

- Los cementos con adiciones puzolánicas presentan un aumento de resistencia producto del tratamiento térmico aplicado, estos aumentos en la resistencias son considerablemente mayores, en porcentaje, para el cemento con mayor contenido de puzolana. Este comportamiento se explica dada la naturaleza lenta de las reacciones de hidratación relacionadas con la puzolana, las cuales se pueden ver visto aceleradas producto de los niveles de temperatura alcanzados durante los tratamientos térmicos.
- El comportamiento presentado por cada uno de los cementos estudiados indicaría que la tasa de desarrollo de las resistencias en todos los casos se vería disminuida luego de ser sometidos a ciclos de curado a alta temperatura. En el caso de los cementos con adiciones puzolánicas este efecto se debería a un aumento temprano de su resistencia producto de las temperaturas aplicadas.
- Para futuros estudios, sería de gran interés establecer distintos niveles de temperatura para los ciclos térmicos y de esta forma establecer con mayor precisión la influencia de esta en una propiedad fundamental como es la resistencia a la compresión. Sería también de interés verificar el comportamiento a edades mayores de hormigones sometidos a curado a alta temperatura durante la etapa inicial.

## CAPÍTULO 9: BIBLOGRAFÍA

1. ACI 224R Capítulo 7 “Control de la fisuración en estructuras de hormigón”. 2001
2. ACI 224R “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete,”. 1991
3. APROCEM. Hormigones masivos. Presentación Seminario de Hormigones Masivos. ICH. Santiago 21 y 22 de Julio 2009.
4. Burg, R.G. and Fiorato, A.E. High-Strength concrete in massive foundation elements, 1999.
5. Czernin. Wolfgang. La Química del Cemento. 1963.
6. Crouch, L.K., Hewitt, R. and Byard B. High volume fly ash concrete. World of Coal ash, 2007.
7. Diamond, S. The microestructure of cement paste in concrete. VIII Congreso Internacional Química del Cemento – Río de Janeiro, 1986. Vol.I.
8. Diamond, S. Delayed Ettringite Formation – Processes and Problems, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, USA, 1996.
9. Diamond, S. Delayed ettringite formation - a current assessment, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 178 – 194.
10. Divet, L. and Pavoine, A. Delayed ettringite formation in massive concrete structures: an account of some studies of degraded bridges, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 98 – 126.
11. Escadeillas, G., Aubert, J.E., Segerer, M. and Prince, W. Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars, Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 10, October 2007, Pages 1445-1452.

12. Escadeillas, G., Aubert, J.E., Segerer, M. and Prince, W. Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars, *Cement and Concrete Research* 37, France, 2007.
13. Famy, C., Scrivener, K.L. and Brough, A.R. Role of microstructural characterisation in understanding the mechanism of expansion due to delayed ettringite formation, *International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 167 – 172.
14. Fernández, C. Hormigones Masivos: Temas relevantes para el constructor. Presentación Seminario de Hormigones Masivos. ICH. Santiago 21 y 22 de Julio 2009.
15. Gajda, J. and Vangeem, M. *Controlling Temperatures in Mass Concrete*. 2002
16. Gajda, J. *Mass Concrete for buildings and bridges*. 2004
17. Gajda, J. and Alsamsam, E. *Engineering Mass Concrete Structures*. 2006
18. Garboczi, E. J. Microstructure and transport properties of concrete. En RILEM. Technical Committee TC 116-PCD Performance criteria for concrete durability. Kropp, J., Hilsdorf, H. London, 1995. 198 – 212.
19. Garboczi, E. J. and Bentz, D. P. The effect of Interfacial Transition Zone on Concrete Properties: the Dilute Limit. National Institute of Standards and Technology.
20. Glasser, F.P. The stability of ettringite, *International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 43 – 64.
21. Grabowski, E.; Czarnecki, B. ; Gillott, J.E. ; Duggan, C.R. ; Scott, J.F. Rapid Test of Concrete Expansivity Due to Internal Sulfate Attack. In: *ACI Materials Journal* , Vol. 89, No.5, Sep-Oct. 1992, pp. 469-480.
22. Hanson, T. and Ouyang, C. Evaluation of the Duggan test for concretes made of different types of cements, Iowa Dept. of Transportation, 2000.



23. Heinz, D, Ludwig, U, Mechanism Of Secondary Ettringite Formation In Mortars And Concretes Subjected To Heat Treatment. Concrete Durability. Katherine And Bryant Mather International Conference, Held At Atlanta, Georgia, Usa, 27 April-May 1987.
24. Helmuth, Richard A., Detwiler, Rachel J. "The Nature of Concrete". Lamond, Joseph F., Pielert, James H. "Significance of tests and properties of Concrete and Concrete – Making Materials". ASTM International, New York, 2006.
25. Jones, T.N., Grabowski, E., Quhm, T., Gillott, J.E., Duggan, C.R., SCOGJ.F., Mechanism of expansion in Duggan test for alkali-aggregate reaction, Canadian Developments in Testing Concrete Aggregate for Alkali Aggregate Reactivity, MinMry of Transportation, Ontario, Engg. Materials Report 92, Mar., Toronto, 70-82,1990.
26. Kelham, S. Effects of cement parameters on expansion associated with DEF, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 197 – 211.
27. Kosior-Kazberuk, M. and Lelusz, M. Strength development of concrete with fly ash addition. Journal of Civil Engineering and Management, 2007, 2, 115-122.
28. Kurdowski, W. and Duszak, S. Can addition of limestone eliminate the expansion of the mortars due to DEF ?, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 229 – 235.
29. Kurt Hermann. Colado del concreto a altas temperaturas. 2001
30. Labbé, R. Concretos masivos en proyectos industriales. Presentación Seminario de Hormigones Masivos. ICH. Santiago 21 y 22 de Julio 2009.
31. Lagos, R. Hormigones estructurales masivos. Proyectos Costanera Center. Presentación Seminario de Hormigones Masivos. ICH. Santiago 21 y 22 de Julio 2009.

32. Latorre, V. Influencia del contenido de adiciones puzolánicas y del tipo de proceso de elaboración de la mezcla en la resistencia mecánica del hormigón Tesis Ingeniería Civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2007.
33. Mehta, P. K and Monteiro, Paulo. J.M. “Concrete: Microestructure, properties and materials”. 3° ed. New York, McGraw-Hill, 2006. 659p.
34. Merrit, F. S. Manual del ingeniero civil; Tomo I. Tercera edición. Editorial Mc. Graw Hill.
35. NCh 147 Of 69 Cementos - Análisis químico. Instituto Nacional de Normalización.
36. NCh 148 Of. 68. Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1968.
37. NCh 151 Of 69 Cemento. Método de determinación de la consistencia normal. Instituto Nacional de Normalización.
38. NCh 152 Of 71 Cemento. Método de determinación del tiempo de fraguado. Instituto Nacional de Normalización.
39. NCh 154.Of 69 Cemento – Determinación del peso específico relativo. Instituto Nacional de Normalización. Chile, 1969.
40. NCh 158 Of 67 Cemento: ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento. Instituto Nacional de Normalización.
41. NCh 159 Of. 77. Cemento – Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine.. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1977.
42. NCh 161.Of 69 Cemento – Puzolana para uso de cementos –Especificaciones. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1969.
43. NCh 1018 Of. 77. Preparación de mezclas de prueba en laboratorio. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1977.
44. NCh 1019.EOf 74 Construcción – Hormigón – Determinación de la docilidad – Método de asentamiento del cono de Abrams. Instituto Nacional de Normalización. Chile, 1974.

45. NCh 1037.Of 77 Hormigón – Ensayo de Compresión de Probetas Cúbicas y Cilíndricas. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1977.
46. NCh 1564.Of 79 Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1979.
47. NCh 1789 Of. 86. Hormigón – Determinación de la uniformidad obtenida en el mezclado del hormigón fresco. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1986.
48. NCh 2183.Of 92. Hormigón y mortero – Método de ensayo – Determinación del tiempo de fraguado. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1992
49. NCh 2184.Of 92 Hormigón y mortero – Método de ensayo – Determinación del contenido de aire. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1992.
50. Neville, A. M. Properties of concrete. Londres, Pitman Publishing, 1975. 532p.
51. PCA. Concrete technology today. 1997
52. Puertas F., Blanco, María Teresa, Palomo, A. Microestructura del hormigón – Influencia sobre sus propiedades. Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid, 1989. N° 398.
53. Ramlochan, T., Zacarias, P., Thomas, M.D.A and Hooton, R.D. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperatura Part I: Expansive behaviour, Cement and Concrete Research 33, 2003.
54. Scherer, G.W. Factors affecting crystallization pressure, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 139 – 154.
55. Scrivener, K., Guidoum, A. and Mathier, V. Role of cracks in delayed ettringite formation, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 259 – 262.

56. Segura Pérez, Ignacio; Moraguez Terrados, Amparo. Caracterización Microestructural de Materiales Base Cemento Mediante Ensayos Destructivos – Parte 1, Ediciones Cemento, Noviembre 2008.
57. Shanique Julie Murray. Determination of Strength and Stiffness of Calcium Silicate Hydrate Using Molecular Dynamics, 2011.
58. Skalny, J., Johansen, V., Thaulow, N., & Palomo, A. DEF: As a form of sulfate attack. *Materiales de Construcción*, 46(244), 1996, Pages 5-29.
59. Skalny, J. Internal sulfate attack - points of agreement and disagreement, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 265 – 276.
60. Stark, J. and Bollmann, K. Delayed Ettringite Formation in Concrete, Bauhaus-University Weimar, Germany, 1999.
61. Taylor, H.F.W., Famy, C. and Scrivener, K.L. Delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Issue 5, May 2001, Pages 683-693.
62. Taylor, H.F.W. Sulfates in Portland clinker and cement, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp. 3 – 17.
63. Thomas, M.D.A. and Ramlochan, T. Field Cases of Delayed Ettringite Formation, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars Switzerland, pp 85 – 97
64. Tyson D. Rupnow, Vernon R. Schaefer, Kejin Wang and Benjamin L. Hermanson. 2007. Improving Portland cement concrete mix consistency and production rate through two-stage mixing, Centre for Transportation Research and Education.
65. Tosun, K. Effect of SO<sub>3</sub> content and fineness on the rate of delayed ettringite formation in heat cured Portland cement mortars, *Cement and Concrete Composites*, Volume 28, Issue 9, October 2006, Pages 761-772.

66. Vega, H. and Guarda, D. Experiencia de un hormigón masivo estructural. Presentación Seminario de Hormigones Masivos. ICH. Santiago 21 y 22 de Julio 2009.
67. Videla, C. Apunte Tecnología del Hormigón. Departamento de Ingeniería y gestión de la construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile.
68. Yang, R., Lawrence, C.D., Lynsdale, C.J. and Sharp, J.H. Delayed ettringite formation in heat-cured Portland cement mortars, *Cement and Concrete Research*, Volume 29, Issue 1, January 1999, Pages 17-25.
69. Zhaozhou Zhang, Jan Olek, Sidney Diamond, Studies on delayed ettringite formation in heat-cured mortars II. Characteristics of cement that may be susceptible to DEF, *Cement and Concrete Research* 32, 2002.



# CAPÍTULO 10: ANEXOS

## ANEXO A. CERTIFICADOS DE ENSAYOS CEMENTOS

### A. 1. Cemento Melón Súper



#### CERTIFICADO DE CONFORMIDAD DEL CEMENTO N° 740.062-2

<b>SAG N°:</b> 4599	<b>FECHA DE EMISIÓN:</b> 04/May/2012	
<b>ANTECEDENTES GENERALES</b>		
SOLICITANTE	: MELÓN S.A.	
DIRECCIÓN	: Pedro De Valdivia Nº 98. La Calera.	
DESTINATARIO	: Héctor Vilalobos S. - Melón S.A.	
<b>IDENTIFICACIÓN DEL CEMENTO</b>		
NOMBRE COMERCIAL	: Melón Super	
CLASE	: Portland	GRADO : Alta Resistencia
<b>DATOS DE LA INSPECCIÓN</b>		
FECHA DE MUESTREO	: 2.5.8.14.16.19.23.27.29-3-2012	
LUGAR DE MUESTREO	: Pedro de Valdivia Nº 98. La Calera.	
PRODUCCIÓN	: Inicio : 1/3/12	Fin : 31/3/12
<b>REQUISITOS DEL PRODUCTO CONSIDERADAS EN LA CERTIFICACIÓN DE ACUERDO A LA NORMA :</b>		
Totales <input checked="" type="checkbox"/> Parciales <input type="checkbox"/> (Ver hoja anexa si corresponde)		
<b>NORMA DE REFERENCIA</b>		
NCh148.Of1968 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.		
NCh162.Of1977 Cemento - Extracción de muestras.		
<b>INFORMACIÓN REFERENTE A LOS ENSAYOS</b>		
FECHA DE LOS ENSAYOS	: Inicio : 04/Abr/2012	Fin : 02/May/2012
INFORME(S) ASOCIADO(S)	: 740.062-2	
<b>OBSERVACIONES</b>		
-		
<b>CERTIFICACIÓN</b>		
RESULTADO	<b>Aprobado</b>	CANTIDAD <b>1239 t</b>
  <p><b>RAMON SERRANO PIZARRO</b> Jefe Sección Tecnología del Cemento y Hormigón</p>		

**IMPORTE DE ENSAYO OFICIAL N° 740.068-2**      **FECHA EMISIÓN : 04/May/2012**  
 Regulación MINVU Res. Ex. Nº 9111 del 21 de Diciembre de 2007 y Res. Ex. Nº 1538 del 17 de Febrero de 2012.

**ANTECEDENTES GENERALES**  
**REFERENCIA** : Ensayos físico-mecánicos y químicos para la certificación de cementos según NCh148.01198.  
**SOLICITANTE** : Sección Tecnología del Cemento y Hormigón.  
**DIRECCIÓN DEL SOLICITANTE** : Pisco Brilla 882.  
**DESTINATARIO** : Nictor Vilalobos S. - Melón S.A.  
**OBRA** : -

**ANTECEDENTES DEL CEMENTO**  
**FABRICADO POR** : MELÓN S.A.      **NOMBRE COM.** : Melón Super  
**CLASE** : Portland      **GRADO** : Alta Resistencia

**ANTECEDENTES DE LA MUESTRA**  
**MUESTRO EFECTUADO POR** : IDIEM - Luis Lobos  
**NÚMERO DE CONTROL** : 26  
**N° SAG** : 4599      **FECHA DE MUESTRO** : 2.5.8.14.16.19.23.27.29-3-2012  
**LUGAR DE MUESTRO** : Pecho de Valdivia N° 98, La Calera.  
**FECHA DE RECEPCIÓN EN LAB.** : 02/May/2012

**METODOLOGÍA**  
 NCh148.01198 Cemento - Análisis químicos.  
 NCh148.01198 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.  
 NCh153.01111 Cemento - Método de determinación de la consistencia normal.  
 NCh154.01198 Cemento - Método de determinación de tiempo de fraguado.  
 NCh157.01198 Cemento - Determinación del peso específico aparente.  
 NCh157.01198 Cemento - Ensayo de expansión en autoclave, / A excepción de lo cubierto 5.1.1, la determinación se realiza con una probeta.  
 NCh158.01198 Cemento - Ensayo de flexión y compresión de mortero de cemento.  
 NCh159.01112 Cemento - Determinación de la superficie específica por el procedimiento según Idiem.  
 NCh162.01117 Cemento - Inyección de muestra.  
 NCh171.01117 Método de ensayo de química analítica de hidróxido de calcio.

**OBSERVACIONES**  
 -

**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS**  
**FECHA DE LOS ENSAYOS** : Inicio : 04/May/2012      Fin : 02/May/2012

Ensayo Realizado	Unidad	Resultados	Requisitos según NCh148.01198
Peso Específico	gm	2,08	≥ 3,00 g/ml
Superficie específica	cm <sup>2</sup> /g	4190	No aplica
Agua de consistencia normal *	%	30,00	No aplica
<b>Tempos de fraguado</b>			
Inicial	min	01:30	≥ 00:45 min
Final	min	02:20	≤ 10:00 min
Expansión en autoclave	%	0,06	≤ 1,00 %
<b>Resistencia mecánicas</b>			
Flexión a 3 días	kg/cm <sup>2</sup>	62	No aplica
Flexión a 7 días	kg/cm <sup>2</sup>	67	≥ 45 kg/cm <sup>2</sup>
Flexión a 28 días	kg/cm <sup>2</sup>	77	≥ 55 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión a 3 días	kg/cm <sup>2</sup>	322	No aplica
Compresión a 7 días	kg/cm <sup>2</sup>	294	≥ 200 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión a 28 días	kg/cm <sup>2</sup>	481	≥ 350 kg/cm <sup>2</sup>
Mérida por calcinación	%	1,1	≤ 3,0 %
Contenido de SO <sub>3</sub>	%	2,57	≤ 4,00 %
Residuo insoluble	%	0,8	≤ 1,5 %
Contenido de MgO	%	1,5	≤ 5,0 %
Contenido de Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	No aplica

\* Mérida de la parte volátil en el ensayo. Determinación de consistencia realizada en molde cónico y con agitación vigorosa.

  
**JUAN MUÑOZ REBOLEDO**  
 Jefe Unidad Central  
 de Cementos



  
**RAMON SERRANO FIGUEROA**  
 Jefe Sección Tecnología  
 del Cemento y Hormigón



1. Los resultados de los ensayos no están producidos por Idiem, sino por el laboratorio de ensayos que realizó los ensayos.  
 2. Los resultados de ensayos de laboratorio no pueden ser reproducidos por Idiem.

Avda. España  
 Antofagasta  
 Copulitas  
 174 de Mar  
 Santiago  
 Correo  
 Servicio  
 www.idiem.cl

## A. 2. Cemento Melón Extra



### CERTIFICADO DE CONFORMIDAD DE LOTE DE CEMENTO N° 729.767-2

SAG N° 4449	FECHA: 18 de Abril de 2012	PAGINA: 1 de 1
NOMBRE DEL SOLICITANTE: MELON S.A.		
DIRECCION: Pedro de Valdivia N° 98, La Calera.		
DESTINATARIO: Sr. Néstor Villalobos S.		
IDENTIFICACION DEL CEMENTO: NOMBRE COMERCIAL: MELON EXTRA CLASE: Portland Pozulánico GRADO: Alta Resistencia		
NORMA DE REFERENCIA: NCh 148.098 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.		
CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO CONSIDERADAS EN LA CERTIFICACIÓN DE ACUERDO A LA NORMA: Totales <input checked="" type="checkbox"/> Partiales <input type="checkbox"/> (Ver hoja anexa si corresponde)		
TAMAÑO DEL LOTE (Número de unidades sometidas a inspección; kg, t, o sacos de cemento): SAG 4449 -1: 13.575 t Producción del 1/Mar/2012 al 15/Mar/2012		
PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO, INSPECCIÓN, ACEPTACIÓN O RECHAZO: NCh 182.011977 Cemento - Extracción de muestras; Procedimiento Interno SAG; NCh 148.011988 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.		
FECHA DE MUESTREO E INSPECCIÓN VISUAL: MUESTREO: 02,05,08,14-Mar-2012 INSPECCIÓN: Desde el 01 al 15-Mar-2012	FECHA DE LOS ENSAYOS: INICIO: 21-Mar-2012 FIN: 18-Abr-2012	
RESULTADO DE LA CERTIFICACIÓN: LOTE ACEPTADO: <input checked="" type="checkbox"/> SI CANTIDAD DE CEMENTO: <input checked="" type="checkbox"/> 13.575 t		
FECHA Y LUGAR DE LA CERTIFICACIÓN: 18/Abr/2012 Pedro de Valdivia N° 98, La Calera.		
N° DE EJEMPLARES ORIGINALES: 1		
  <b>JUAN HENRÍQUEZ CARO</b> Jefe de Sección Tecnología del Cemento y Hormigón		





**INFORME DE ENSAYO OFICIAL N° 729.767-2**  
(INFORME PARA LA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD DE CEMENTOS)

SAG N°	4449-1	FECHA:	10 de Abril de 2012	PAGINA:	1 de 1
ALCANCE:	Ensayos físico-mecánicos y químicos para la certificación de cementos según NCh148.0F1968.				
ELABORADO POR:	Juan Muñoz Reboledo				
EMITIDO POR:	Sección Tecnología del Cemento y Hormigón, Plaza Ercilla N° 883, Santiago Centro. Inscripción MIVU Reg. Ex. 9111 del 21.12.2009 y Reg. Ex. N° 1538 del 17.02.2012.				
SOLICITANTE:	Sección Tecnología del Cemento y Hormigón.				
DESTINATARIO:	MELON S.A. - Sr. Héctor Villalobos S.				
OBRA:	No aplicable.				
DIRECCIÓN:	Pedro de Valdivia N° 98, La Calera.				
IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS:	SAG 4449 -1: MELON EXTRA <span style="float:right">Ficha N° 23</span>				
ANTECEDENTES DEL MUESTREO:	FECHA: 02.05.08, 14-Mar-2012 <span style="float:right">MUESTREO EFECTUADO POR: Personal de IDEM</span> LUGAR DE OBTENCIÓN DE LA MUESTRA: Pedro de Valdivia N° 98, La Calera.				
NORMAS DE REFERENCIA:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NCh 147.0F1968 Cemento - Análisis químico.</li> <li>• NCh 148.0F1968 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.</li> <li>• NCh 151.0F1968 Cemento - Método de la determinación de la consistencia normal.</li> <li>• NCh 152.0F1967 Cemento - Método de la determinación del tiempo de fraguado.</li> <li>• NCh 154.0F1967 Cemento - Determinación del peso específico relativo.</li> <li>• NCh 157.0F1967 Cemento - Ensayo de expansión en autoclave.</li> <li>• NCh 158.0F1967 Cemento - Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento.</li> <li>• NCh 159.0F1970 Cemento - Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blake.</li> <li>• ASTM C114-06 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.</li> </ul>				
FECHA DE RECEPCIÓN DE LAS MUESTRAS:	29Mar2012				
FECHA DE LOS ENSAYOS:	INICIO:	25Mar2012	FIN:	18Abr2012	
ENSAYOS REALIZADOS			RESULTADOS	Requisitos según NCh 148.0F1968	
			SAG 4449 -1:		
Peso específico g/ml			2,90	--	
Superficie específica, cm <sup>2</sup> /g			4950	--	
Agua de consistencia normal, % <sup>(1)</sup>			32,00	--	
Tiempos de fraguado, h:min					
Inicial			1:40	0:45 min	
Final			2:40	10:00 máx	
Expansión en autoclave, % <sup>(2)</sup>			0,02	1,00 máx	
Resistencia mecánicas, kg/cm <sup>2</sup>					
Flexión 3 días			81	--	
Flexión 7 días			71	45 mín	
Flexión 28 días			78	55 mín	
Compresión 3 días			380	--	
Compresión 7 días			428	250 mín	
Compresión 28 días			511	350 mín	
Pérdida por calcinación, %			2,3	4,0 máx	
Contenido de SO <sub>3</sub> , %			3,24	4,0 máx	
Residuo insoluble, %			12,19	30,0 máx	
Contenido de MgO, %			--	--	
<p><sup>(1)</sup> Medido de la pasta realizada en máquina. Determinación de consistencia reducida en molde cilíndrico por el método de Proctor.</p> <p><sup>(2)</sup> Calculada sobre 100% de sólidos.</p>					
<p>INSTITUTO NACIONAL DE ACREDITACIÓN INN - CHILE Acreditaciones LR 01</p>		<p>ICIEM INSTITUTO DE CERÁMICA Y VIDRIO 1870 - 187078</p>		<p><b>JUAN HENRÍQUEZ CARO</b> Jefe Sección Tecnología del Cemento y Hormigón</p>	

### 3. Cemento Melón Especial



#### CERTIFICADO DE CONFORMIDAD DE LOTE DE CEMENTO N° 729.766-2


SAG N° 4447	FECHA: 10 de Abril de 2012	PAGINA: 1 de 1
NOMBRE DEL SOLICITANTE: MELON S.A.		
DIRECCION: Pedro de Valdivia N° 98, La Calera.		
DESTINATARIO: Sr. Héctor Villalobos S.		
IDENTIFICACION DEL CEMENTO: NOMBRE COMERCIAL: MELON ESPECIAL CLASE: Pozolánico GRADO: Comerte		
NORMA DE REFERENCIA: NCh 148.0988 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.		
CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO CONSIDERADAS EN LA CERTIFICACIÓN DE ACUERDO A LA NORMA: Totales <input checked="" type="checkbox"/> Parciales <input type="checkbox"/> (Ver hoja anexa si corresponde)		
TAMAÑO DEL LOTE (Número de unidades sometidas a inspección; kg, t, o sacos de cemento): SAG 4447 -I: 20.156 t Producción del 1-Mar-2012 al 15-Mar-2012		
PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO, INSPECCIÓN, ACEPTACIÓN O RECHAZO: NCh 162.0H977 Cemento - Extracción de muestras; Procedimiento interno SAG; NCh 148.0H988 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.		
FECHA DE MUESTREO E INSPECCIÓN VISUAL: MUESTREO: 02.05.08, 14-Mar-2012 INSPECCIÓN: Desde el 01 al 15-Mar-2012	FECHA DE LOS ENSAYOS: INICIO: 21-Mar-2012 FIN: 18-Abr-2012	
RESULTADO DE LA CERTIFICACIÓN: LOTE ACEPTADO: <input checked="" type="checkbox"/> SI CANTIDAD DE CEMENTO: <input checked="" type="checkbox"/> 20.156 t		
FECHA Y LUGAR DE LA CERTIFICACIÓN: 10/Abr/2012 Pedro de Valdivia N° 98, La Calera.		
N° DE EJEMPLARES ORIGINALES: 1		
  <b>JUAN HENRÍQUEZ CARO</b> Jefe de Sección Tecnología del Cemento y Hormigón		

**INFORME DE ENSAYO OFICIAL N° 728.765-2**  
(INFORME PARA LA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD DE CEMENTOS)

SAG N° 4447-1	FECHA: 18 de Abril de 2012	PAGINA: 1 de 1
ALCANCE:	Ensayos físico-mecánicos y químicos para la certificación de cementos según NCh148.OF1968.	
ELABORADO POR:	Juan Muñoz Reboledo	
EMITIDO POR:	Sección Tecnología del Cemento y Hormigón, Plaza Ercilla N° 883, Santiago Centro. Inscripción MINVU Res. Ex. 9111 del 21.12.2009 y Res. Ex. N° 1538 del 17.02.2012.	
SOLICITANTE:	Sección Tecnología del Cemento y Hormigón.	
DESTINATARIO:	MELON S.A. - Sr. Víctor Villalobos S.	
OBRA:	No aplicable.	
DIRECCIÓN:	Pedro de Valdivia N° 98, La Calera.	
IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS:	SAG 4447 -1: MELON ESPECIAL <span style="float:right">Ficha N° 22</span>	
ANTECEDENTES DEL MUESTREO:	FECHA: 02.05.08, 14-Mar-2012 <span style="float:right">MUESTREO EFECTUADO POR: Personal de IDIEM</span> LUGAR DE OBTENCIÓN DE LA MUESTRA: Pedro de Valdivia N° 98, La Calera.	
NORMAS DE REFERENCIA:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NCh 147.OF1969 Cemento - Análisis químico.</li> <li>• NCh 148.OF1968 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.</li> <li>• NCh 151.OF1968 Cemento - Método de la determinación de la consistencia normal.</li> <li>• NCh 152.OF1967 Cemento - Método de la determinación del tiempo de fraguado.</li> <li>• NCh 154.OF1967 Cemento - Determinación del peso específico relativo.</li> <li>• NCh 157.OF1967 Cemento - Ensayo de expansión en autoclave.</li> <li>• NCh 158.OF1967 Cemento - Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento.</li> <li>• NCh 159.OF1970 Cemento - Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine.</li> <li>• ASTM C114-06 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.</li> </ul>	
FECHA DE RECEPCIÓN DE LAS MUESTRAS:	20Mar2012	
FECHA DE LOS ENSAYOS:	INICIO: 26Mar2012	FIN: 18Abr2012
<b>ENSAYOS REALIZADOS</b>	<b>RESULTADOS</b> SAG 4447 -1:	Requisitos según NCh 148.OF1968
Peso específico g/cm <sup>3</sup>	2,76	--
Superficie específica, cm <sup>2</sup> /g	4300	--
Agua de consistencia normal, % <sup>(1)</sup>	33,00	--
Tiempos de fraguado, h:min		
Inicial	3:00	1:00 mín
Final	3:50	12:00 mín
Expansión en autoclave, % <sup>(2)</sup>	-0,02	1,00 máx
Resistencia mecánicas, kgf/cm <sup>2</sup>		
Flexión 3 días	36	--
Flexión 7 días	46	35 mín
Flexión 28 días	68	45 mín
Compresión 3 días	185	--
Compresión 7 días	231	180 mín
Compresión 28 días	332	250 mín
Pérdida por calcinación, %	3,3	5,0 máx
Contenido de SO <sub>3</sub> , %	1,97	4,0 máx
Residuo insoluble, %	36,93	50,0 máx
Contenido de MgO, %	--	--
<p><sup>(1)</sup> Método de la pasta estándar en agua. Determinación de consistencia reducida en molde cilíndrico y con aguijón al 50%.</p> <p><sup>(2)</sup> Cálculo sobre 1 determinación.</p>		
		<p><b>JUAN HENRÍQUEZ CARO</b> Jefe Sección Tecnología del Cemento y Hormigón</p>

## ANEXO B. CERTIFICADOS DE ENSAYOS ARIDOS

### A. 1. GRAVILLA

Insc. MINU Res. Ex. Nº 987 del 16-02-2009.			
		Acreditación LE 525 y LE 526	
<b>INFORME DE ENSAYO INTERNO Nº 2011/047-1</b>			
<b>FECHA DE EMISIÓN</b>	: 04 de septiembre de 2012.		
<b>EMITIDO/ELABORADO POR</b>	: SECCIÓN HORMIGONES / Hugo Leiva V.		
<b>REFERENCIA</b>	: Ensayos físico-mecánicos y químicos de áridos para hormigones.		
<b>SOLICITANTE</b>	: IDIEM - Unidad Físico Mecánica de Áridos.		
<b>DIRECCIÓN SOLICITANTE</b>	: Plaza Ercilla Nº 883.		
<b>DESTINATARIO</b>	: Federico Delfín A.		
<b>OBRA / PROYECTO</b>	: Áridos para docencia y memoristas.		
<b>METODOLOGÍA</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>· NCh 164 Of 76. Áridos para morteros y hormigones – Extracción y preparación de muestras.</li> <li>· NCh 165 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. / A excepción de la cláusula 7.3, secado a fuego directo en mechero a gas.</li> <li>· NCh 1116 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente.</li> <li>· NCh 1117 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.</li> <li>· NCh 1223 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del material fino menor a 0,080 mm. / A excepción de la cláusula 7.2 y 9.7, secado a fuego directo en mechero a gas.</li> <li>· NCh 1239 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.</li> <li>· NCh 1325 Of 78. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del equivalente de arena.</li> <li>· NCh 1326 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de huecos.</li> <li>· NCh 1327 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de partículas desmenuzables.</li> <li>· NCh 1328 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la desintegración – Método de los sulfatos. / (3).</li> <li>· NCh 1369 Of 78. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del desgaste de las gravas – Método de la Máquina de Los Angeles.</li> <li>· NCh 1511 Of 80. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del coeficiente volumétrico medio de las gravas.</li> <li>· ASTM C 40 - 04 Standard test method for organic impurities in fine aggregates for concrete.</li> <li>· MC 8.202.6 - Agregados Pétreos : Método para determinar la cubicidad de partículas.</li> </ul>			
Notas : (3) Este ensayo no se encuentra dentro del alcance de las acreditaciones.			
<b>ANTECEDENTES</b>			
<b>M1</b>	: Muestra de Gravilla.	<b>ID de la muestra</b>	: 19660-1
<b>Procedencia de la muestra</b>	: Pétreos Río Maipo.		
<b>Muestreo efectuado por</b>	: IDIEM	<b>Fecha de muestreo</b>	: -
<b>Lugar de muestreo</b>	: -	<b>Fecha de recepción</b>	: -

**RESULTADOS**

<b>GRANULOMETRÍA</b> - NCh 165		
TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA (EN PESO)
ASTM	mm	M1
2"	50	-
1 1/2"	40	-
1"	25	100
3/4"	20	99
1/2"	12,5	54
3/8"	10	20
4	5	1
8	2,5	-
16	1,25	-
30	0,63	-
50	0,315	-
100	0,160	-
<b>Tamaño máximo nominal (mm)</b>		20
<b>Módulo de finura</b>		6.80
<b>Fecha ensayo</b>		-
<b>DETERMINACIÓN MATERIAL FINO</b> - NCh 1223		
<b>Fecha de ensayo</b>		-
<b>Material fino menor a 0,080 mm (%)</b>		0.2
<b>DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL Y NETA Y LA ABSORCIÓN DE LAS GRAVAS</b> - NCh 1117		
<b>Fecha de ensayo</b>		-
<b>Densidad real arido sss (kg/m<sup>3</sup>)</b>		2,726
<b>Densidad real arido seco (kg/m<sup>3</sup>)</b>		2,698
<b>Densidad neta (kg/m<sup>3</sup>)</b>		2,775
<b>Absorción de agua (%)</b>		1.04
<b>DETERMINACIÓN IMPUREZAS ORGÁNICAS</b> ASTM C 40		
<b>Fecha de ensayo</b>		-
<b>Coloración de la solución en estudio en comparación con la solución tipo</b>		-
<b>DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD A PARENTE</b> - NCh 1116		
<b>Fecha de ensayo</b>		-
<b>Densidad aparente compactada (kg/m<sup>3</sup>)</b>		1,596
<b>Densidad aparente suelta (kg/m<sup>3</sup>)</b>		1,502
<b>DETERMINACIÓN DE HUECOS</b> - NCh 1326		
<b>Contenido de huecos (%)</b>		44.3

NCh 163-20-5

100

90-100

-

20-55

0-10

**CARLOS ARCOS d' HAINAUT**  
Jefe de Unidad Físico Mecánica de Áridos

**JUAN HENRÍQUEZ CARO**  
Jefe de Sección Hormigones

## B. 2. ARENA

Insc. MINVU Res. Ex. Nº 987 del 16-02-2009.

Acreditación LE 525 y LE 526

### INFORME DE ENSAYO INTERNO Nº 2011/047-2

<b>FECHA DE EMISIÓN</b>	: 04 de septiembre de 2012.		
<b>EMITIDO/ELABORADO POR</b>	: SECCIÓN HORMIGONES / Hugo Leiva V.		
<b>REFERENCIA</b>	: Ensayos físico-mecánicos y químicos de áridos para hormigones.		
<b>SOLICITANTE</b>	: IDIEM - Unidad Físico Mecánica de Áridos.		
<b>DIRECCIÓN SOLICITANTE</b>	: Plaza Ercilla Nº 883.		
<b>DESTINATARIO</b>	: Federico Delfín A.		
<b>OBRA / PROYECTO</b>	: Áridos para docencia y memoristas.		
<b>METODOLOGÍA</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>· NCh 164 Of 76. Áridos para morteros y hormigones – Extracción y preparación de muestras.</li> <li>· NCh 165 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. / A excepción de la cláusula 7.3, secado a fuego directo en mechero a gas.</li> <li>· NCh 1116 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente.</li> <li>· NCh 1117 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.</li> <li>· NCh 1223 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del material fino menor a 0,080 mm. / A excepción de la cláusula 7.2 y 9.7, secado a fuego directo en mechero a gas.</li> <li>· NCh 1239 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.</li> <li>· NCh 1325 Of 78. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del equivalente de arena.</li> <li>· NCh 1326 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de huecos.</li> <li>· NCh 1327 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de partículas desmenuzables.</li> <li>· NCh 1328 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la desintegración – Método de los sulfatos. / (3).</li> <li>· NCh 1369 Of 78. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del desgaste de las gravas – Método de la Máquina de Los Ángeles.</li> <li>· NCh 1511 Of 80. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del coeficiente volumétrico medio de la gravas.</li> <li>· ASTM C 40 - 04 Standard test method for organic impurities in fine aggregates for concrete.</li> <li>· MC 8.202.6 - Agregados Pétreos : Método para determinar la cubicidad de partículas.</li> </ul>			
Notas : (3) Este ensayo no se encuentra dentro del alcance de las acreditaciones.			
<b>ANTECEDENTES</b>			
<b>M1</b>	: Muestra de Arena.	<b>ID de la muestra</b>	: 19660-2
<b>Procedencia de la muestra</b>	: Pétreos Río Maipo.		
<b>Muestreo efectuado por</b>	: IDIEM	<b>Fecha de muestreo</b>	: -
<b>Lugar de muestreo</b>	: -	<b>Fecha de recepción</b>	: -

<b>RESULTADOS</b>				
<b>GRANULOMETRÍA</b> - NCh 165				
TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA (EN PESO)		
ASTM	mm	M1		
2"	50	-	NCh 163-Arena	
1 1/2"	40	-		
1"	25	-		
3/4"	20	-		
1/2"	12,5	-		
3/8"	10	100		100
4	5	97		95-100
8	2,5	74		80-100
16	1,25	53		50-85
30	0,63	37		25-60
50	0,315	21		10-30
100	0,160	6		2-10
Tamaño máximo nominal (mm)		5		
Módulo de finura		3.03		
Fecha ensayo		-		
<b>DETERMINACIÓN MATERIAL FINO</b> - NCh 1223				
Fecha de ensayo		-		
Material fino menor a 0,080 mm (%)		1.5		
<b>DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL Y NETA Y LA ABSORCIÓN DE LAS ARENAS</b> - NCh 1239				
Fecha de ensayo		-		
Densidad real arido sss (kg/m <sup>3</sup> )		2,700		
Densidad real arido seco (kg/m <sup>3</sup> )		2,664		
Densidad neta (kg/m <sup>3</sup> )		2,765		
Absorción de agua (%)		1.37		
<b>DETERMINACIÓN IMPUREZAS ORGÁNICAS</b> ASTM C 40				
Fecha de ensayo		-		
Coloración de la solución en estudio en comparación con la solución tipo		Más clara		
<b>DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD A PARENTE</b> - NCh 1116				
Fecha de ensayo		-		
Densidad aparente compactada (kg/m <sup>3</sup> )		1,791		
Densidad aparente suelta (kg/m <sup>3</sup> )		1,653		
<b>DETERMINACIÓN DE HUECOS</b> - NCh 1326				
Contenido de huecos (%)		38.0		
<b>CARLOS ARCOS d' HAINAUT</b> Jefe de Unidad Físico Mecánica de Áridos		<b>JUAN HENRÍQUEZ CARO</b> Jefe de Sección Hormigones		

## ANEXO C. PATRON DIFRACTOGRAMA ETRINGITA

Ettringite

Moore A E, Taylor H F W

Acta Crystallographica B26 (1970) 386-393

Crystal structure of ettringite

Locality: Scawt Hill, Northern Ireland

\_database\_code\_amcsd 0009368

CELL PARAMETERS: 11.2600 11.2600 21.4800 90.000 90.000 120.000

SPACE GROUP: P31c

X-RAY WAVELENGTH: 1.541838

MAX. ABS. INTENSITY / VOLUME\*\*2: 7.994805177

2-THETA	INTENSITY	D-SPACING	H	K	L	Multiplicity
8.23	5.25	10.7400	0	0	2	1
9.07	100.00	9.7514	1	0	0	6
9.96	10.99	8.8793	1	0	1	6
12.26	2.91	7.2196	1	0	2	6
15.35	5.26	5.7713	1	0	3	6
15.74	36.35	5.6300	1	1	0	3
17.79	15.79	4.9864	2	-1	2	3
17.79	2.06	4.9864	1	1	2	3
18.19	4.25	4.8757	2	0	0	6
18.66	1.51	4.7548	2	0	1	6
18.87	28.92	4.7039	1	0	4	6
22.06	5.34	4.0301	2	0	3	6
22.89	22.39	3.8858	1	1	4	3
22.89	21.95	3.8858	2	-1	4	3
24.15	1.54	3.6857	2	1	0	6
24.51	1.45	3.6326	3	-1	1	6
24.66	13.35	3.6098	2	0	4	6
25.55	13.50	3.4861	2	1	2	6
25.55	6.76	3.4861	3	-1	2	6
27.21	3.14	3.2770	2	1	3	6
27.21	1.98	3.2770	3	-1	3	6
27.44	15.99	3.2505	3	0	0	6
29.57	5.62	3.0210	1	1	6	3
29.57	6.75	3.0210	2	-1	6	3
31.79	2.51	2.8150	2	2	0	3



32.19	34.38	2.7807	3	0	4	6
32.89	2.03	2.7230	2	2	2	3
33.12	3.68	2.7046	3	1	0	6
33.37	6.23	2.6850	0	0	8	1
34.19	9.57	2.6227	3	1	2	6
34.19	7.37	2.6227	4	-1	2	6
34.94	18.04	2.5680	3	-1	6	6
34.94	16.66	2.5680	2	1	6	6
35.48	1.60	2.5301	3	1	3	6
36.87	1.27	2.4379	4	0	0	6
37.10	1.45	2.4235	1	1	8	3
37.10	1.19	2.4235	2	-1	8	3
37.22	3.50	2.4155	3	1	4	6
37.22	3.96	2.4155	4	-1	4	6
38.27	3.81	2.3520	2	0	8	6
40.31	6.03	2.2371	3	2	0	6
40.64	1.65	2.2198	4	0	4	6
40.78	17.03	2.2128	4	-2	6	3
40.78	18.26	2.2128	2	2	6	3
41.22	3.49	2.1901	5	-2	2	6
41.22	1.95	2.1901	3	2	2	6
41.86	9.61	2.1580	3	1	6	6
41.86	8.83	2.1580	4	-1	6	6
42.33	2.36	2.1353	3	2	3	6
42.48	1.83	2.1279	4	1	0	6
43.35	1.41	2.0874	4	1	2	6
43.35	3.67	2.0874	5	-1	2	6
43.73	1.89	2.0701	3	0	8	6
43.84	2.76	2.0651	5	-2	4	6
43.84	2.58	2.0651	3	2	4	6
45.87	2.03	1.9783	5	-1	4	6
45.87	1.43	1.9783	4	1	4	6
46.57	9.41	1.9503	5	0	0	6
46.75	1.00	1.9429	4	-2	8	3
46.75	1.19	1.9429	2	2	8	3
48.51	1.97	1.8767	3	3	0	3
49.09	3.71	1.8558	2	1	10	6
49.09	2.62	1.8558	3	-1	10	6
49.29	2.69	1.8487	3	3	2	3
49.29	1.53	1.8487	6	-3	2	3

49.74	2.30	1.8331	5	0	4	6
50.23	1.32	1.8163	6	-2	2	6
50.57	1.12	1.8049	4	0	8	6
51.02	3.59	1.7900	0	0	12	1
51.59	2.14	1.7716	3	3	4	3
51.59	2.14	1.7716	6	-3	4	3
51.94	2.29	1.7606	1	0	12	6
52.23	1.34	1.7514	5	1	0	6
52.97	1.40	1.7286	6	-1	2	6
53.73	2.11	1.7059	1	1	12	3
53.73	2.06	1.7059	2	-1	12	3
54.56	3.15	1.6820	3	1	10	6
54.56	2.91	1.6820	4	-1	10	6
55.07	5.02	1.6677	4	1	8	6
55.07	5.51	1.6677	5	-1	8	6
55.16	1.30	1.6651	6	-1	4	6
55.16	1.33	1.6651	5	1	4	6
56.63	7.00	1.6252	6	0	0	6
57.49	1.53	1.6031	4	3	0	6
58.49	4.44	1.5780	5	0	8	6
61.38	1.84	1.5105	4	-2	12	3
61.38	1.95	1.5105	2	2	12	3
70.09	1.01	1.3425	0	0	16	1
70.14	1.05	1.3417	6	2	2	6
71.55	1.58	1.3188	5	0	12	6
72.11	1.80	1.3099	8	-4	6	3
72.11	1.49	1.3099	4	4	6	3
73.91	1.21	1.2824	8	-1	2	6

=====

XPOW Copyright 1993 Bob Downs, Ranjini Swaminathan and Kurt Bartelmehs  
For reference, see Downs et al. (1993) American Mineralogist 78, 1104-1107.

## ANEXO D. DETALLE DIFRACTOGRAMAS DE RAYOS X

### D. 1. DIFRACTOGRAMA SERIE C1-E

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=21043, 08/13/12 21:08									
PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit									
NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)									
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
1	6.287	14.0924	2063	290	1.7	89.1	1.2	0.261	330
2	8.914	9.9118	1799	348	2.0	170.7	2.2	0.417	197
3	9.170	9.6363	1788	327	1.9	170.2	2.2	0.442	185
4	10.538	8.3883	1787	401	2.3	68.9	0.9	0.146	749
5	12.531	7.0583	1858	426	2.5	157.4	2.1	0.314	268
6	13.932	6.3512	1908	874	5.1	184.9	2.4	0.180	535
7	15.158	5.8400	2005	172	1.0	37.7	0.5	0.186	509
8	15.851	5.5863	2017	308	1.8	132.6	1.7	0.366	228
9	18.083	4.9015	2273	1120	6.5	331.7	4.4	0.252	348
10	18.992	4.6689	2449	303	1.8	71.8	0.9	0.201	461
11	19.935	4.4502	2579	203	1.2	78.9	1.0	0.330	256
12	20.375	4.3550	2638	177	1.0	86.1	1.1	0.413	201
13	20.928	4.2413	2678	3598	21.0	590.1	7.8	0.139	832
14	21.824	4.0691	2803	179	1.0	67.7	0.9	0.322	265
15	22.074	4.0235	2864	5554	32.4	985.7	13.0	0.151	717
16	23.080	3.8504	3101	942	5.5	251.1	3.3	0.227	399
17	23.693	3.7521	3190	3070	17.9	627.9	10.9	0.229	394
18	24.365	3.6502	3242	2178	12.7	981.6	12.9	0.383	220
19	25.214	3.5292	3364	460	2.7	162.6	2.1	0.300	287
20	25.709	3.4623	3473	1237	7.2	477.1	6.3	0.328	261
21	26.484	3.3627	3771	2229	13.0	1173.9	15.4	0.448	187
22	26.714	3.3343	3900	17143	100.0	3099.8	40.8	0.154	700
23	26.948	3.3058	4028	966	5.6	968.3	12.7	0.852	97
24	27.608	3.2283	4413	2362	13.8	1989.1	26.2	0.716	115
25	27.843	3.2016	4274	9743	56.8	7606.1	100.0	0.664	125
26	28.041	3.1794	4275	16166	94.3	6519.0	85.7	0.343	250
27	28.495	3.1298	4508	3156	18.4	1025.8	13.5	0.276	318
28	29.503	3.0252	4708	2856	16.7	791.5	10.4	0.236	385
29	29.896	2.9862	4654	1384	8.1	1030.8	13.6	0.633	132
30	30.528	2.9258	4955	2103	12.3	524.6	6.9	0.212	440
31	30.889	2.8943	4792	520	3.0	90.4	1.2	0.148	758
32	31.518	2.8362	4409	1182	6.9	402.3	5.3	0.289	304
33	31.832	2.8089	4353	495	2.9	336.4	4.4	0.578	145
34	32.309	2.7685	4436	599	3.5	177.2	2.3	0.252	358
35	33.197	2.6965	4409	1141	6.7	279.9	3.7	0.209	453
36	33.927	2.6401	4720	662	3.9	367.7	4.8	0.472	180
37	34.183	2.6209	4781	1045	6.1	549.4	7.2	0.447	191
38	34.458	2.6006	4901	436	2.5	468.4	6.2	0.913	92
39	35.271	2.5425	4940	912	5.3	998.4	13.1	0.931	90
40	35.607	2.5193	4878	2269	13.2	1242.2	16.3	0.465	184
41	36.614	2.4523	4756	1667	9.7	363.2	4.8	0.185	537
42	37.189	2.4169	4572	514	3.0	692.5	9.1	1.145	73

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=21043, 08/13/12 21:08

PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

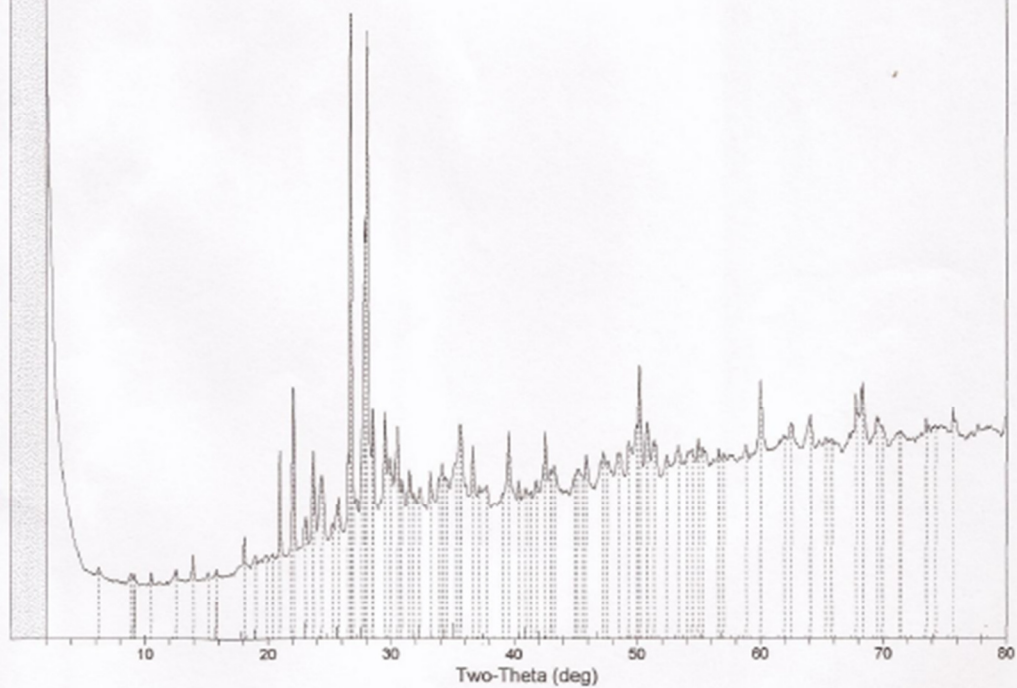
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
43	37.760	2.3804	4498	609	3.6	334.9	4.4	0.467	184
44	39.082	2.3029	4519	321	1.9	227.4	3.0	0.602	142
45	39.520	2.2784	4560	2354	13.7	812.6	10.7	0.293	306
46	40.349	2.2335	4665	618	3.6	89.4	1.2	0.123	>1000
47	40.941	2.2025	4697	332	1.9	120.0	1.6	0.307	292
48	41.355	2.1814	4687	214	1.2	120.0	1.6	0.477	182
49	41.790	2.1597	4785	506	3.0	118.3	1.6	0.199	495
50	42.502	2.1252	4886	2024	11.8	889.3	11.7	0.373	237
51	42.976	2.1028	4872	765	4.5	734.1	9.7	0.816	105
52	43.254	2.0900	4981	811	4.7	438.6	5.8	0.460	190
53	44.913	2.0165	5011	454	2.6	288.0	3.8	0.539	162
54	45.168	2.0057	4940	690	4.0	596.1	7.8	0.734	118
55	45.524	1.9909	4914	518	3.0	959.4	12.6	1.574	55
56	45.841	1.9778	5119	1006	5.9	475.1	6.2	0.401	222
57	47.204	1.9239	5200	1022	6.0	667.5	8.8	0.555	159
58	47.599	1.9088	5310	626	3.7	665.2	8.7	0.903	97
59	48.488	1.8759	5430	763	4.5	370.6	4.9	0.413	218
60	49.279	1.8476	5756	822	4.8	180.6	2.4	0.187	554
61	49.951	1.8243	5636	1467	8.6	1236.1	16.3	0.716	124
62	50.186	1.8163	5763	3381	19.7	1309.2	17.2	0.329	280
63	50.819	1.7952	5675	1531	8.9	525.1	6.9	0.292	321
64	51.352	1.7778	5529	1079	6.3	534.2	7.0	0.421	216
65	52.380	1.7453	5569	651	3.2	152.2	2.0	0.235	417
66	53.327	1.7165	5786	650	3.8	227.5	3.0	0.298	317
67	54.063	1.6949	5842	380	2.2	211.3	2.8	0.473	193
68	54.453	1.6836	5871	443	2.6	211.1	2.8	0.405	228
69	54.928	1.6702	5873	781	4.6	349.5	4.6	0.380	244
70	55.384	1.6575	5822	531	3.1	276.2	3.6	0.442	208
71	56.592	1.6250	5877	432	2.5	95.0	1.2	0.187	571
72	57.042	1.6132	5850	323	1.9	305.7	4.0	0.804	113
73	58.838	1.5682	5966	480	2.8	148.5	2.0	0.263	375
74	60.008	1.5404	6151	2475	14.4	801.2	10.5	0.275	358
75	61.943	1.4968	6377	405	2.4	319.1	4.2	0.670	140
76	62.556	1.4836	6431	735	4.3	379.4	5.0	0.439	218
77	64.076	1.4520	6327	1119	6.5	480.9	6.3	0.365	267
78	65.341	1.4270	6407	272	1.6	171.4	2.3	0.536	179
79	65.796	1.4182	6310	311	1.8	301.6	4.0	0.824	116
80	67.790	1.3812	6366	1795	10.5	1069.3	14.1	0.506	193
81	68.364	1.3710	6569	1961	11.4	1015.4	13.3	0.440	224
82	69.490	1.3515	6457	942	5.5	634.9	8.3	0.573	171
83	69.924	1.3442	6447	631	3.7	604.1	7.9	0.814	120
84	71.288	1.3218	6515	356	2.1	271.2	3.6	0.647	153

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=21043, 08/13/12 21:08

PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
85	71.486	1.3186	6539	349	2.0	271.8	3.6	0.662	150
86	73.518	1.2871	6777	525	3.1	171.4	2.3	0.278	383
87	74.268	1.2760	6811	276	1.6	358.3	4.7	1.104	91
88	75.693	1.2555	6779	929	5.4	295.6	3.9	0.270	400



## D. 2. DIFRACTOGRMA SERIE C1-C

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=25613, 08/13/12 22:17									
PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit									
NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)									
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
1	8.837	9.9985	1798	235	1.4	126.5	2.6	0.458	178
2	9.133	9.6753	1787	243	1.4	138.0	2.9	0.483	169
3	10.496	8.4215	1803	392	2.3	48.6	1.0	0.105	>1000
4	12.529	7.0589	1865	208	1.2	86.6	1.8	0.354	235
5	13.894	6.3686	1902	877	5.1	210.2	4.4	0.204	451
6	15.137	5.8481	1963	204	1.2	68.1	1.4	0.284	302
7	15.828	5.5944	2052	280	1.6	98.3	2.0	0.299	285
8	17.808	4.9768	2261	227	1.3	142.9	3.0	0.535	153
9	18.061	4.9074	2308	1145	6.6	328.7	6.8	0.244	361
10	18.970	4.6743	2480	309	1.8	52.8	1.1	0.145	764
11	19.642	4.5159	2558	186	1.1	94.6	2.0	0.432	192
12	19.882	4.4620	2596	164	0.9	59.5	1.2	0.309	276
13	20.888	4.2492	2695	2981	17.2	495.5	10.3	0.141	809
14	21.785	4.0763	2815	215	1.2	95.8	2.0	0.379	221
15	22.033	4.0309	2864	5972	34.4	1076.8	22.4	0.153	697
16	23.002	3.8633	3141	792	4.6	219.4	4.6	0.235	380
17	23.673	3.7553	3192	3319	19.1	933.6	19.4	0.239	374
18	24.365	3.6501	3298	2079	12.0	919.2	19.1	0.376	224
19	25.215	3.5290	3378	269	1.5	109.1	2.3	0.345	247
20	25.669	3.4676	3438	1063	6.1	406.3	8.4	0.325	264
21	26.444	3.3677	3701	1955	11.3	1240.3	25.8	0.539	154
22	26.675	3.3390	3853	17358	100.0	3059.3	63.6	0.150	732
23	26.928	3.3083	4018	736	4.2	816.4	17.0	0.943	87
24	27.569	3.2328	4316	2379	13.7	2134.7	44.4	0.763	108
25	28.001	3.1839	4206	16118	92.9	4810.8	100.0	0.254	351
26	28.296	3.1514	4190	1851	10.7	1618.1	33.6	0.743	111
27	29.482	3.0273	4556	1930	11.1	586.5	12.2	0.258	345
28	29.837	2.9920	4593	1603	9.2	908.1	18.9	0.482	175
29	30.470	2.9313	4859	2045	11.8	595.0	12.4	0.247	364
30	30.847	2.8963	4817	704	4.1	91.4	1.9	0.110	>1000
31	31.478	2.8397	4426	1157	6.7	384.1	8.0	0.282	313
32	31.811	2.8107	4385	380	2.2	298.1	6.2	0.667	125
33	32.249	2.7735	4434	425	2.4	118.7	2.5	0.237	384
34	33.137	2.7012	4439	1122	6.5	293.0	6.1	0.222	418
35	33.910	2.6414	4821	805	4.6	368.8	7.7	0.389	221
36	34.124	2.6253	4849	1369	7.9	688.3	14.3	0.427	200
37	34.418	2.6036	4992	548	3.2	689.5	14.3	1.069	78
38	35.034	2.5592	5103	551	3.2	682.9	14.2	1.053	79
39	35.567	2.5220	4950	2242	12.9	1198.9	24.9	0.455	188
40	36.576	2.4547	4782	1608	9.3	328.1	6.8	0.173	590
41	37.130	2.4194	4705	380	2.2	322.5	6.7	0.721	117
42	37.445	2.3997	4603	373	2.1	322.7	6.7	0.735	115

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=25613, 08/13/12 22:17

PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

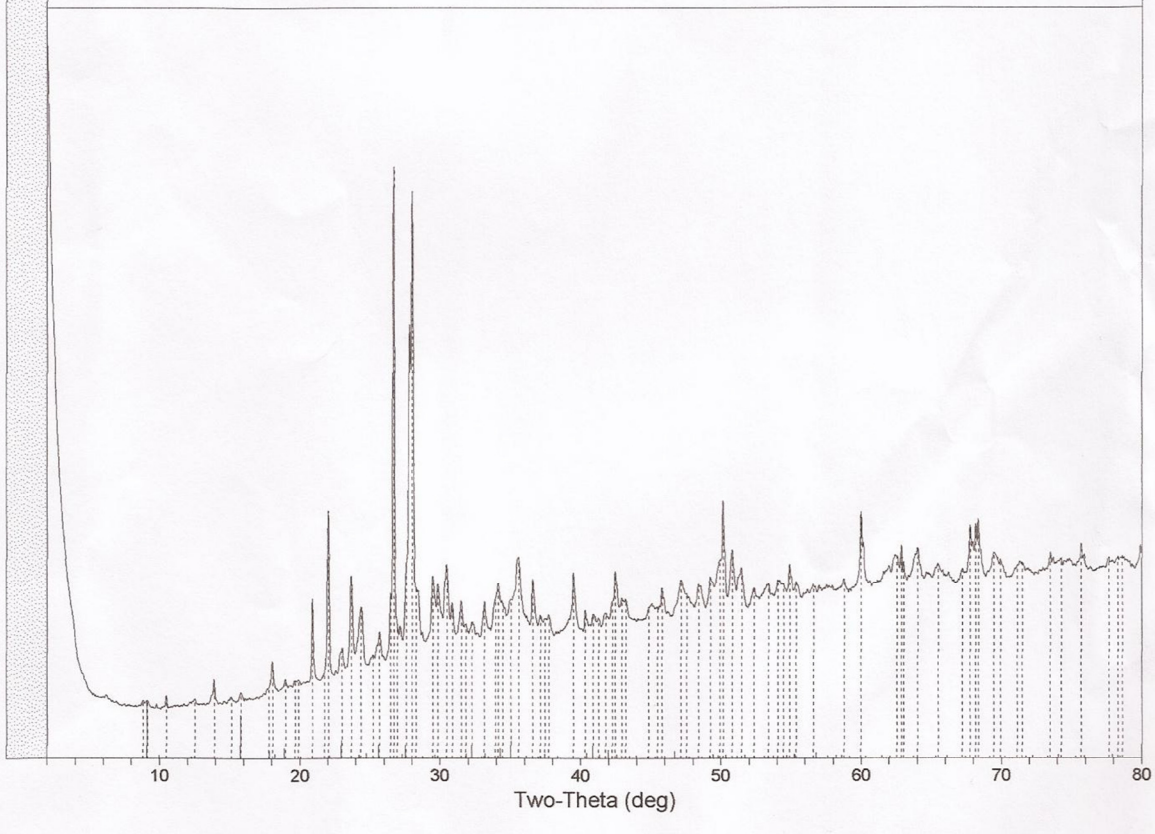
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
43	37.720	2.3829	4514	595	3.4	322.8	6.7	0.461	186
44	39.480	2.2806	4520	2112	12.2	742.8	15.4	0.299	300
45	40.309	2.2356	4614	664	3.8	101.7	2.1	0.130	>1000
46	40.882	2.2056	4646	489	2.8	278.7	5.8	0.484	179
47	41.257	2.1864	4731	253	1.5	156.6	3.3	0.526	164
48	41.789	2.1598	4873	303	1.7	79.2	1.6	0.222	429
49	42.265	2.1365	5150	431	2.5	204.4	4.2	0.403	218
50	42.464	2.1270	4863	1803	10.4	1127.8	23.4	0.532	163
51	42.936	2.1047	4944	767	4.4	577.7	12.0	0.640	135
52	43.195	2.0927	5074	586	3.4	312.5	6.5	0.453	193
53	44.834	2.0199	5147	231	1.3	66.9	1.4	0.246	382
54	45.464	1.9934	5006	393	2.3	613.5	12.8	1.327	65
55	45.801	1.9795	5141	928	5.3	387.2	8.0	0.355	253
56	47.145	1.9261	5211	1150	6.6	735.2	15.3	0.543	162
57	47.558	1.9104	5300	557	3.2	740.5	15.4	1.130	77
58	48.409	1.8788	5402	809	4.7	311.4	6.5	0.327	280
59	49.257	1.8484	5828	641	3.7	136.7	2.8	0.181	578
60	49.931	1.8250	5657	1416	8.2	1230.1	25.6	0.738	120
61	50.148	1.8176	5802	3370	19.4	1253.7	26.1	0.316	292
62	50.780	1.7964	5719	1712	9.9	590.0	12.3	0.293	319
63	51.451	1.7746	5528	1279	7.4	570.0	11.8	0.379	241
64	52.359	1.7459	5552	521	3.0	163.6	3.4	0.267	358
65	53.387	1.7147	5758	466	2.7	191.4	4.0	0.349	266
66	54.060	1.6950	5854	496	2.9	213.0	4.4	0.365	254
67	54.451	1.6837	5930	275	1.6	212.9	4.4	0.658	137
68	54.890	1.6713	5796	1110	6.4	672.4	14.0	0.515	177
69	55.364	1.6581	5817	473	2.7	160.9	3.3	0.289	331
70	56.586	1.6251	5879	294	1.7	132.8	2.8	0.384	243
71	58.762	1.5700	5959	429	2.5	114.6	2.4	0.227	447
72	59.968	1.5413	6057	2726	15.7	827.0	17.2	0.258	386
73	62.555	1.4836	6421	780	4.5	662.4	13.8	0.722	130
74	62.853	1.4773	6475	1097	6.3	466.7	9.7	0.362	268
75	63.043	1.4733	6427	492	2.8	88.8	1.8	0.153	800
76	64.017	1.4532	6401	1085	6.3	513.7	10.7	0.402	240
77	65.499	1.4239	6376	554	3.2	407.7	8.5	0.626	153
78	67.217	1.3916	6491	248	1.4	42.6	0.9	0.146	896
79	67.770	1.3816	6411	1886	10.9	925.2	19.2	0.417	236
80	68.148	1.3748	6561	1726	9.9	1191.0	24.8	0.587	166
81	68.343	1.3714	6546	1974	11.4	973.3	20.2	0.419	236
82	69.470	1.3519	6480	843	4.9	604.3	12.6	0.609	161
83	69.945	1.3439	6463	613	3.5	603.1	12.5	0.836	117
84	71.113	1.3246	6522	315	1.8	299.5	6.2	0.808	122

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=25613, 08/13/12 22:17

PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
85	71.467	1.3189	6508	467	2.7	380.8	7.9	0.693	143
86	73.482	1.2877	6742	593	3.4	263.0	5.5	0.377	273
87	74.270	1.2759	6802	315	1.8	391.5	8.1	1.056	95
88	75.674	1.2557	6822	823	4.7	242.7	5.0	0.251	438
89	77.670	1.2284	6885	280	1.6	60.2	1.3	0.183	667
90	78.320	1.2198	6822	367	2.1	384.2	8.0	0.890	116
91	78.619	1.2159	6891	302	1.7	218.4	4.5	0.615	169





### D. 3. DIFRACTOGRMA SERIE C2-E

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=30554, 08/13/12 18:49										
PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit										
NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)										
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)	
1	3.768	23.4328	2607	3301	20.2	1301.4	23.1	0.335	249	
2	6.228	14.1793	1998	494	3.0	130.4	2.3	0.224	396	
3	8.796	10.0447	1730	700	4.3	214.9	3.8	0.261	331	
4	9.093	9.7178	1708	359	2.2	124.6	2.2	0.295	287	
5	10.498	8.4198	1697	1008	6.2	125.5	2.2	0.106	>1000	
6	12.193	7.2527	1791	148	0.9	86.7	1.5	0.498	164	
7	12.491	7.0806	1802	790	4.8	203.5	3.6	0.219	410	
8	13.874	6.3775	1830	914	5.6	210.2	3.7	0.196	476	
9	15.060	5.8779	1879	218	1.3	62.3	1.1	0.243	362	
10	15.773	5.6140	1914	319	2.0	137.9	2.4	0.367	227	
11	17.687	5.0104	2121	333	2.0	183.1	3.2	0.467	176	
12	18.060	4.9077	2181	3081	18.9	646.8	11.5	0.178	544	
13	18.830	4.7087	2313	217	1.3	55.2	1.0	0.216	420	
14	19.761	4.4890	2393	163	1.0	111.4	2.0	0.581	141	
15	20.254	4.3809	2418	179	1.1	98.0	1.7	0.466	177	
16	20.885	4.2498	2467	2892	17.7	484.0	8.6	0.142	798	
17	21.785	4.0764	2574	173	1.1	73.4	1.3	0.361	234	
18	22.032	4.0311	2620	4269	26.1	764.9	13.6	0.152	705	
19	23.021	3.8602	2864	826	5.1	223.7	4.0	0.230	391	
20	23.635	3.7613	2958	2758	16.9	824.0	14.6	0.254	348	
21	24.326	3.6560	3019	1915	11.7	893.7	15.8	0.397	212	
22	25.136	3.5399	3110	681	4.2	187.6	3.3	0.234	384	
23	25.668	3.4678	3216	1101	6.7	369.6	6.6	0.285	305	
24	26.427	3.3699	3501	1566	9.6	789.8	14.0	0.429	196	
25	26.657	3.3413	3630	16340	100.0	2956.5	52.4	0.154	699	
26	26.908	3.3107	3770	1065	6.5	1129.7	20.0	0.902	91	
27	27.567	3.2330	4137	2810	17.2	2468.5	43.8	0.747	111	
28	27.981	3.1861	4033	13244	81.1	5640.1	100.0	0.362	235	
29	28.274	3.1538	4058	1868	11.4	1679.2	29.8	0.764	108	
30	29.461	3.0293	4436	4031	24.7	938.0	16.6	0.198	481	
31	29.837	2.9920	4379	1149	7.0	816.5	14.5	0.604	138	
32	30.470	2.9313	4663	1988	12.2	514.6	9.1	0.220	420	
33	30.828	2.8980	4497	527	3.2	76.1	1.3	0.123	>1000	
34	31.476	2.8398	4216	1130	6.9	375.7	6.7	0.283	312	
35	31.795	2.8121	4134	580	3.5	366.6	6.5	0.537	156	
36	32.248	2.7736	4141	1191	7.3	562.3	10.0	0.401	213	
37	32.627	2.7423	4276	265	1.6	36.4	0.6	0.117	>1000	
38	33.157	2.6996	4190	819	5.0	244.3	4.3	0.254	356	
39	33.870	2.6444	4478	960	5.9	568.2	10.1	0.503	168	
40	34.105	2.6267	4559	2876	17.6	1175.4	20.8	0.347	250	
41	34.401	2.6048	4681	1171	7.2	751.1	13.3	0.545	155	
42	35.075	2.5563	4805	465	2.8	612.2	10.9	1.119	75	

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=30554, 08/13/12 18:49

PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

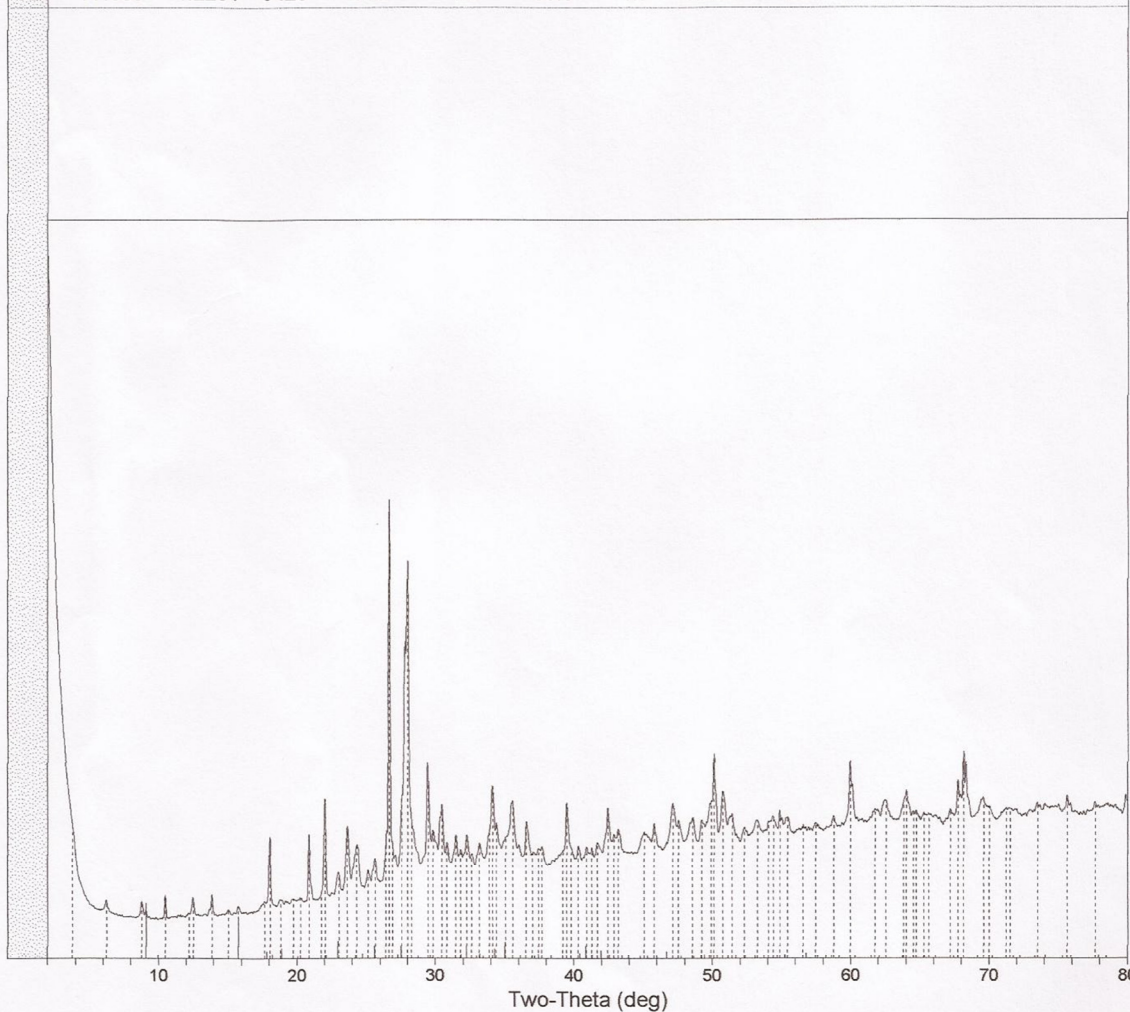
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
43	35.567	2.5220	4616	2189	13.4	1062.1	18.8	0.412	209
44	36.557	2.4560	4450	1466	9.0	342.8	6.1	0.199	487
45	37.032	2.4255	4277	333	2.0	700.9	12.4	1.789	47
46	37.465	2.3985	4297	473	2.9	302.4	5.4	0.543	157
47	37.701	2.3840	4202	650	4.0	302.5	5.4	0.396	219
48	39.203	2.2961	4222	462	2.8	402.0	7.1	0.740	115
49	39.479	2.2806	4317	2396	14.7	759.8	13.5	0.270	337
50	39.793	2.2634	4307	493	3.0	472.0	8.4	0.814	105
51	40.310	2.2356	4359	515	3.2	83.7	1.5	0.138	888
52	40.900	2.2046	4343	498	3.0	191.2	3.4	0.326	273
53	41.297	2.1844	4401	412	2.5	191.1	3.4	0.394	223
54	41.694	2.1645	4554	472	2.9	112.7	2.0	0.203	482
55	42.462	2.1271	4584	1905	11.7	962.3	17.1	0.429	204
56	42.897	2.1065	4617	773	4.7	764.7	13.6	0.841	102
57	43.213	2.0918	4778	823	5.0	348.3	6.2	0.360	247
58	45.090	2.0090	4698	768	4.7	566.6	10.0	0.627	139
59	45.801	1.9795	4821	1015	6.2	556.4	9.9	0.466	189
60	47.145	1.9262	4907	1776	10.9	1000.7	17.7	0.479	185
61	47.559	1.9103	5014	962	5.9	731.2	13.0	0.646	136
62	48.587	1.8723	5098	1011	6.2	403.2	7.1	0.339	269
63	49.237	1.8491	5422	559	3.4	113.1	2.0	0.172	625
64	49.911	1.8257	5358	1340	8.2	1054.2	18.7	0.669	133
65	50.130	1.8182	5474	3369	20.6	1270.7	22.5	0.321	288
66	50.761	1.7971	5457	1745	10.7	815.2	14.5	0.397	229
67	51.413	1.7758	5244	1001	6.1	557.6	9.9	0.473	191
68	52.320	1.7471	5222	451	2.8	125.2	2.2	0.236	414
69	53.248	1.7189	5420	557	3.4	218.0	3.9	0.333	280
70	54.059	1.6950	5548	382	2.3	221.7	3.9	0.493	185
71	54.394	1.6853	5611	519	3.2	221.2	3.9	0.362	256
72	54.870	1.6718	5487	897	5.5	708.3	12.6	0.671	135
73	55.462	1.6554	5520	573	3.5	283.0	5.0	0.420	220
74	56.570	1.6256	5499	283	1.7	113.0	2.0	0.339	278
75	57.460	1.6025	5557	301	1.8	98.7	1.8	0.279	348
76	58.763	1.5700	5649	493	3.0	150.7	2.7	0.260	380
77	59.967	1.5413	5800	2754	16.9	876.1	15.5	0.270	365
78	61.764	1.5007	6106	332	2.0	119.7	2.1	0.307	319
79	62.536	1.4840	6038	790	4.8	507.4	9.0	0.546	173
80	63.842	1.4568	6097	696	4.3	424.7	7.5	0.519	184
81	64.037	1.4528	5997	1228	7.5	683.1	12.1	0.473	203
82	64.550	1.4425	6029	311	1.9	210.3	3.7	0.575	166
83	64.730	1.4389	6099	265	1.6	80.6	1.4	0.259	394
84	65.302	1.4277	6012	284	1.7	155.9	2.8	0.467	207

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=30554, 08/13/12 18:49

PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
85	65.656	1.4209	5935	276	1.7	303.2	5.4	0.934	102
86	67.180	1.3923	6037	391	2.4	99.4	1.8	0.216	498
87	67.770	1.3816	6022	1644	10.1	799.1	14.2	0.413	239
88	68.165	1.3745	6139	2821	17.3	1123.2	19.9	0.338	297
89	69.607	1.3496	6067	885	5.4	601.7	10.7	0.578	170
90	70.024	1.3425	6061	514	3.1	558.5	9.9	0.924	106
91	71.247	1.3225	6127	366	2.2	300.6	5.3	0.698	141
92	71.505	1.3183	6093	384	2.4	410.1	7.3	0.908	109
93	73.501	1.2874	6343	378	2.3	145.5	2.6	0.327	318
94	75.673	1.2557	6309	721	4.4	231.4	4.1	0.273	396
95	77.686	1.2281	6420	318	1.9	95.9	1.7	0.256	432



## D. 4. DIFRACTOGRMA SERIE C2-C.

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=24076, 08/13/12 19:58									
PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit									
NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)									
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
1	6.266	14.0946	2089	273	1.5	114.1	2.7	0.355	233
2	8.857	9.9761	1839	288	1.6	131.5	3.1	0.388	213
3	9.152	9.6549	1842	163	0.9	108.9	2.6	0.568	143
4	10.515	8.4063	1827	287	1.6	43.4	1.0	0.129	986
5	11.087	7.9738	1838	144	0.8	88.3	2.1	0.521	156
6	12.493	7.0793	1890	312	1.8	128.7	3.0	0.351	238
7	13.894	6.3684	1930	741	4.2	170.0	4.0	0.195	478
8	15.158	5.8400	1965	201	1.1	56.6	1.3	0.239	369
9	15.850	5.5869	2000	262	1.5	73.7	1.7	0.239	369
10	17.706	5.0051	2228	224	1.3	150.4	3.6	0.571	143
11	18.064	4.9068	2293	1652	9.4	451.2	10.7	0.232	384
12	18.971	4.6741	2437	239	1.4	64.8	1.5	0.230	388
13	19.861	4.4666	2564	224	1.3	85.6	2.0	0.325	261
14	20.906	4.2456	2638	2995	17.0	462.8	10.9	0.131	948
15	22.052	4.0276	2864	5504	31.2	952.7	22.5	0.147	750
16	23.040	3.8570	3068	849	4.8	212.3	5.0	0.213	432
17	23.674	3.7552	3104	2809	15.9	853.8	20.2	0.258	341
18	24.365	3.6502	3196	2040	11.6	950.5	22.5	0.396	212
19	25.116	3.5427	3262	336	1.9	140.2	3.3	0.355	239
20	25.670	3.4675	3352	1111	6.3	433.6	10.2	0.332	258
21	26.464	3.3653	3626	1867	10.6	1095.2	25.9	0.499	167
22	26.694	3.3368	3760	17632	100.0	3043.3	71.9	0.147	761
23	26.927	3.3084	3895	663	3.8	734.4	17.4	0.942	87
24	27.588	3.2306	4228	2102	11.9	1877.9	44.4	0.759	109
25	28.001	3.1839	4130	11940	67.7	4231.4	100.0	0.301	288
26	28.415	3.1385	4208	1571	8.9	1390.2	32.9	0.752	110
27	29.483	3.0272	4526	1949	11.1	561.9	13.3	0.245	367
28	29.876	2.9882	4490	1521	8.6	797.6	18.8	0.446	189
29	30.490	2.9294	4867	1965	11.1	493.3	11.7	0.213	437
30	30.865	2.8947	4675	491	2.8	69.6	1.6	0.120	>1000
31	31.496	2.8381	4399	1075	6.1	475.8	11.2	0.376	228
32	31.774	2.8139	4397	503	2.9	472.6	11.2	0.799	104
33	32.209	2.7768	4396	556	3.2	358.2	8.5	0.548	154
34	32.623	2.7426	4438	270	1.5	36.7	0.9	0.116	>1000
35	33.158	2.6995	4454	856	4.9	241.6	5.7	0.240	380
36	33.870	2.6444	4737	904	5.1	503.9	11.9	0.474	179
37	34.125	2.6253	4757	2117	12.0	1065.5	25.2	0.428	200
38	34.420	2.6034	4879	945	5.4	960.9	22.7	0.864	97
39	35.192	2.5480	4982	728	4.1	778.1	18.4	0.908	92
40	35.606	2.5194	4868	2316	13.1	1146.2	27.1	0.421	204
41	36.577	2.4547	4728	1904	10.8	388.2	9.2	0.173	591
42	37.168	2.4170	4541	477	2.7	634.0	15.0	1.130	74

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=24076, 08/13/12 19:58

PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

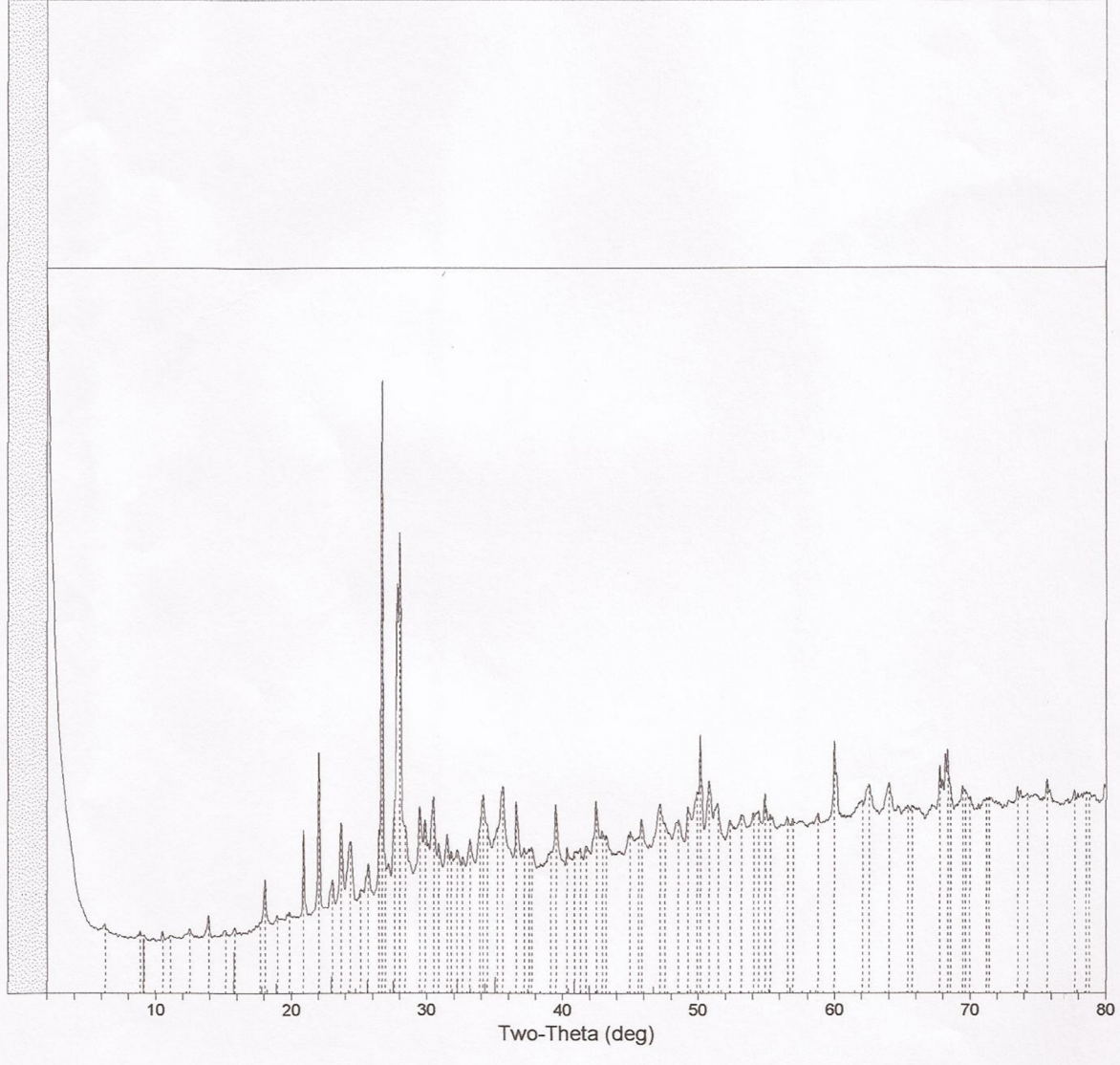
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
43	37.524	2.3949	4538	461	2.6	313.9	7.4	0.579	147
44	37.721	2.3828	4471	566	3.2	313.4	7.4	0.471	183
45	39.105	2.3016	4427	474	2.7	312.9	7.4	0.561	153
46	39.499	2.2795	4450	2100	11.9	790.3	18.7	0.320	278
47	40.312	2.2354	4516	536	3.0	85.2	2.0	0.135	931
48	40.883	2.2055	4570	325	1.8	259.0	6.1	0.677	127
49	41.313	2.1836	4643	362	2.1	154.8	3.7	0.363	243
50	41.751	2.1617	4786	300	1.7	177.0	4.2	0.501	173
51	42.483	2.1261	4791	1875	10.6	1029.6	24.3	0.467	187
52	42.917	2.1056	4826	773	4.4	655.6	15.5	0.721	120
53	43.232	2.0910	4916	550	3.1	383.2	9.1	0.592	146
54	44.976	2.0139	5098	422	2.4	157.8	3.7	0.318	285
55	45.585	1.9884	4958	424	2.4	770.2	18.2	1.544	56
56	45.821	1.9787	5151	887	5.0	242.2	5.7	0.232	412
57	47.185	1.9246	5190	1375	7.8	829.1	19.6	0.513	172
58	47.539	1.9111	5247	671	3.8	732.4	17.3	0.928	94
59	48.548	1.8737	5296	718	4.1	313.1	7.4	0.371	244
60	49.258	1.8483	5615	863	4.9	181.2	4.3	0.178	591
61	49.911	1.8257	5535	1456	8.3	1233.9	29.2	0.720	123
62	50.167	1.8170	5698	3300	18.7	1215.8	28.7	0.313	296
63	50.800	1.7958	5629	1736	9.8	889.6	21.0	0.436	207
64	51.452	1.7746	5448	1143	6.5	632.2	14.9	0.470	192
65	52.340	1.7465	5495	507	2.9	139.6	3.3	0.234	418
66	53.190	1.7206	5685	506	2.9	309.8	7.3	0.520	174
67	54.097	1.6939	5794	450	2.6	240.8	5.7	0.455	201
68	54.454	1.6836	5834	487	2.8	240.7	5.7	0.420	219
69	54.909	1.6707	5832	1095	6.2	342.5	8.1	0.266	363
70	55.342	1.6587	5764	434	2.5	232.1	5.5	0.455	202
71	56.589	1.6251	5767	339	1.9	95.8	2.3	0.240	413
72	57.001	1.6143	5749	294	1.7	250.1	5.9	0.723	126
73	58.783	1.5695	5843	385	2.2	128.3	3.0	0.283	344
74	59.987	1.5409	5993	2742	15.6	803.0	19.0	0.249	402
75	62.060	1.4943	6207	461	2.6	444.1	10.5	0.819	114
76	62.555	1.4836	6269	979	5.6	629.2	14.9	0.546	173
77	64.017	1.4532	6226	1070	6.1	576.1	13.6	0.458	210
78	65.420	1.4254	6222	282	1.6	220.3	5.2	0.664	144
79	65.736	1.4193	6149	347	2.0	345.1	8.2	0.845	113
80	67.770	1.3816	6266	1628	9.2	804.8	19.0	0.420	234
81	68.345	1.3714	6402	2056	11.7	1002.8	23.7	0.415	239
82	68.556	1.3677	6403	738	4.2	755.7	17.9	0.870	111
83	69.452	1.3522	6395	777	4.4	479.8	11.3	0.525	188
84	69.647	1.3489	6395	660	3.7	479.5	11.3	0.618	159

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=24076, 08/13/12 19:58

PEAK: 29-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
85	69.985	1.3432	6419	394	2.2	402.9	9.5	0.869	112
86	71.208	1.3231	6462	318	1.8	231.7	5.5	0.619	160
87	71.425	1.3196	6403	378	2.1	372.2	8.8	0.837	118
88	73.499	1.2874	6713	453	2.6	90.1	2.1	0.169	728
89	74.230	1.2765	6664	253	1.4	337.9	8.0	1.135	88
90	75.675	1.2557	6674	744	4.2	223.5	5.3	0.255	428
91	77.702	1.2279	6741	302	1.7	54.4	1.3	0.153	881
92	78.540	1.2169	6663	314	1.8	350.8	8.3	0.950	109
93	78.796	1.2136	6683	284	1.6	236.0	5.6	0.706	147



## D. 5. DIFRACTOGRMA SERIE C3-E.

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=25726, 08/13/12 23:27										
PEAK: 27-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit										
NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)										
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)	
1	3.155	27.9805	3699	3857	18.0	1920.5	26.3	0.423	193	
2	6.248	14.1341	2237	230	1.1	67.6	0.9	0.250	347	
3	8.779	10.0647	1950	303	1.4	165.2	2.3	0.463	176	
4	9.149	9.6578	1930	218	1.0	151.6	2.1	0.591	137	
5	10.516	8.4056	1885	602	2.8	91.7	1.3	0.129	970	
6	12.531	7.0583	2023	335	1.6	122.4	1.7	0.311	272	
7	13.911	6.3606	2067	978	4.6	236.8	3.2	0.206	445	
8	15.079	5.8705	2139	234	1.1	56.5	0.8	0.205	447	
9	15.830	5.5937	2192	308	1.4	147.1	2.0	0.406	204	
10	19.841	4.4711	2834	218	1.0	53.5	0.7	0.209	440	
11	20.905	4.2458	2960	3433	16.0	563.1	7.7	0.139	832	
12	21.803	4.0730	3109	303	1.4	131.9	1.8	0.370	227	
13	22.035	4.0306	3166	6338	29.5	1144.2	15.7	0.153	695	
14	23.041	3.8569	3437	975	4.5	245.1	3.4	0.214	429	
15	23.674	3.7552	3519	3531	16.4	936.0	12.8	0.225	402	
16	24.345	3.6531	3582	2530	11.8	1129.4	15.5	0.379	222	
17	25.234	3.5264	3698	401	1.9	169.9	2.3	0.360	235	
18	25.669	3.4676	3787	1270	5.9	525.2	7.2	0.351	242	
19	26.463	3.3653	4100	2077	9.7	1355.4	18.6	0.555	150	
20	26.677	3.3388	4247	21479	100.0	3614.5	49.6	0.143	798	
21	26.927	3.3084	4422	777	3.6	917.3	12.6	1.003	82	
22	27.150	3.2818	4569	815	3.8	217.3	3.0	0.227	402	
23	27.606	3.2285	4705	3227	15.0	3194.4	43.8	0.841	98	
24	27.823	3.2039	4620	10782	50.2	7291.0	100.0	0.575	145	
25	28.020	3.1818	4592	16847	78.4	5325.0	73.0	0.269	328	
26	28.416	3.1384	4592	2038	9.5	1712.9	23.5	0.714	116	
27	29.463	3.0291	5018	2855	13.3	808.9	11.1	0.241	375	
28	29.857	2.9900	4958	1509	7.0	1127.9	15.5	0.635	131	
29	30.491	2.9294	5236	2426	11.3	661.5	9.1	0.232	394	
30	30.848	2.8963	5100	664	3.1	87.8	1.2	0.112	>1000	
31	31.497	2.8380	4640	1315	6.1	389.6	5.3	0.252	357	
32	31.812	2.8107	4573	501	2.3	488.5	6.7	0.829	100	
33	32.326	2.7671	4656	399	1.9	119.9	1.6	0.255	352	
34	33.175	2.6982	4607	932	4.3	278.8	3.8	0.254	355	
35	33.790	2.6505	4712	619	2.9	216.7	3.0	0.298	296	
36	34.501	2.5975	5172	489	2.3	45.2	0.6	0.079	>1000	
37	35.074	2.5563	5069	836	3.9	950.4	13.0	0.966	87	
38	35.606	2.5193	5187	2601	12.1	1393.8	19.1	0.456	188	
39	36.576	2.4547	5093	2176	10.1	435.1	6.0	0.170	609	
40	37.150	2.4181	4997	487	2.2	386.1	5.3	0.703	120	
41	37.504	2.3961	4876	514	2.4	386.1	5.3	0.639	133	
42	37.721	2.3828	4802	669	3.1	386.2	5.3	0.491	175	

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=25726, 08/13/12 23:27

PEAK: 27-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
43	39.499	2.2796	4914	2306	10.7	779.4	10.7	0.287	313
44	40.327	2.2346	5048	643	3.0	96.1	1.3	0.127	>1000
45	40.921	2.2035	4995	375	1.7	149.4	2.0	0.339	262
46	41.315	2.1835	5038	262	1.2	149.2	2.0	0.484	179
47	41.788	2.1598	5174	506	2.4	135.3	1.9	0.227	416
48	42.482	2.1261	5204	2115	9.8	1395.5	19.1	0.561	154
49	42.897	2.1065	5236	858	4.0	873.4	12.0	0.865	99
50	43.213	2.0918	5373	796	3.7	509.7	7.0	0.544	160
51	45.287	2.0008	5230	654	3.0	653.4	9.0	0.849	102
52	45.822	1.9786	5417	1173	5.5	498.7	6.8	0.361	248
53	47.223	1.9231	5527	641	3.0	462.1	6.3	0.613	143
54	47.598	1.9088	5643	638	3.0	459.0	6.3	0.612	144
55	48.429	1.8780	5815	908	4.2	351.3	4.8	0.329	278
56	49.259	1.8483	6231	778	3.6	131.8	1.8	0.144	843
57	49.871	1.8270	5941	1584	7.4	1303.3	17.9	0.699	127
58	50.150	1.8175	6045	3904	18.2	1457.0	20.0	0.317	291
59	50.780	1.7965	5957	1361	6.3	421.3	5.8	0.263	361
60	51.452	1.7746	5818	1241	5.8	576.0	7.9	0.394	231
61	52.320	1.7471	5912	444	2.1	139.4	1.9	0.267	358
62	53.289	1.7176	6192	514	2.4	183.9	2.5	0.304	309
63	54.060	1.6950	6228	379	1.8	153.8	2.1	0.345	270
64	54.892	1.6712	6194	1126	5.2	390.8	5.4	0.295	323
65	55.345	1.6586	6196	559	2.6	216.1	3.0	0.329	287
66	56.626	1.6241	6357	270	1.3	66.6	0.9	0.210	490
67	57.541	1.6004	6397	249	1.2	147.7	2.0	0.504	183
68	58.762	1.5700	6388	494	2.3	170.5	2.3	0.293	331
69	59.986	1.5409	6609	3492	16.3	944.7	13.0	0.230	443
70	61.982	1.4960	6839	493	2.3	503.3	6.9	0.868	108
71	62.556	1.4836	6985	746	3.5	315.2	4.3	0.359	270
72	64.036	1.4529	6851	1282	6.0	579.2	7.9	0.384	253
73	65.696	1.4201	6852	301	1.4	344.6	4.7	0.973	98
74	67.199	1.3920	7012	420	2.0	78.8	1.1	0.159	769
75	67.771	1.3816	6970	2099	9.8	1005.9	13.8	0.407	242
76	68.344	1.3714	7171	2395	11.2	1138.5	15.6	0.404	245
77	69.469	1.3519	7092	759	3.5	563.9	7.7	0.632	155
78	69.688	1.3482	7070	689	3.2	563.8	7.7	0.696	141
79	70.023	1.3426	7042	604	2.8	548.2	7.5	0.771	127
80	71.092	1.3250	7064	322	1.5	240.2	3.3	0.634	156
81	71.268	1.3221	7082	454	2.1	240.3	3.3	0.450	223
82	71.524	1.3180	7046	344	1.6	364.9	5.0	0.902	109
83	73.482	1.2877	7364	722	3.4	208.4	2.9	0.245	442
84	73.696	1.2845	7431	281	1.3	71.6	1.0	0.217	517

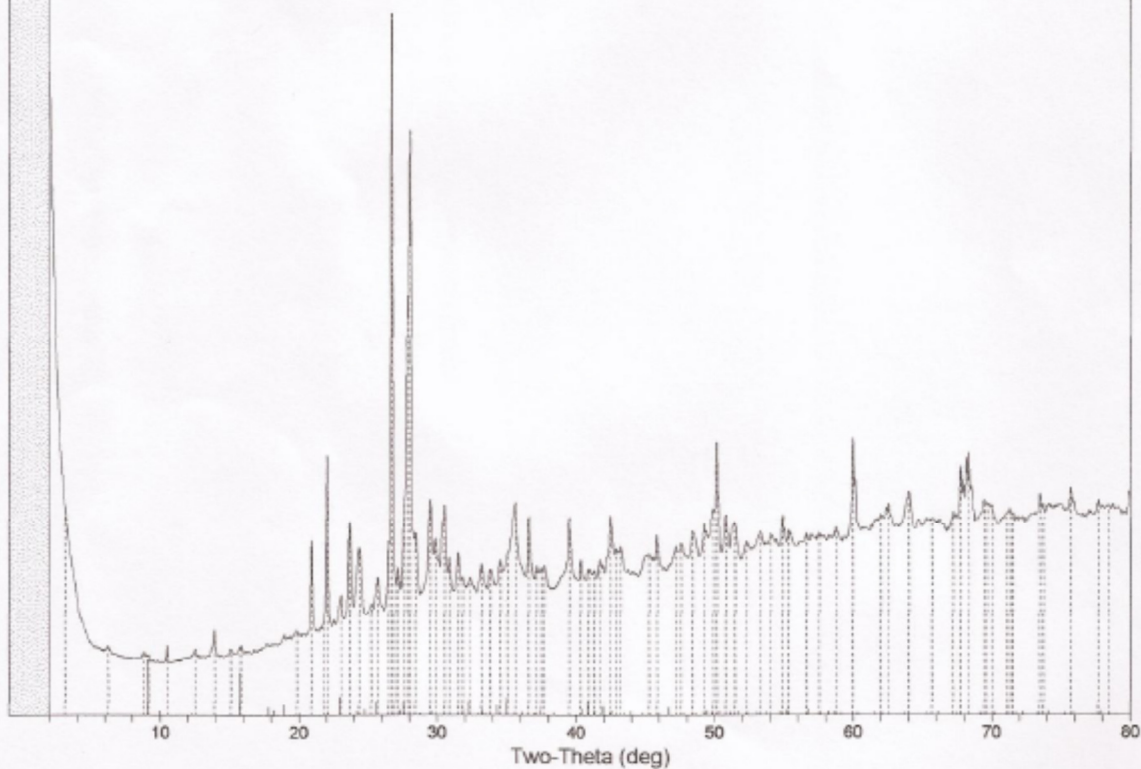


SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=25726, 08/13/12 23:27

PEAK: 27-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
85	75.675	1.2557	7420	880	4.1	251.5	3.4	0.243	454
86	77.672	1.2283	7422	446	2.1	170.3	2.3	0.325	330
87	78.420	1.2185	7387	283	1.3	372.7	5.1	1.119	92



## D. 6. DIFRACTOGRMA SERIE C3-C

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=24434, 08/14/12 00:36									
PEAK: 27-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit									
NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)									
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
1	6.229	14.1765	2103	312	1.5	142.6	2.8	0.388	212
2	8.914	9.9120	1916	349	1.7	172.2	3.4	0.419	196
3	9.134	9.6742	1909	283	1.4	172.1	3.4	0.517	157
4	10.534	8.3910	1883	575	2.8	68.5	1.4	0.101	>1000
5	12.550	7.0472	1977	324	1.6	123.2	2.4	0.323	260
6	13.932	6.3514	2022	955	4.7	221.7	4.4	0.197	471
7	15.080	5.8703	2091	227	1.1	52.9	1.1	0.198	468
8	15.887	5.5738	2147	281	1.4	141.4	2.8	0.428	193
9	18.082	4.9017	2460	392	1.9	107.3	2.1	0.233	383
10	18.990	4.6695	2675	217	1.1	23.8	0.5	0.093	>1000
11	19.920	4.4536	2780	225	1.1	92.0	1.8	0.347	242
12	20.925	4.2417	2917	3495	17.3	563.1	11.2	0.137	863
13	21.842	4.0658	3082	320	1.6	150.5	3.0	0.400	209
14	22.072	4.0239	3149	6046	29.8	1109.7	22.0	0.156	676
15	23.061	3.8536	3439	994	4.9	250.4	5.0	0.214	428
16	23.693	3.7522	3510	3628	17.9	981.2	19.5	0.230	392
17	24.365	3.6502	3540	2335	11.5	1096.7	21.8	0.399	210
18	25.215	3.5289	3631	377	1.9	159.0	3.2	0.358	236
19	25.688	3.4651	3746	1148	5.7	492.3	9.8	0.364	232
20	26.483	3.3629	4056	2049	10.1	1191.3	23.6	0.494	169
21	26.697	3.3363	4174	20260	100.0	3516.2	69.8	0.148	753
22	27.169	3.2795	4433	571	2.8	190.6	3.8	0.284	308
23	27.609	3.2282	4567	2639	13.0	2463.1	48.9	0.793	104
24	28.039	3.1796	4405	15385	75.9	5038.1	100.0	0.278	315
25	28.354	3.1450	4355	1940	9.6	1811.5	36.0	0.794	104
26	29.501	3.0253	4801	3109	15.3	901.7	17.9	0.247	365
27	29.896	2.9862	4828	1874	9.2	831.2	16.5	0.377	226
28	30.510	2.9275	5150	2447	12.1	639.6	12.7	0.222	415
29	30.869	2.8943	5077	1071	5.3	156.0	3.1	0.124	>1000
30	31.517	2.8363	4535	1366	6.7	574.8	11.4	0.358	240
31	31.813	2.8105	4511	598	3.0	471.8	9.4	0.671	125
32	32.367	2.7637	4604	407	2.0	83.4	1.7	0.174	580
33	33.195	2.6966	4566	1251	6.2	322.5	6.4	0.219	425
34	33.809	2.6490	4814	426	2.1	111.6	2.2	0.223	417
35	34.558	2.5934	5202	404	2.0	208.8	4.1	0.439	194
36	34.955	2.5648	5182	443	2.2	546.1	10.8	1.048	80
37	35.251	2.5439	5024	1099	5.4	1150.3	22.8	0.890	94
38	35.626	2.5180	5169	2321	11.5	1242.4	24.7	0.455	188
39	36.614	2.4523	5044	1758	8.7	393.8	7.8	0.190	517
40	37.168	2.4170	4941	329	1.6	410.1	8.1	1.059	79
41	37.483	2.3974	4822	659	3.3	410.3	8.1	0.529	161
42	37.702	2.3839	4741	646	3.2	410.0	8.1	0.539	158

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=24434, 08/14/12 00:36

PEAK: 27-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
43	39.262	2.2928	4743	585	2.9	411.4	8.2	0.598	143
44	39.519	2.2785	4790	2831	14.0	846.6	16.8	0.254	361
45	40.332	2.2344	4875	697	3.4	118.3	2.3	0.144	814
46	40.940	2.2026	4888	577	2.8	259.4	5.1	0.382	230
47	41.296	2.1844	4916	301	1.5	195.1	3.9	0.551	157
48	41.790	2.1597	5109	601	3.0	144.7	2.9	0.205	476
49	42.245	2.1375	5437	534	2.6	212.6	4.2	0.338	263
50	42.502	2.1252	5123	2016	10.0	1214.1	24.1	0.512	170
51	42.975	2.1029	5193	852	4.2	812.2	16.1	0.810	106
52	43.234	2.0909	5577	685	3.4	177.7	3.5	0.220	435
53	45.050	2.0107	5338	384	1.9	319.2	6.3	0.707	123
54	45.447	1.9941	5174	669	3.3	843.8	16.7	1.072	81
55	45.840	1.9779	5346	1169	5.8	532.7	10.6	0.387	230
56	47.243	1.9224	5517	586	2.9	405.3	8.0	0.588	150
57	47.600	1.9088	5645	498	2.5	389.8	7.7	0.665	132
58	48.548	1.8737	5767	1003	5.0	419.2	8.3	0.355	256
59	49.278	1.8476	6172	715	3.5	116.8	2.3	0.139	907
60	49.911	1.8257	5837	1497	7.4	1297.6	25.8	0.737	120
61	50.187	1.8163	5938	5079	25.1	1640.7	32.6	0.275	343
62	50.801	1.7958	5841	1366	6.7	421.0	8.4	0.262	363
63	51.471	1.7739	5724	1325	6.5	582.4	11.6	0.374	245
64	52.418	1.7441	5891	452	2.2	119.2	2.4	0.224	441
65	53.290	1.7176	6082	478	2.4	161.3	3.2	0.287	331
66	54.098	1.6938	6117	498	2.5	197.5	3.9	0.337	277
67	54.910	1.6707	6090	1039	5.1	424.4	8.4	0.347	269
68	55.382	1.6576	6056	653	3.2	239.4	4.8	0.312	304
69	56.231	1.6345	6144	261	1.3	60.0	1.2	0.195	536
70	57.517	1.6010	6274	261	1.3	193.7	3.8	0.631	145
71	57.736	1.5955	6271	266	1.3	193.6	3.8	0.619	149
72	58.820	1.5686	6291	286	1.4	135.2	2.7	0.402	234
73	59.988	1.5408	6473	3059	15.1	963.5	19.1	0.268	369
74	62.021	1.4951	6678	563	2.8	506.9	10.1	0.765	122
75	62.458	1.4857	6734	852	4.2	577.2	11.5	0.576	164
76	64.056	1.4524	6700	1316	6.5	595.9	11.8	0.385	252
77	64.825	1.4371	6815	299	1.5	76.6	1.5	0.218	487
78	65.458	1.4247	6752	324	1.6	429.3	8.5	1.126	84
79	65.798	1.4182	6835	387	1.9	217.9	4.3	0.479	202
80	67.217	1.3916	6856	329	1.6	86.9	1.7	0.224	475
81	67.789	1.3813	6858	2210	10.9	994.3	19.7	0.382	259
82	68.186	1.3742	6989	2667	13.2	1279.3	25.4	0.408	243
83	69.489	1.3516	6946	898	4.4	606.2	12.0	0.574	171
84	69.648	1.3489	6931	775	3.8	621.9	12.3	0.682	143

SCAN: 2.0/80.0006/0.01976/188.996(sec), Cu(40kV,30mA), I(max)=24434, 08/14/12 00:36

PEAK: 27-pts/Quartic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	Height%	Area	Area%	FWHM	XS(Å)
85	69.964	1.3435	6919	535	2.6	610.5	12.1	0.970	101
86	71.012	1.3263	6916	289	1.4	235.3	4.7	0.692	143
87	71.327	1.3212	6957	403	2.0	235.6	4.7	0.497	201
88	71.505	1.3183	6930	371	1.8	318.0	6.3	0.729	136
89	73.501	1.2874	7292	588	2.9	185.6	3.7	0.268	398
90	74.883	1.2670	7347	337	1.7	180.7	3.6	0.456	225
91	75.693	1.2554	7283	828	4.1	253.6	5.0	0.260	419
92	77.709	1.2278	7310	406	2.0	98.9	2.0	0.207	563
93	78.282	1.2203	7267	311	1.5	354.9	7.0	0.970	106
94	78.578	1.2164	7268	305	1.5	349.8	6.9	0.975	106

