



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

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA EFICIENCIA DE UNA CENIZA VOLANTE
COMO ADICIÓN INHIBIDORA DEL FENÓMENO EXPANSIVO POR FORMACIÓN DE
ETRINGITA RETARDADA (DEF) EN EL HORMIGÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE IGNACIO PARRA BARRIENTOS

PROFESOR GUÍA

FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

JACQUES BORNARD ARAYA

YURI TOMICIC CALVO

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Ingeniero Civil
POR: Felipe Ignacio Parra Barrientos
FECHA: 10/10/2015
PROFESOR GUÍA: Federico Delfín Ariztía

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA EFICIENCIA DE UNA CENIZA VOLANTE
COMO ADICIÓN INHIBIDORA DEL FENÓMENO EXPANSIVO POR FORMACIÓN DE
ETRINGITA RETARDADA (DEF) EN EL HORMIGÓN

En la siguiente memoria se estudió la eficiencia de una ceniza volante como inhibidora del fenómeno de etringita retardada (DEF), este fenómeno expansivo ha sido uno de los grandes problemas de las estructuras de hormigón de grandes dimensiones y/o altos calores de hidratación, provocando agrietamientos, disminuyendo su resistencia y durabilidad. Este fenómeno se presenta entre 2 a 20 años después de la confección del hormigón y se sabe que uno de los principales factores que influyen en el origen del fenómeno son las altas temperaturas, ya que la etringita (producto normal de la hidratación del hormigón, dispersa homogéneamente en la matriz de hormigón), se vuelve inestable al sobre pasar los 70°C las primeras horas desde su confección, transformándose en un mono sulfato de menor volumen y mayor estabilidad, el cual una vez que el hormigón se encuentra endurecido y en servicio, bajo condiciones húmedas o parcialmente húmedas se transforma nuevamente en etringita, generando esfuerzos internos y probablemente agrietamientos en el hormigón.

En el presente trabajo se estudiara el efecto de una ceniza volante como remplazante de cemento portland en diferentes dosificaciones, manteniendo el contenido de SO_3 en un rango normal entre 2,8-3,5%, para esto se confeccionaran una serie de probetas las cuales serán sometidas a curados a temperatura y ciclos de humedecimiento y secado, con el fin de homologar las condiciones óptimas para que se produzca el fenómeno DEF y acelerar las expansiones que este conlleva, se utilizó esta metodología ya que se cuenta con un estudio anterior en el cual se realizaron los mismos ensayos, pero en ese caso se estudió el desempeño de una puzolana natural.

Luego de un periodo de 120 días de medición de expansiones se concluyó que hormigones con una dosificación de 70% de cemento Portland y 30% de ceniza volante o puzolana es suficiente para controlar e inhibir el fenómeno DEF.

Dedicatoria

Para mi familia.

Agradecimientos

En primer lugar a mis padres, Felipe y Mireya, que me han brindado apoyo incondicional, valores, amor y las herramientas para haber logrado mis objetivos hasta ahora.

Claudia y Paula, mis hermanas que tanto amo, que siempre han estado presente.

A mis amigos Iván, Sven, Lu, Toño, Chico Mark, Nacho, Andrés y Rey, por los momentos vividos en este periodo y todas esas anécdotas, que sin duda irán aumentando a futuro.

A Camila Grebe que me ha brindado su amor y apoyo en todo este proceso.

A mis amigos del colegio, parte fundamental de mi vida.

A mis amigos de especialidad Jorge R, Jaime Y, Cruz, entre tantos, por los gratos momentos y los tiempos de estudio, en especial a Francisco Tapia por su gran ayuda en esta memoria.

A mi profesor guía Federico Delfín, por su apoyo y buena disposición en todo momento.

Al Departamento de Ingeniería Civil, sus laboratoristas de sólidos, estructuras y medios particulados, por financiar equipos y facilitarme sus instalaciones.

En general a toda persona que de una y otra forma me ha ayudado en todo este proceso.

Tabla de Contenido

Introducción.....	1
1. Objetivo.	3
CAPITULO I: ANTECEDENTES.....	4
1.0 Hormigones Masivos	5
1.1 Generación de calor	6
2.0 Estudios Análogos.	7
2.1 Método Duggan (THE DUGGAN TEST).	8
2.2 LPC Method N°66 (Méthode d’essai des LPC N°66: Réactivité d’un béton vis-à-vis d’une réaction sulfatique interne).....	9
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	12
1.0 Formación de Etringita	12
1.1 Tipos de Etringita.	12
1.2 Proceso Químico del fenómeno DEF.....	14
1.3 Características del fenómeno DEF.....	15
1.3.1 Expansión asociada del fenómeno DEF.....	15
CAPITULO III: CENIZA VOLANTE.....	17
1. Clasificación.	18
1.1 Cenizas Clase C.....	18
1.2 Cenizas Clase F.....	18
2. Composición Química y Mineralógica De las Cenizas Volantes.	18
3. Aspectos físicos de las cenizas volantes.....	19
4. Cementos con adición de ceniza volante.	20
4.1.1 Hidratación de hormigones con adición de ceniza volante.	20
5. Beneficios	21
CAPITULO IV: ESTUDIO EXPERIMENTAL	22
1.0 Introducción.	22

2.0	Materiales.....	22
3.0	Moldes.	29
3.1	Barra Larga.....	30
3.2	Barra Corta.....	32
3.3	Topes.....	33
3.4	Barra de Hilo.....	33
3.5	Base.....	33
3.6	Sujetadores.....	33
4.0	Antecedentes del Ensayo.	34
4.1	Dosificación.	34
5.0	Método de Ensayo.....	36
5.1	Mezcla.....	36
5.2	Confección de Pastelones.....	36
5.3	Curado Inicial.....	38
5.4	Curado Acelerado (C.A) o Tratamiento N° 1.	38
5.5	Aserrado de los Pastelones.....	39
5.6	Medición Inicial de las Probetas.....	40
4.7	Ciclos de Humedecimiento y Secado (C.H.S) o Tratamiento N°2.	40
5.8	Metodología de Mediciones.....	41
5.9	Resumen Tratamientos.....	42
6.0	Criterios del Estudio.....	43
CAPITULO IV: RESULTADOS.....		44
1.0	Propiedades del Hormigón.....	44
1.1	Material Cementicio.	45
1.1.1	Fases minerales de la mezcla.....	47
2.0	Resistencia a la Compresión del Hormigón.....	48

3.0	Medición de Expansiones	50
3.0.1	Expansiones Dosificación N°1	50
3.0.2	Expansiones Dosificación N°2	51
3.0.3	Expansiones Dosificación N°3	52
3.0.4	Expansiones Dosificación N°4	53
3.0.5	Expansiones Dosificación N°5	54
3.0.6	Expansiones Dosificación N°6	55
3.0.7	Expansiones Dosificación N°7	56
3.0.8	Expansiones Dosificación N°8	57
3.0.9	Expansiones Dosificación N°9	58
3.0.10	Expansiones Dosificación N°10	59
3.1	Comparación de Expansiones	60
4.0	Microscopia de Barrido Electrónico SEM	60
1.0.1	Primera Muestra	61
1.0.2	Segunda Muestra	62
CAPITULO VI: ANALISIS DE RESULTADOS		64
1.0	Propiedades del Hormigón	64
2.0	Expansiones	67
2.0.1	Expansiones de P_0	67
2.0.2	Expansiones de P_1	67
2.0.3	Expansiones de P_2	67
2.0.4	Expansiones de P_3	68
2.0.5	Expansiones de P_4	68
2.0.6	Análisis de Expansiones para probetas con T12	68
2.0.7	Comparación de Expansiones para probetas sin Tratamientos y Sometidas a T_2	70
3.0.9	Microscopia de Barrido Electrónico SEM	71

CAPITULO VI: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	72
CAPITULO V: BIBLIOGRAFIA	75

Índice de Tablas

Tabla 1: Ciclos de Humedecimiento y Secado LPC Method N°66.....	10
Tabla 2: Límites de Composición Química Según Norma ASTM C618.....	19
Tabla 3: Requisito Físico Según Norma ASTM C618.....	20
Tabla 4: Propiedades físicas Cemento Melón Súper.....	23
Tabla 5: Propiedades Químicas Cemento Melón Súper.....	23
Tabla 6: Óxidos Principales del Cemento Portland Puro.....	24
Tabla 7: Curva Granulométrica de los Aridos.....	25
Tabla 8: Propiedades Físicas de la gravilla.....	26
Tabla 9: Propiedades Físicas de la Arena.....	26
Tabla 10: Composición Química de la Ceniza Volante Utilizada.....	27
Tabla 11: Características Físicas de la Ceniza Volante.....	28
Tabla 12: Superficie específica (Blaine) de la Ceniza Volante.....	28
Tabla 13: Superficie Específica (Blaine) del Yeso.....	28
Tabla 14: Propiedades físicas puzolana Pudahuel.....	29
Tabla 15: Composición química puzolana Pudahuel.....	29
Tabla 16: Actividad Puzolánica puzolana Pudahuel.....	29
Tabla 17: Dosificaciones.....	34
Tabla 18: Resumen Materiales de las Dosificaciones.....	35
Tabla 19: Notación Porcentaje de Ceniza Volante.....	35
Tabla 20: Notación Porcentaje de SO ₃	35
Tabla 21: Notación Porcentaje de Puzolana Estudio Anterior.....	35
Tabla 22: Resumen Tratamientos.....	42
Tabla 23: Número de Probetas por Tratamiento.....	43
Tabla 24: Porcentaje de Material por Dosificación con ceniza volante.....	45
Tabla 25: Porcentaje de Material por Dosificación con puzolana.....	45
Tabla 26: Resumen Superficie Específica de Materiales.....	45
Tabla 27: Superficie Específica por Dosificación.....	45
Tabla 28: Resumen Composición Química Según Dosificación ceniza volante.....	46
Tabla 29: Resumen Composición Química Según Dosificación para estudio análogo realizado por Francisco Tapia.....	47
Tabla 30: Fases Minerales para dosificación 1 y 2.....	48
Tabla 31: Resistencia a Compresión a 7, 28 y 56 días probetas con ceniza volante.....	49

Tabla 32: Resistencia a Compresión a 7, 28 y 56 días probetas con puzolana	49
Tabla 33: Expansiones para P_0Y_1	50
Tabla 34: Expansiones de P_0Y_2	51
Tabla 35: Expansiones de P_1Y_1	52
Tabla 36: Expansiones de P_1Y_2	53
Tabla 37: Expansiones de P_2Y_1	54
Tabla 38: Expansiones de P_2Y_2	55
Tabla 39: Expansiones de P_3Y_1	56
Tabla 40: Expansiones para P_3Y_2	57
Tabla 41: Expansiones de P_4Y_1	58
Tabla 42: Expansiones para P_4Y_2	59
Tabla 43: Composición de la primera muestra	62
Tabla 44: Composición Química de la Segunda Muestra	63
Tabla 45: Resistencia Cúbica a Compresión a 7, 28 y 56 días	66
Tabla 46: Expansiones a 120 días para todas las dosificaciones con tratamiento T_{12} y la diferencia entre ellas [%]	70

Índice de Figuras

Figura 1-1: Muro de contención afectado por agrietamiento térmico [1]	4
Figura 1-2: Hormigón Masivo (Idiem uchile.cl, 2015) [2].....	6
Figura 1-3: Evolución de temperatura en hormigón masivo con diferentes tipos de cemento (colocado a 23°C y contenido de cemento de 223 Kg/m ³). (ACI 207.2R-95) [3]	6
Figura 1-4: generación de calor según finura de Wagner del cemento (ASTM C 115), para pasta de cemento curada a 24°C (ACI 207.2R-95) [4].....	7
Figura 1-5: Evolución de temperatura para un cemento tipo II, para distintas dosificaciones y porcentaje de adición. (ACI 224) [5].....	7
Figura 1-6 Ciclos Humedecimiento y Secado de Ensayo Duggan, Grabowski et al . (1992) [6] ...	8
Figura 1-7: Curado a Temperatura del método Rapid Test of Concrete Expansivity Due to Internal Sulfate Attack [7]	9
Figura 1-8: Probetas Utilizadas por LPC Method N°66 (LCPC, 2009) [8]	10
Figura 1-9: Curado a Temperatura utilizado por LPC Method N°66 (LCPC, 2009 [9].....	10
Figura 1-10: Ciclos de Humedecimiento y Secado utilizado por LPC Method N°66 (LCPC, 2009) [10]	11
Figura 2-1: Estructura de hormigón dañada por efecto de la formación de etringita tardía DEF. (ndtoolbox.org) [11]	14
Figura 2-2: Esquema de posibles ataques internos de sulfatos en el hormigón. [12].....	14
Figura 2-3: expansión uniforme de la pasta, generando discontinuidades entre las partículas y la pasta de cemento. (Nanayakkara, 2011)[13]	15
Figura 2-4: Mecanismo de expansión por DEF. (Taylor et al.)[14]	16
Figura 3-1: Vista al microscopio electrónico de la ceniza volante de apariencia cristalina. (unizar.es, 2015)[15].....	17
Figura 3-2: Muestra de ceniza volante. (expertsystemsolutions.com, 2014)[16].....	17
Figura 3-3: Esquema obtención de cenizas volantes. (josevicente.com, 2015)[17].....	18
Figura 4-1: Grafico Granulometría de los Áridos. [18].....	25
Figura 4-2 Prototipo Moldes [19].....	30
Figura 4-3: Moldes [20].....	30
Figura 4-4: Ilustración Barra Larga. [21]	31
Figura 4-5: Ilustración 2 Barra Larga. [22]	31
Figura 4-6: Ilustración Barra Corta. [23].....	32
Figura 4-7: Ilustración 2 Barra Corta. [24].....	32

Figura 4-8: Ilustración Topes. [25].....	33
Figura 4-9: Ilustración Barra de Hilo. [26].....	33
Figura 4-10: Ilustración de Distancia Libre en la Probeta. [27]	36
Figura 4-11: Pastelones y Cubos Vibrados. [28].....	37
Figura 4-12: Cono de abrams [29].....	37
Figura 4-13: Pastelón sellado y Hornos Utilizados. [30]	38
Figura 4-14: Gráfico Curado a Temperatura. [31]	39
Figura 4-15: Desmolde de Pastelones [32].....	39
Figura 4-16: Pastelones antes de aserrar. [33]	39
Figura 4-17: Aserrado de Pastelones. [34]	40
Figura 4-18: Grafico Ciclo de Humedecimiento y Secado. [35].....	41
Figura 4-19: Medición de Probetas. [36].....	42
Figura 5-1: Grafico Densidad del Hormigón Fresco. [37]	44
Figura 5-2: Grafico Asentamiento de Cono. [38].....	44
Figura 5-3: Grafico Resistencia a Compresión a 7,28 y 56 días probetas con ceniza volante. [39]	48
Figura 5-4: Resistencia a compresión probetas con puzolana [40]	49
Figura 5-5: Grafico de Expansiones para P_0Y_1 . [41].....	50
Figura 5-6: Grafico de Expansiones para P_0Y_2 [42].....	51
Figura 5-7: Grafico de Expansiones para P_1Y_1 [43].....	52
Figura 5-8: Grafico de Expansiones para P_1Y_2 [44].....	53
Figura 5-9: Grafico de expansiones de P_2Y_1 . [45].....	54
Figura 5-10: Grafico de expansiones para P_2Y_2 [46]	55
Figura 5-11: Grafico de Expansiones para P_3Y_1 [47]	56
Figura 5-12: Grafico de Expansiones para P_3Y_2 [48]	57
Figura 5-13: Grafico de expansiones de P_4Y_1 . [49].....	58
Figura 5-14: Grafico de expansiones para P_4Y_2 [50].....	59
Figura 5-15: Grafico de Expansiones para Probetas con Tratamiento T_{12} [51]	60
Figura 5-16: Imagen Microscópica de Barrido SEM a Primera Muestra P_0Y_2 , con tratamiento T_{12} . [52]	61
Figura 5-17: Espectroscopia de la primera muestra. [53].....	61

Figura 5-18: Imagen Microscópica de Barrido SEM a Segunda Muestra P_0Y_2 , con tratamiento T_{12} [54]	62
Figura 5-19: Espectroscopia de la Segunda Muestra [55]	62
Figura 6-1: Grafico de Densidad del Hormigón Fresco. [56].....	64
Figura 6-2: Grafico de Asentamiento de Cono[57]	65
Figura 6-3: Grafico de Resistencia Cúbica a Compresión a 7,28 y 56 días. [58]	66
Figura 6-4: Expansiones para todas las dosificaciones con tratamiento T_{12} . [59].....	69
Figura 6-5: Grafico de Expansiones a 120 días para todas las dosificaciones con tratamiento T_{12} . [60]	69
Figura 6-6: Grafico de Expansiones Probetas P_0 , sin tratamiento y con T_2 . [61]	70

Introducción

En los últimos años se han realizado diferentes estudios con el fin de mejorar las propiedades mecánicas, la trabajabilidad, la durabilidad y la sustentabilidad del hormigón, además de incursionar en diferentes materiales, componentes y adiciones del hormigón con el objeto de utilizar distintos recursos que replacen materiales escasos, contaminantes o no convenientes en el uso del mismo. Además el aumento en las exigencias, la optimización y reducción en los tiempos de construcción han obligado a utilizar hormigones de alta resistencia con grandes cantidades de material cementicio, los que se caracterizan por sus rápidas reacciones y altos calores de hidratación, lo cual ocasiona problemas en el hormigón, ya que al ser un mal conductor térmico, no es capaz de transferir calor a la superficie de la estructura, aumentando el gradiente térmico entre el núcleo y el exterior, sobrepasando los 20°C recomendados, esto provoca cambios volumétricos dentro del hormigón generando esfuerzos internos y probablemente fisuras, al mismo tiempo de superar los 70°C en el hormigón las primeras horas desde su confección, lo cual contribuiría en la formación de etringita tardía (DEF) y posibles fisuraciones.

El fenómeno expansivo producido por la formación de etringita retardada (DEF) ha sido uno de los temas a investigar, ya que es un problema importante en términos de durabilidad que pueden presentar las estructuras de hormigón, este fenómeno se produce en un periodo de tiempo que va de los 2 años hasta los 20 años después del vaciado del hormigón, ocasionando fisuras en el hormigón¹.

Se sabe que los principales componentes del cemento son cuatro, Silicato dicálcico, Silicato tricálcico, Alumínico tricálcico, FerroAluminato tetracálcico². El fenómeno “DEF” comienza con la formación de etringita, esta es el producto de dos reacciones: La primera cuando el aluminato tricálcico (C_3A) que reacciona con agua en presencia de yeso ; La segunda cuando el

¹ Nanayakkara, S. M. A. (2011, September). Importance of controlling temperature rise due to heat of hydration in massive concrete elements. In Proceedings of the IESL-SSMS Joint International Symposium on Social Management Systems.

² WOLFGANG, C. (1963). La Química del cemento. *Ed. Palestra, Barcelona*.

FerroAluminato tetracálcico (C_4AF) reacciona con yeso y agua³, este proceso ocurre en las primeras horas del hormigón, además este efecto no es solo exotérmico sino que también expansivo, aunque este último efecto no produce daño debido a que el hormigón no ha adquirido aún resistencia mecánica suficiente. Uno de los principales efectos para la formación del fenómeno DEF, comienza cuando la temperatura del hormigón en el núcleo del elemento, sobrepasa los 70°C, niveles a los que la etringita se vuelve inestable, liberando iones de sulfato y pasa a un estado más estable, convirtiéndose en un monosulfato⁴. Finalmente, una vez terminada la etapa de endurecimiento y fraguado del hormigón, el monosulfato en condiciones húmedas y parcialmente húmedas reacciona nuevamente con iones libres transformándose en etringita, debido a que la etringita es un cristal de mayor volumen que el monosulfato se crea una presión dentro del hormigón que al exceder la resistencia a tracción de éste, genera la fisuración característica⁵.

Este fenómeno afecta principalmente en la durabilidad del hormigón, lo que se traduce en reparaciones o reemplazo del hormigón, por lo tanto mayores costos y contaminación.

Debido a lo anterior se buscan diferentes métodos para inhibir la aparición de este fenómeno, específicamente en el caso de construcción de hormigón masivo donde se dan las condiciones para su activación, anteriormente ya se han realizado ensayos como el método Duggan⁶ o el ensayo LPC N°66 que buscan homologar las condiciones necesarias para que se produzca el fenómeno DEF, además de acelerar el proceso, estos ensayos serán explicados con mayor detalle más adelante.

La presente investigación se propone estudiar mediante un ensayo acelerado (método Duggan y ensayo LPC N°66), la efectividad de las adiciones puzolánicas, en particular de una ceniza volante proveniente de la central termoeléctrica Ventanas, como agente inhibidor del fenómeno DEF al ser incorporado como parte del material cementicio del hormigón, los resultados de este

³ Diamond, S. (1986). The microstructure of cement paste in concrete. *VII International Cong. Chem. Cem, 1*, 113-121.

⁴ Montecinos Cuadros, H. A. (2012). Hormigones masivos: influencia inhibidora de las adiciones incorporadas al cemento Portland sobre el fenómeno expansivo DEF.

⁵ Nanayakkara, S. M. A. (2011, September). *Importance of controlling temperature rise due to heat of hydration in massive concrete elements. In Proceedings of the IESL-SSMS Joint International Symposium on Social Management Systems.*

⁶ Grabowski, E., Czarnecki, B., Gillott, J. E., Duggan, C. R., & Scott, J. F. (1992). Rapid test of concrete expansivity due to internal sulfate attack. *ACI Materials Journal*, 89(5).

estudio se compararán con los estudios de una investigación anterior, donde se evaluó el desempeño de una puzolana natural bajo las mismas condiciones de ensayo.

1. Objetivo.

El objetivo principal de esta memoria es verificar la eficiencia y encontrar el porcentaje de adición óptimo de ceniza volante en el hormigón con el fin de inhibir el desarrollo del fenómeno DEF.

Verificar si el ensayo análogo al método Duggan y LPC N°66 cumple con los objetivos y disposiciones para acelerar el proceso del fenómeno DEF con resultados concluyentes.

CAPITULO I: ANTECEDENTES

El problema a estudiar se produce en el hormigón cuando se somete a temperaturas mayores a los 70°C durante las primeras horas desde que se confecciona, la etringita, uno de los productos normales de hidratación del hormigón se vuelve inestable, por lo que libera iones de sulfato para transformarse en un monosulfato de mayor estabilidad y menor volumen que la etringita. Posteriormente, cuando el hormigón ya se encuentra endurecido y en servicio, el monosulfato vuelve a transformarse en etringita, bajo condiciones húmedas o parcialmente húmedas, debido a que la etringita requiere de un espacio mayor que el monosulfato crea esfuerzos internos en el hormigón, produciendo agrietamientos. Este proceso es conocido como formación de etringita tardía o fenómeno DEF⁷. Generalmente estas condiciones se dan en: hormigones masivos, los cuales producto de la baja conductividad térmica no son capaces de liberar el calor; Hormigones prefabricados, sometidos a curados acelerados. En estos casos se alcanzan altas temperaturas al interior del hormigón, por lo que la construcción resulta vulnerable a este tipo de ataque (fenómeno DEF).

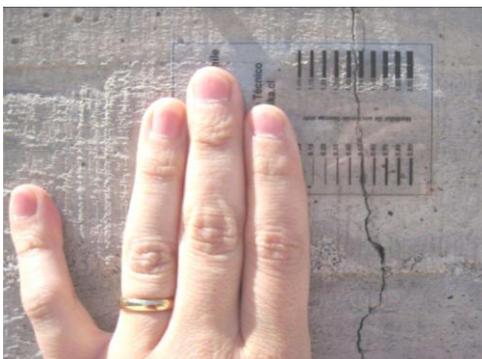


Figura 1-1: Muro de contención afectado por agrietamiento térmico [1]

Con el fin de reducir la temperatura cada vez es más común el uso de materiales suplementarios como los humos de sílice, escorias granuladas de alto horno, puzolanas naturales, cenizas volantes entre otros. Estos actúan como micro-relleno aumentando la densidad de la pasta de cemento, formando una micro estructura más densa y homogénea en la transición pasta-

⁷ Nanayakkara, S. M. A. (2011, September). Importance of controlling temperature rise due to heat of hydration in massive concrete elements. In *Proceedings of the IESL-SSMS Joint International Symposium on Social Management Systems*.

agregado⁸, Además sustituyendo cemento por adiciones se logra disminuir la cantidad de aluminato tricálcico, componente principal para la formación de etringita.

Estas últimas formas de mitigar el problema son las que han dado origen a este estudio, específicamente utilizando cenizas volantes como reemplazante del cemento en una serie de probetas de hormigón, las cuales se les harán distintos tratamientos, con el fin de homologar las condiciones para que se produzca el fenómeno DEF y acelerarlo, los cuales se explicaran con mayor detalle capítulo II.

1.0 Hormigones Masivos

El hormigón masivo es definido por la norma americana ACI 207.1R “Mass Concrete” como “Cualquier volumen de hormigón donde una combinación de las dimensiones de los elementos que están siendo hormigonados, las condiciones de borde, las características de la mezcla de concreto, y las condiciones ambientales puedan dar lugar a tensiones térmicas indeseables, agrietamiento, reacciones químicas perjudiciales, o a la reducción en la resistencia a largo plazo como el resultado de las altas temperaturas del hormigón debido al calor de hidratación.”, en cuanto a dimensión la norma americana ACI 211.1R-91 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete” define un hormigón masivo cuando la dimensión mínima de las sección transversal de un elemento solido se aproxima o excede de 60 a 90 cm o cuando el contenido de cemento exceda de 355 [Kg/m³].

Actualmente no existe una norma en Chile dedicada exclusivamente a hormigones masivos, una de las normas chilenas que se refiere a estos hormigones es la NCh 170 of.85 “Hormigón – Requisitos Generales” la cual define un hormigón masivo como “ Elementos cuya menor dimensión exceda de 0,80 m”, con respecto a la temperatura de colocación del hormigón define “Para el hormigonado de elementos corrientes se recomienda que la temperatura del hormigón en el momento de colocación no exceda de 30°C, mientras que para hormigonado de elementos masivos se recomienda que la temperatura del hormigón en el momento de colocación no exceda de 16°C.”.

⁸ Trochez, J., Torres, J., & de Gutiérrez, R. M. (2010). Estudio de la hidratación de pastas de cemento adicionadas con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) de una refinería colombiana. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, (55), 26-34.



Figura 1-2: Hormigón Masivo (Idiem uchile.cl, 2015) [2]

1.1 Generación de calor

Uno de los factores que afecta la generación de calor es el tipo de cemento utilizado, hay diferentes tipos de cementos Portland para diferentes requerimientos físicos y químicos, según la norma ASTM C 150, Cemento Portland Tipo I, II, III IV, V.

En la Figura 1-3 se observa cómo cambia la generación de calor según tipo de cemento.

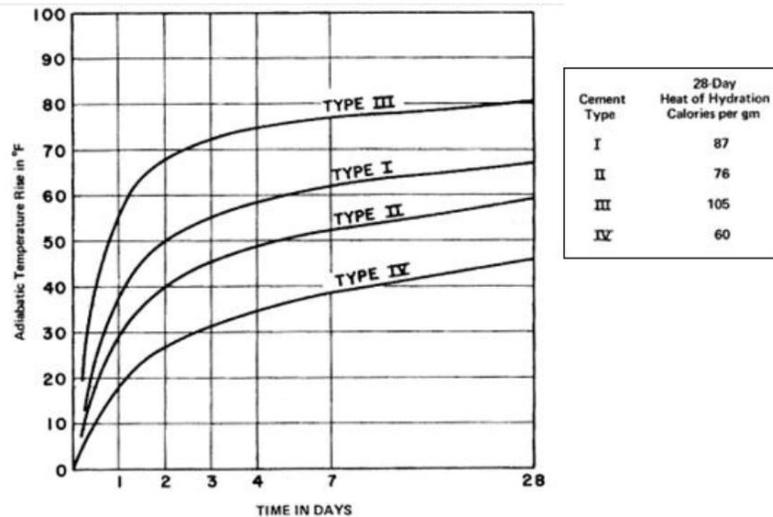


Figura 1-3: Evolución de temperatura en hormigón masivo con diferentes tipos de cemento (colocado a 23°C y contenido de cemento de 223 Kg/m³). (ACI 207.2R-95) [3]

La finura afecta directamente en la generación de calor del cemento, la superficie específica determina la velocidad con que se desarrollan las reacciones de hidratación, por lo que a mayor finura habrá una liberación de calor a una mayor velocidad, como se puede apreciar en la Figura 1-4.

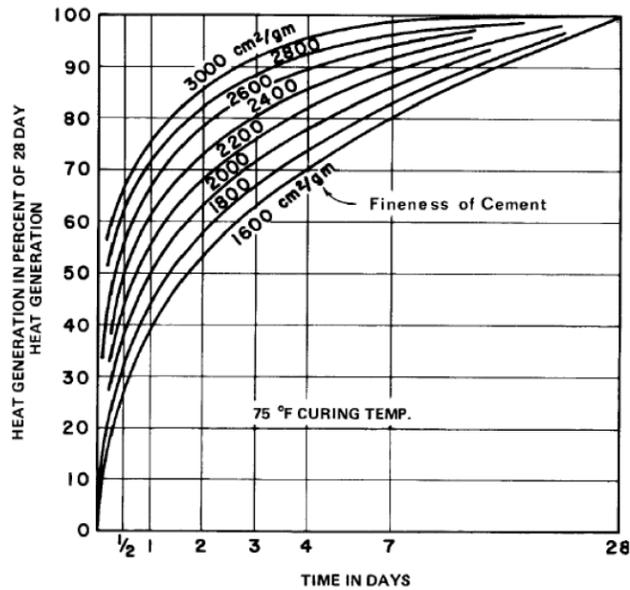


Figura 1-4: generación de calor según finura de Wagner del cemento (ASTM C 115), para pasta de cemento curada a 24°C (ACI 207.2R-95) [4]

La cantidad de cemento se relaciona directamente con la generación de calor, ya que el Aluminato Tricálcico (C₃A) y el Silicato Tricálcico (C₃S) compuestos del cemento, tienen la mayor responsabilidad en el desarrollo de calor, como se puede apreciar en la Figura 1-5.

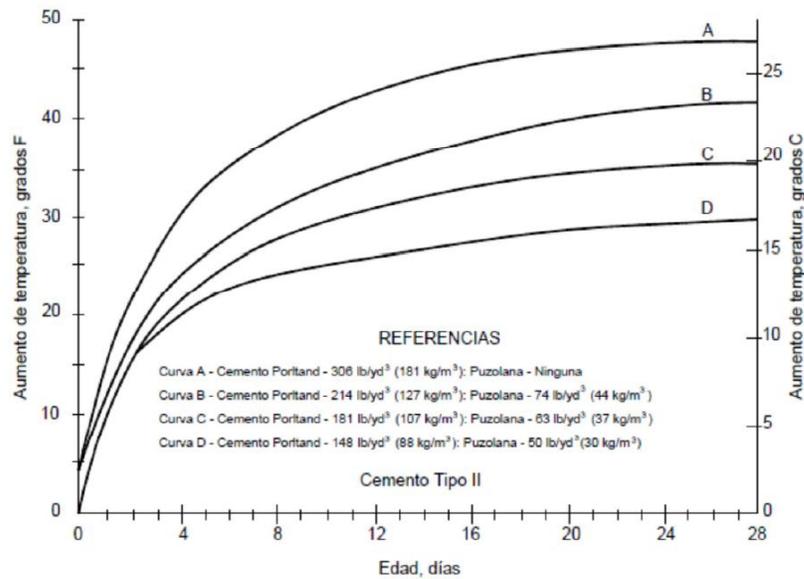


Figura 1-5: Evolución de temperatura para un cemento tipo II, para distintas dosificaciones y porcentaje de adición. (ACI 224) [5]

2.0 Estudios Análogos.

El estudio realizado en este trabajo se basó principalmente en el Ensayo Duggan y LPC Method N°66, los cuales se explicarán a continuación. Además en este estudio se busca comparar los resultados realizados por un estudio anterior, donde se evaluó análogamente el desempeño de una

puzolana natural proveniente del yacimiento de la empresa Melón en Pudahuel⁹. Por lo que en este trabajo se utilizó mismo porcentaje de incorporación de ceniza volante en el cemento e igualmente con el yeso, además de realizar mismos tratamientos y metodología que en el estudio anterior, con el fin de poder comparar ambos resultados.

2.1 Método Duggan (THE DUGGAN TEST)¹⁰.

El Metodo Duggan Consiste en confeccionar probetas de hormigón o morteros de cemento, los cuales se les medirá el cambio longitudinal de una muestra extraída de sus núcleos de 22[mm] de diámetro y 55 ± 5 [mm] de longitud, por lo que una vez que se han extraído los núcleos, se llevarán a un curado por 3 días, luego se le realizarán 3 ciclos de humedecimiento secado, todo esto en un periodo de 7 días, tal como se muestra en la Figura 1-6.

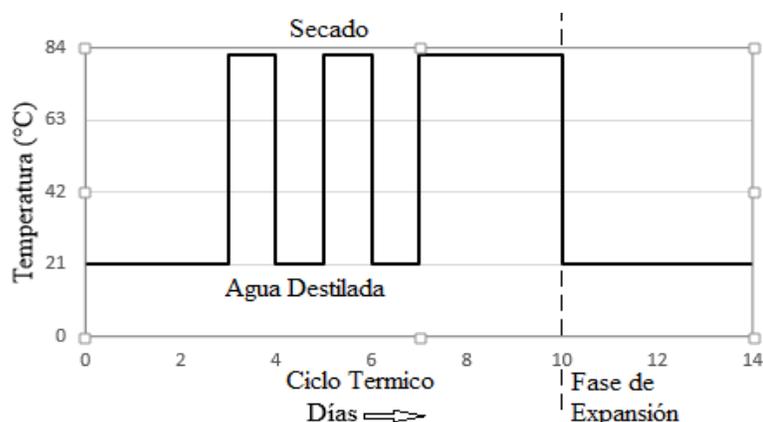


Figura 1-6 Ciclos Humedecimiento y Secado de Ensayo Duggan, Grabowski et al. (1992) [6]

Luego los núcleos serán colocados en agua destilada y se medirá su cambio longitudinal durante 20 días, este ensayo indica que los núcleos con una expansión mayor o igual a 0,05% de su tamaño inicial en ese periodo, serán más propensos a deterioro por expansiones producto de la formación de etringita tardía.

2.1.1 Rapid Test of Concrete Expansivity Due to Internal Sulfate Attack

Este ensayo experimental realizado por E. Grabowski et. al.¹¹ Donde utilizan el Método Duggan, consiste en preparar diferentes probetas de hormigón o morteros de cemento de 3x3x14 [in] (7,61x7,62x35,56 [cm]), las cuales una vez confeccionado el hormigón y colocado en sus

⁹ F. Tapia. (2015). Vulnerabilidad de los hormigones masivos frente al fenómeno expansivo por formación de etringita tardía, en función del contenido de puzolana en cementos nacionales

¹⁰ . E. Grabowski et al. (1992), Rapid Test of Concrete Expansivity Due to Internal Sulfate Attack, Materials Journal

¹¹ Grabowski, E., Czarnecki, B., Gillott, J. E., Duggan, C. R., & Scott, J. F. (1992). Rapid test of concrete expansivity due to internal sulfate attack. ACI Materials Journal, 89(5).

respectivos moldes, se les realiza un precurado de 2 horas a temperatura ambiente, luego se lleva un curado acelerado en un horno, el cual consiste en aumentar la temperatura gradualmente hasta llegar a 85°C en dos horas, se dejan las probetas durante 4 horas a 85°C , para finalmente dejarlas enfriar en un cuarto a temperatura ambiente ($20 \pm 3^\circ\text{C}$), Finalizado este proceso, se les realiza el Método Duggan, como se puede ver en la figura 1-7.

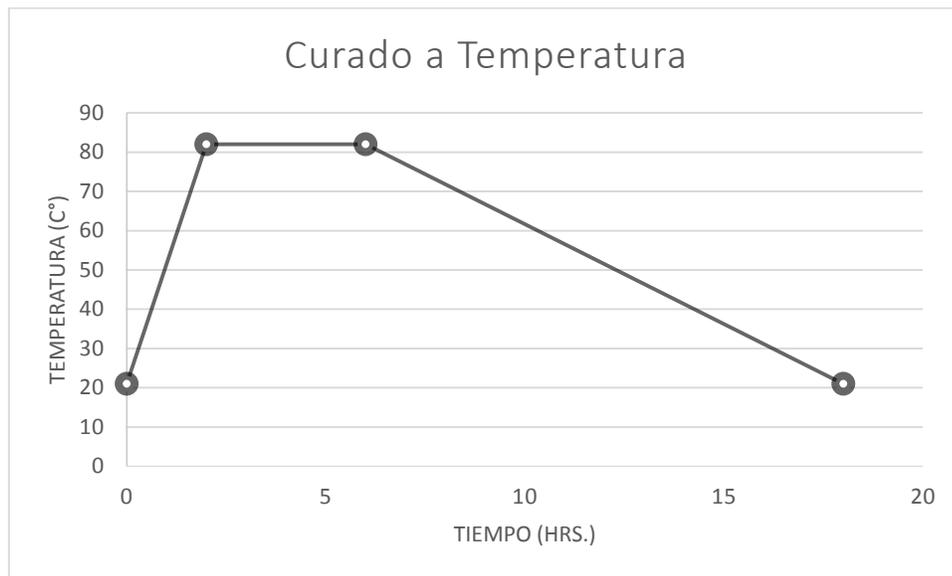


Figura 1-7: Curado a Temperatura del método Rapid Test of Concrete Expansivity Due to Internal Sulfate Attack [7]

2.2 LPC Method N°66 (Méthode d'essai des LPC N°66: Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne) ¹².

Este ensayo consta en realizar diferentes hormigones los cuales ya habían sido estudiados y se conocía el comportamiento de estos in situ, por lo que se sabía la aparición de etringita tardía, además el ensayo fue realizado por diferentes laboratorios llegando a los mismos resultados, por lo cual es un ensayo confiable para la determinación de susceptibilidad de hormigones al fenómeno DEF.

El ensayo consiste en la realización de probetas en moldes de 7x7x28 [cm] o probetas cilíndricas de 11 [cm] de diámetro y 22 [cm] de largo.

12 LCPC. (2007). LPC Test Method n°66 : Reactivity of a concrete mix design with respect to the delayed ettringite formation - Performance testing.

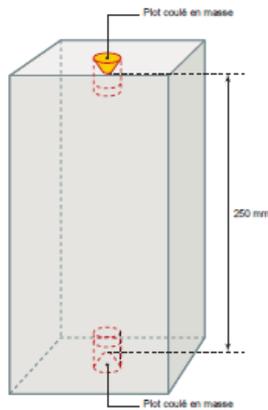


Figura 1-8: Probetas Utilizadas por LPC Method N°66 (LCPC, 2009) [8]

Una vez confeccionado el hormigón, el método trata de homologar las condiciones en el hormigón para que se produzca y potencie el fenómeno DEF, para esto el ensayo consiste en dejar las probetas en una cámara húmeda cercana a la saturación y a temperatura.

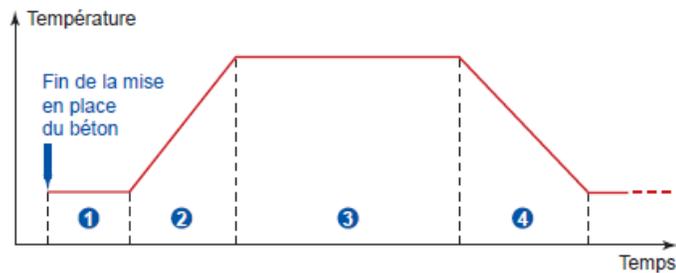


Figura 1-9: Curado a Temperatura utilizado por LPC Method N°66 (LCPC, 2009) [9]

Luego se le realizarán ciclos de humedecimiento y secado como se muestra a continuación:

Tabla 1: Ciclos de Humedecimiento y Secado LPC Method N°66

7 días de secado a 38°C y humedad relativa menor a 30%
7 días bajo agua a 20±2°C
7 días de secado a 38°C y humedad relativa menor a 30%
7 días bajo agua a 20±2°C

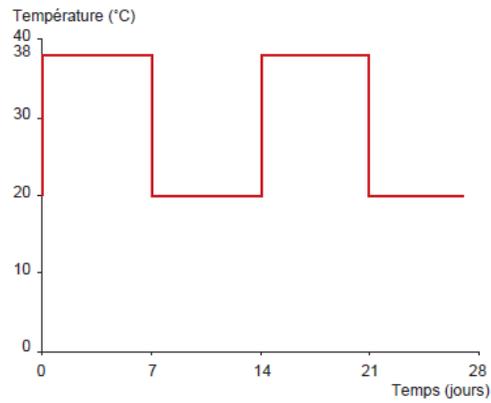


Figura 1-10: Ciclos de Humedecimiento y Secado utilizado por LPC Method N°66 (LCPC, 2009) [10]

Finalmente se llevan las probetas bajo agua donde se le realizan medidas longitudinales.

Este método recomienda realizar una microscopia de barrido electrónico para confirmar la causa de la expansión por DEF o determinar otra causa.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

1.0 Formación de Etringita

La etringita es un sulfo-aluminato cálcico hidratado, producto normal de la hidratación del cemento portland, específicamente de las reacciones entre los aluminatos, los ferritos cálcicos anhidros (presentes en el clinker) y los sulfatos (generalmente yeso), en condiciones normales de curado y uso, la etringita (etringita primaria) forma parte de la pasta de cemento y no produce daños producto de su carácter cristalino expansivo, ni afecta en la durabilidad del hormigón, la etringita (secundaria) crece y se redeposita en poros, fisuras o cualquier espacio disponible en la pasta de cemento, la cual se ve favorecida por la alta humedad, que facilita la disolución, transporte y recristalización de etringita en la pasta de cemento, como se mencionó este tipo de recristalización no genera daños producto de su expansión, ya que el hormigón aún no se encuentra endurecido.

Alguna de las condiciones necesarias para que se forme la etringita son la velocidad de hidratación, velocidad de cristalización, altos contenidos de sulfatos en el cemento Portland, entre otras, por lo cual es difícil precisar las condiciones exactas que se deben tener para la formación de etringita, ya que son múltiples factores y condiciones que interactúan conjuntamente e influyen¹³.

Los principales componentes necesarios para que se produzca esta reacción son el monosulfato, C-S-H y la solución acuosa al interior del poro.

1.1 Tipos de Etringita.

Se conocen 3 tipos diferentes de etringita, la etringita primaria, etringita secundaria y la etringita retardada.

1.1.1 Etringita primara:

Es un producto de la reacción que ocurre por causa de sulfatos internos y es normal en cualquier cemento Portland, incluso en hormigones resistentes a sulfatos y hormigones fabricados con cemento siderúrgico, La etringita primaria se encuentra distribuida en forma homogénea y estable

¹³ Skalny, J., Johansen, V., Thaulow, N., & Palomo, A. (1996). DEF: As a form of sulfate attack. *Materiales de construcción*, 46(244), 5-29.

en la pasta de cementó, esta no genera daños producto de sus expansiones, ya que estas se generan cuando la pasta de cemento aún no ha endurecido.

1.1.2 Etringita Secundaria:

Se produce en un plazo mucho mayor que la etringita primaria, cuando el hormigón ya está endurecido y en condiciones húmedas, esta consiste en la disolución de etringita primaria y consecutivamente una recristalización, la formación de este tipo de etringita que genera expansión en el hormigón, esto producto de ataque de sulfatos internos.

1.1.3 Etringita Retardada (DEF):

Se puede definir como el fenómeno de formación de etringita en un hormigón endurecido y en uso, en condiciones húmedas o parcialmente húmedas, en el cual ninguno de los reactantes que intervienen proviene del exterior. Este fenómeno generalmente ocurre cuando la pasta ha sobrepasado los 70°C, en la etapa inicial de la hidratación del cemento, ya que a estas temperaturas la etringita se encuentra en un estado inestable debido a que posee una energía superficial mayor que el monosulfato, por lo cual libera iones de sulfato y se transforma en un monosulfato, más estable, con menor energía superficial y de menor volumen y/o en cementos con excesivos porcentajes de SO₃, específicamente cuando se libera lentamente el SO₃ en las fases de la anhidrita y silicato, por ejemplo se necesitaría 9,5% de yeso (equivalente a 4,4% de SO₃) para transformar un 5% de C₃A de un cemento completamente en etringita, es por eso que generalmente se restringe el porcentaje de SO₃ a 2-3%¹⁴.

La formación de este tipo de etringita sí genera expansión en el hormigón, que puede dar origen a agrietamientos como se muestra en el pavimento, Figura 2-1. En la figura 2-2, se describe los diferentes tipos de ataque por sulfato en el hormigón y los diversos agente incorporadores de sulfato al interior del hormigón.

¹⁴ Taylor, H. F. W., Famy, C., & Scrivener, K. L. (2001). Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 683-684.



Figura 2-1: Estructura de hormigón dañada por efecto de la formación de etringita tardía DEF. (ndtoolbox.org) [11]



Figura 2-2: Esquema de posibles ataques internos de sulfatos en el hormigón. [12]¹⁵

1.2 Proceso Químico del fenómeno DEF.

Se sabe que el aluminato tricálcico C_3A al reaccionar con agua que contiene SO_3 en solución, forma etringita, al igual el monosulfato de calcio C_4A_3F también reacciona con yeso y produce etringita que generar expansiones, además de ser reacciones exotérmicas, al igual que todas las reacciones de hidratación de los compuestos del cemento, por otra parte la etringita al sobrepasar los 60-70 °C se vuelve inestable, y se descompone por lo cual las dos posibles consecuencias de un tratamiento térmico son¹⁶:

¹⁵ Skalny, J., Johansen, V., Thaulow, N., & Palomo, A. (1996). DEF: As a form of sulfate attack. *Materiales de construcción*, 46(244), 5-29.

¹⁶ Janotka, I., Krajci, L., & Mojumdar, S. C. (2007). Performance of sulphotoaluminate-belite cement with high C~4A~3S contents. *CERAMICS SILIKATY*, 51(2), 74.

- D) La descomposición de la etringita formada a partir C_3A , C_4AF y los sulfatos disueltos a temprana edad de la hidratación.
- II) Producto de la temperatura, la inhibición de la formación de etringita durante la hidratación del cemento que no se forme la etringita.

En la estructura de hormigón, una vez en servicio, a temperatura ambiente y en condiciones húmedas, la etringita térmicamente descompuesta se recristaliza lentamente en el gel C-S-H provocando la expansión de la pasta, con la consiguiente fisuración en el hormigón y en el contorno de los áridos.¹⁷

1.3 Características del fenómeno DEF.

El fenómeno DEF se potencia cuando el hormigón presenta además algún tipo de problema, mayormente por la presencia de áridos reactivos que puede generar reacciones álcali-árido.

1.3.1 Expansión asociada del fenómeno DEF.

1.3.1.1 Teoría de la expansión uniforme de la pasta

La teoría indica que los monosulfatos dispersos que se encuentran formando parte del gel de tobermorita (C-S-H) al reaccionar con los iones de sulfatos libres, formarán etringita, esta reacción expansiva ocurre en forma uniforme e isotrópica en la pasta de cemento, generando discontinuidades entre la pasta de cemento y las partículas de árido agregado, los cuales son llenados por la etringita resultante de las reacciones de recristalización.

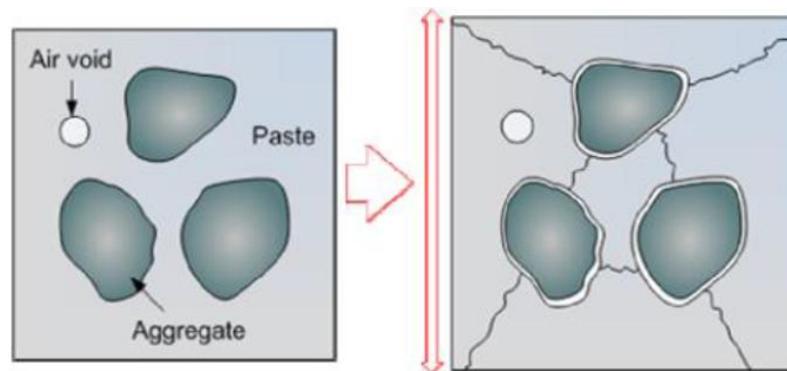


Figura 2-3: expansión uniforme de la pasta, generando discontinuidades entre las partículas y la pasta de cemento. (Nanayakkara, 2011)[13]

¹⁷ M.C. LEWIS And K.L. SCRIVENER(1995).: "Microchemical Effects of Elevated Temperature Curing and Delayed Etringite Formation", 1996, in preparation; see also: M.C. Lewis et al., "Heat Curing and Delayed Etringite Formation", MRS Symp. Proc.37067-76. .En: Skalny, J., Johansen, V., Thaulow, N., & Palomo, A. (1996). DEF: As a form of sulfate attack. *Materiales de construcción*, 46(244), 5-29.

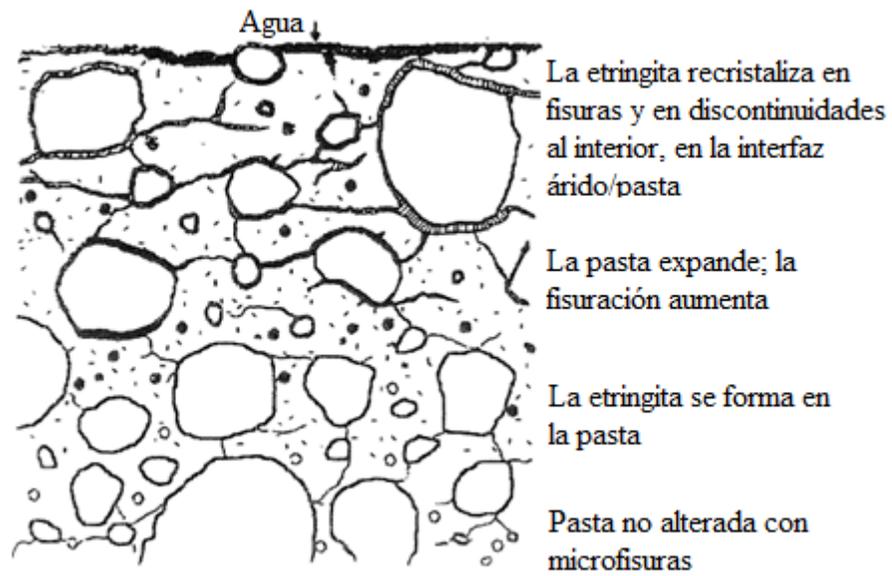


Figura 2-4: Mecanismo de expansión por DEF. (Taylor et al.)[14]

1.3.1.2 Teoría del crecimiento de cristales de etringita

Esta teoría indica que las expansiones son causadas por las presiones ejercidas debido al crecimiento de los cristales en las microfisuras entre la pasta de cemento y áridos.

CAPITULO III: CENIZA VOLANTE

Como se mencionó anteriormente una de las adiciones que se ha estudiado y puede servir como inhibidor del fenómeno DEF son las cenizas volantes, las cuales actualmente en Chile representan un material de desecho de centrales termo eléctricas. Las cenizas volantes se consideran como un tipo de puzolana artificial, producto de la quema de carbón utilizado en centrales termoeléctricas. En este proceso se desprenden residuos, los cuales quedan suspendidos en los humos de la combustión del carbón pulverizado en forma de partículas fundidas hasta que por efecto de enfriamiento brusco se solidifica transformándose en cenizas volantes vítreas, las partículas de mayor tamaño que no son capaces de quedar suspendidas caen en un cenicero formando cenizas de hogar o escoria.



Figura 3-1: Vista al microscopio electrónico de la ceniza volante de apariencia cristalina. (unizar.es, 2015)[15]

Figura 3-2: Muestra de ceniza volante. (expertsystemsolutions.com, 2014)[16]

La recogida de cenizas por precipitación se realiza por electrofiltros o precipitadores electrostáticos, estos permiten reducir un 99% de las emisiones de material particulado a la atmosfera. En la Figura 3-3, se puede apreciar un esquema de la obtención de cenizas volantes.

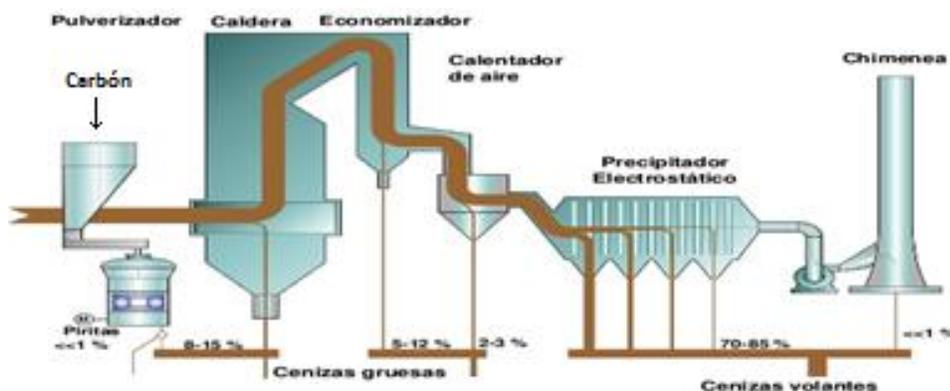


Figura 3-3: Esquema obtención de cenizas volantes. (josevicente.com, 2015)[17]

1. Clasificación.

Según la norma ASTM C618 las cenizas volantes se clasifican en:

1.1 Cenizas Clase C.

Son cenizas volantes con propiedades cementicias y puzolánicas, generalmente obtenidas de la combustión de lignitos y carbones subbituminosos, la suma de óxidos ácidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) debe ser mayor al 50% de su composición y la cantidad de cal libre (CaO) debe alcanzar un contenido mayor al 10%.

1.2 Cenizas Clase F.

Son cenizas volantes con propiedades puzolánicas, generalmente obtenidas de la combustión de antracitas y carbones bituminosos, la suma de óxidos ácidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) debe ser mayor al 70% de su composición, el contenido de cal (CaO) es menor al 10%¹⁸.

2. Composición Química y Mineralógica De las Cenizas Volantes.

Estudios¹⁹ demuestran que los diferentes componentes mineralógicos de las cenizas volantes dependen de su contenido de cal (CaO). Las cenizas con contenidos de cal (CaO) menores al 5% tienen componentes cristalinos relativamente inertes (Óxido de hierro, mullita y cuarzo) embebidos en una fase vítrea de reacción lenta, rica en sílice y hierro, en cambio las cenizas con alto porcentaje a cal (CaO) cercanos al 15% tiene componentes cristalinos cementantes (C_3A , CaO , anhidrita...) embebidos en una fase vítrea más reactiva, rica en aluminio y calcio.

¹⁸ ASTM Committee. (2004). ASTM C 618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book of ASTM Standard, Section, 4.

¹⁹ Valencia, L. E. S. (2001). Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (10), 47-62.

Según la Norma ASTM C618 las cenizas volantes deben restringirse químicamente según la clasificación de éstas, como se puede apreciar en la tabla 2:

Tabla 2: Límites de Composición Química Según Norma ASTM C618.

Componente	%	Clase C	Clase F
Dióxido de Silicio + Oxido de aluminio + oxido de fierro ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)	% Min	50%	70%
Trióxido de azufre (SiO_3)	%Max	5%	5%
Álcalis, disponible como NaO_2	%Max	1,5%	1,5%
Contenido humedad	%Max	3%	3%
Perdida por calcinación	%Max	6%	12%
Oxido de magnesio (MgO)	%Max	5%	5%

3. Aspectos físicos de las cenizas volantes.

Uno de los aspectos importantes a considerar en las cenizas volantes es la finura, este factor afecta en la demanda de agua y la velocidad de desarrollo de resistencia de la pasta.

La superficie específica de la ceniza, es la relación entre la superficie de partículas en una unidad de masa y se mide en cm^2/g , se necesita que la superficie específica sea similar a la del cemento, mientras mayor es la superficie específica de la ceniza, mayor será la actividad puzolánica y su velocidad de reacción.²⁰

La contracción del cemento se ve afectada por el tamaño del grano, cuando el tamaño de las partículas son similares a las del hormigón, los cambios son insignificantes, pero cuando el tamaño del grano es mucho menor que el del cemento, la contracción aumenta²¹.

Según la Norma ASTM C618 las cenizas volantes que se incorporan al cemento y hormigón deben restringirse físicamente según la clasificación de éstas, como se puede apreciar en la tabla 3:

²⁰ Ramírez, J. L. A. (1990). *Orígenes tipos y caracterización de las cenizas volantes*. Ministerio de Fomento. En: Valencia, L. E. S. (2001). Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (10), 47-62.

²¹ Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL) (1982). Las cenizas volantes y sus aplicaciones. ASOC.Inv:elect., 3ª edición En: Valencia, L. E. S. (2001). Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (10), 47-62.

Tabla 3: Requisito Físico Según Norma ASTM C618.

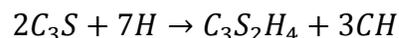
Requisito	%	Clase C	Clase F
Finura: cant. Max. Retenida en el tamizado vía húmeda en la malla de 45µm N°325	Max%	34%	34%
Índice de actividad puzolánica a 7 días	Min%	75%	75%
Índice de actividad puzolánica a 28 días	Min%	75%	75%
Demanda de agua	Max%	105%	105%
Expansión, contracción en auto clave	Max%	0,8%	0,8%
Densidad, max var. del promedio	Max%	5%	5%
Porcentaje retenido en 45µm (N°325) var. Max del promedio	Max%	5%	5%

4. Cementos con adición de ceniza volante.

El uso de cenizas volantes en el hormigón se ve beneficiado por el ahorro económico que este produce al utilizar menor cantidad de cemento y los cambios micros estructurales en el hormigón, esto último afecta la durabilidad, específicamente a la permeabilidad, matriz porosa, difusión de cloruros y carbonatación del hormigón.

4.1.1 Hidratación de hormigones con adición de ceniza volante.

En la hidratación de hormigones con adición de ceniza volante ocurren principalmente dos tipos de reacciones, la primera es la producción del gel C-S-H y Portlandita (hidróxido de calcio) producto de la hidratación del cemento Portland, el cual se puede ver en la siguiente ecuación:



El segundo tipo de reacción se produce por la combinación entre Portlandita y las cenizas volantes (C.V), lo que produce mejoras en las propiedades físicas y mecánicas del cemento hidratado, ilustrada en la siguiente ecuación:



Como se vio anteriormente las cenizas volantes se diferencian dependiendo de las materias primas y los procedimientos de combustión del carbón, esto se traduce en una gran diferencia en

la composición química entre cenizas volantes, haciendo difícil poder predecir la reactividad de las cenizas y su efectivo aporte al desempeño del hormigón²².

5. Beneficios

Los beneficios de la incorporación de ceniza volante y obtención de cementos puzolánicos o portland puzolánicos son múltiples: 1) Ahorro de cemento en las mezclas; 2) Aumento en la impermeabilidad y durabilidad de la obra; 3) Aumento de la resistencia a compresión a largo plazo; 4) Disminución del calor de hidratación.

²² Bas, M., Omar, I., Moragues Terrades, A., & Gálvez Ruíz, J. (2008). La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Pórtland en la durabilidad del hormigón: propiedades físicas, difusión del ión cloruro y del dióxido de carbono.

CAPITULO IV: ESTUDIO EXPERIMENTAL

1.0 Introducción.

El programa experimental que se llevó a cabo en esta memoria, consistió en la fabricación de hormigones de cemento Portland, con diferentes porcentajes de adición de material puzolánico, una ceniza volante proveniente de central termoeléctrica Ventanas y adiciones variables de SO_3 . Además de realizar 2 diferentes tratamientos para potenciar la formación de fenómeno DEF y acelerar el proceso, como se mencionó anteriormente estos tratamientos están basados en el el Ensayo Duggan y LPC Method N°66, igualmente un estudio realizado en Canadá refuerza estos dos experimentos e indica que tres ciclos de calentamiento a temperatura entre 21°C y 82°C son suficientes para generar un severo daño en las probetas debido al ataque interno de los sulfatos.²³.

2.0 Materiales.

En el siguiente punto se clasificarán y mostrarán las diferentes características de los materiales utilizados según sus respectivas normas y los materiales utilizados en el estudio realizado anteriormente por Francisco Tapia²⁴, con el fin de comparar resultados.

2.0.1 Cemento.

El cemento utilizado en este ensayo es un Melón Súper, clasificado como un cemento Portland puro de alta resistencia, según la Norma NCh 148²⁵, se utiliza este cemento ya que no posee adiciones.

2.0.1.1 Propiedades físicas y químicas del cemento utilizado

En las siguientes tablas se muestran las características físicas y químicas, las cuales cumplen los estándares recomendados por las normas NCh 147, NCh 152, NCh 154, NCh 159^{26 27 28 29}.

²³ ; Skalny, J., Johansen, V., Thaulow, N., & Palomo, A. (1996). DEF: As a form of sulfate attack. *Materiales de construcción*, 46(244), 5-29.

²⁴ F. Tapia. (2015). Vulnerabilidad de los hormigones masivos frente al fenómeno expansivo por formación de etringita tardía, en función del contenido de puzolana en cementos nacionales.

²⁵ NCh148.Of.68. (1968). Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones **generales**.

²⁶ NCh147 Of.69. (1969). Cemento - Análisis Químico.

²⁷ (NCh152 Of.71 (1971). Cemento - Método de determinación del tiempo de fraguado.

²⁸ NCh154 Of.69. (1969). Cemento - Determinación del peso específico relativo.

²⁹ NCh159 Of.70. (1970). Cemento - Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine.

Tabla 4: Propiedades físicas Cemento Melón Súper.

Propiedades	Norma	Cemento Melón Súper
Fraguado Inicial [min]	NCh152	100
Fraguado Final [min]	NCh152	150
Superficie Específica (Blaine) [cm ² /g]	NCh152	4100
Peso Específico (g/ml)	NCh152	3,12

Tabla 5: Propiedades Químicas Cemento Melón Súper

Propiedades	Norma	Cemento Melón Súper
Perdida por Calcinación [%]	NCh147	1,5
Residuo Insoluble [%]	NCh147	1,0
Contenido de SO ₃ [%]	NCh147	2,8
Contenido de MgO [%]	NCh147	2,0

Tabla 6: Óxidos Principales del Cemento Portland Puro

Composición de Óxidos	Norma	Cemento Melón Súper
SiO ₂ [%]	NCh147	21,00
Al ₂ O ₃ [%]	NCh147	5,11
CaO [%]	NCh147	63,60
SO ₃ [%]	NCh147	2,80
MgO [%]	NCh147	1,95
Na ₂ O [%]	ASTM C114	0,51
K ₂ O [%]	ASTM C114	0,40

2.0.2 Áridos.

Los áridos incorporados en el hormigón fueron gravilla y arena gruesa, este corresponde a 659 Kg de gravilla y 988 Kg de arena por cada m³ de colada, cumpliendo con las normas NCh 163, NCh 165, NCh 1116, NCh 1117, NCh 1239, NCh 1326^{30 31 32 33 34 35}, la curva granulométrica de áridos se muestra en las siguientes tablas.

³⁰ NCh0163 Of.79. (1979). Áridos para morteros y hormigones – Requisitos. Instituto Nacional de Normalización.

³¹ NCh165 Of.1977. (1977). Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría.

³² NCh1116. Of.2008. (2008). Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente.

³³ NCh1117 Of.2010. (2010). Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las gravas.

³⁴ NCh1239 Of.2009. (2009). Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas.

³⁵ NCh1326 Of.2012. (2012). Áridos para morteros y hormigones - Determinación de huecos.

Tabla 7: Curva Granulométrica de los Áridos

Tamiz ["] ASTM	Tamiz [mm]	Porcentaje Que Pasa por el Tamiz		
		Gravilla	Arena	Árido Combinado
2"	50	-	-	-
1 ½ "	37,5	-	-	-
1"	25	100	-	100
¾ "	19	98	-	99,2
3/8 "	9,5	30	100	72
#4	4,75	1	96	58
#8	2,36	-	67	40,2
#16	1,18	-	47	28,2
#30	0,60	-	32	19,2
#50	0,30	-	17	10,2
#100	0,15	-	8	4,8

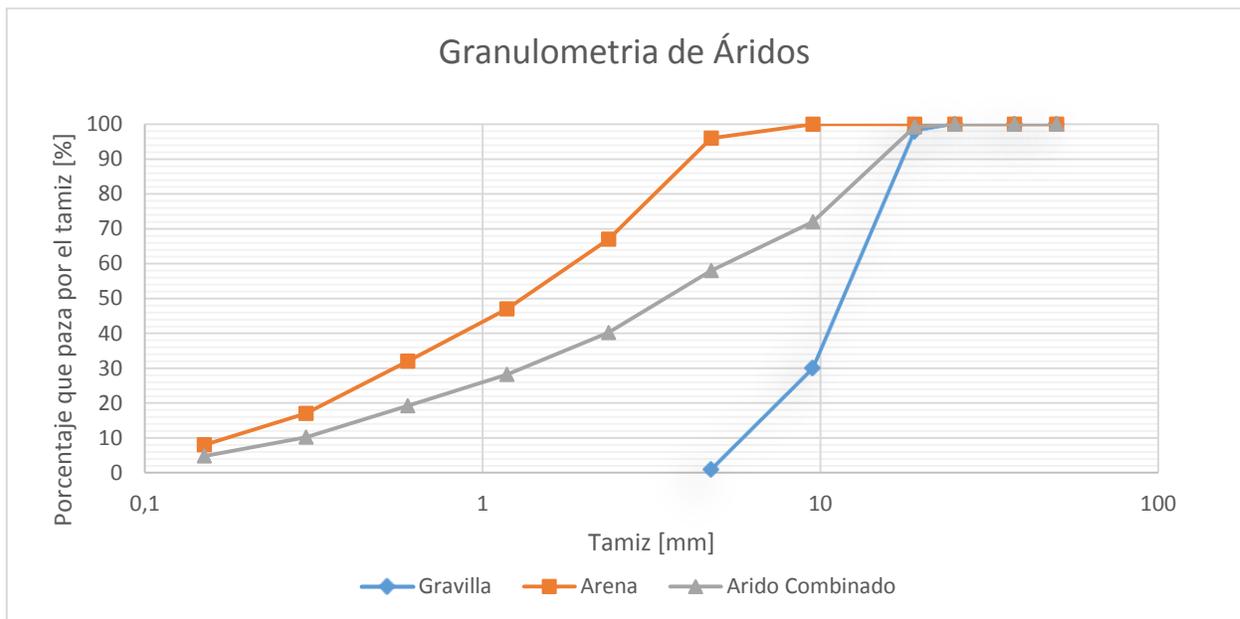


Figura 4-1: Gráfico Granulometría de los Áridos. [18]

Tabla 8: Propiedades Físicas de la gravilla.

Propiedades	Norma	Gravilla
Tamaño max. Nominal [mm]	NCh163	19
Módulo de Finura	NCh165	6,71
Densidad Real Seca [Kg/m ³]	NCh1117	2688
Densidad Real SSS [Kg/m ³]	NCh1117	2715
Densidad Neta Kg/m ³	NCh1117	2764
Absorción [%]	NCh1117	1,03
Densidad Aparente Suelta [Kg/m ³]	NCh1116	1570
Densidad Aparente Compactada [Kg/m ³]	NCh1116	1629
Huecos [%]	NCh1326	41,6

Tabla 9: Propiedades Físicas de la Arena.

Propiedades	Norma	Arena
Tamaño max. Nominal [mm]	NCh163	4,75
Módulo de Finura	NCh165	3,22
Densidad Real Seca [Kg/m ³]	NCh1239	2637
Densidad Real SSS [Kg/m ³]	NCh1239	2674
Densidad Neta [Kg/m ³]	NCh1239	2736
Absorción [%]	NCh1239	1,37
Densidad Aparente Suelta [Kg/m ³]	NCh1116	1706
Densidad Aparente Compactada [Kg/m ³]	NCh1116	1816
Huecos [%]	NCh1326	35,3

2.0.3 Ceniza volante.

La ceniza volante fue proporcionada por la empresa Melón proveniente de la Central Termoeléctrica Ventanas, la clasificación, especificaciones físicas y químicas de la ceniza, se muestran a continuación, según la norma ASTM C618³⁶, Dado los resultados se y lo visto en el Capítulo II-3. Se clasificó la Ceniza utilizada como clase F. A continuación se muestran los requisitos Químicos según ASTM C618, norma NCh 159 y NCh 154.^{37 38}

Tabla 10: Composición Química de la Ceniza Volante Utilizada.

Componente	Ceniza Volante Utilizada Clase F
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	50,4
Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	21,19
Oxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	7,35
Dióxido de Silicio+Oxido de Aluminio+Oxido de Hierro (SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	78,94%
Trióxido de azufre(SO ₃)	0,42%
Álcalis, disponible como NaO ₂	0,17%
Contenido humedad	0,72%
Perdida por calcinación	11,12%
Oxido de magnesio (MgO)	0,81%
K ₂ O	0,17
Residuo Insoluble [%]	74,59
Oxido de Calcio (CaO)	2,45%

³⁶ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C618-93 (1993), Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concretes, U.S.A.

³⁷ NCh159 Of.70. (1970). Cemento - Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine.

³⁸ NCh154 Of.69. (1969). Cemento - Determinación del peso específico relativo.

Tabla 11: Características Físicas de la Ceniza Volante.

Requisito Según ASTM C618	Ceniza volante Utilizada Clase F
Finura: cant. Max. Retenida en el tamizado vía húmeda en la malla de 45µm N°325	49%
Indicé de actividad resistente a 7	54 Kg/cm ²
Indicé de actividad resistente a 28 días	Cumple
Demanda de agua	45,66%

Tabla 12: Superficie específica (Blaine) de la Ceniza Volante.

Propiedad	Norma	Ceniza Volante
Superficie Específica (Blaine) [cm ² /g]	NCh159	2800
Peso Específico [g/ml]	NCh154	2,22

2.0.4 Yeso

El yeso utilizado fue concedido por la empresa Melón el cual corresponde al mismo utilizado por la empresa en sus cementos, asegurando que este cumpla con las normas chilenas, las propiedades físicas se muestran en la siguiente tabla según norma NCh 159 y NCh 154.³⁹⁴⁰

Tabla 13: Superficie Específica (Blaine) del Yeso

Propiedades	Norma	Yeso
Superficie Específica (Blaine) [cm ² /g]	NCh159	8400
Peso Específico [g/ml]	NCh154	2,57

2.0.5 Agua

El agua utilizada para la confección de los hormigones corresponde a agua potable de la comuna de Santiago Centro, Santiago a una temperatura de laboratorio de 20 ± 3 °C.

³⁹ NCh159 Of.70. (1970). Cemento - Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine.

⁴⁰ NCh154 Of.69. (1969). Cemento - Determinación del peso específico relativo.

2.0.6 Puzolana Pudahuel

La puzolana empleada en el estudio anterior realizado por Francisco Tapia proviene del yacimiento explotado por Melón localizado en Pudahuel. En las tablas 14 y 15 se presentan las propiedades físicas y químicas de esta adición según norma NCh 159 y NCh 154.⁴¹⁴².

Tabla 14: Propiedades físicas puzolana Pudahuel.

Propiedad	Norma	Puzolana Pudahuel
Superficie Específica Blaine (cm ² /g)	NCh159	4.450
Peso Específico (g/ml)	NCh154	2,40

Tabla 15: Composición química puzolana Pudahuel.

Composición de Óxidos	Norma	Puzolana Pudahuel
SiO ₂ (%)	NCh147	69,57
Al ₂ O ₃ (%)	NCh147	13,10
CaO (%)	NCh147	2,74
Fe ₂ O ₃ (%)	NCh147	1,69

La actividad puzolánica según la norma chilena de puzolanas NCh161⁴³, mostrándose los resultados en la tabla 16.

Tabla 16: Actividad Puzolánica puzolana Pudahuel.

Propiedad	Norma	Puzolana Pudahuel
Actividad Puzolánica (kgf/cm ²)	NCh161	74

La actividad puzolánica de la Puzolana Pudahuel supera el requerimiento mínimo de 42 kgf/cm² establecido por la norma, por lo que es apta para su uso como adición en el cemento.

3.0 Moldes.

El uso del molde fue para formar pastelones de hormigón de 8x29x46 [cm], de los cuales posterior a su fraguado y endurecimiento se acerraran para obtener 5 probetas de cada molde de 8x8x29 [cm], este molde consta de una rectángulo formado por 2 barras largas, 2 barras cortas, topes, hilos pasadores, base, tornillo y tuercas.

⁴¹ NCh159 Of.70. (1970). Cemento - Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine.

⁴² NCh154 Of.69. (1969). Cemento - Determinación del peso específico relativo.

⁴³ NCh0161 Of.69 Cemento - Puzolana para uso en cementos - Especificaciones. (1969). Instituto Nacional de Normalización.

Se contó con un total de 4 moldes.

La Figura 4-2 muestra el diseño en Autocad del molde.

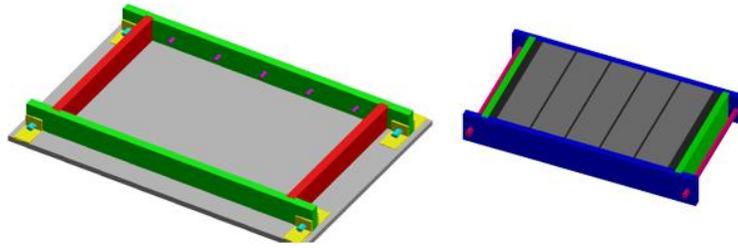


Figura 4-2 Prototipo Moldes [19]



Figura 4-3: Moldes [20]

3.1 Barra Larga.

La “barra larga” consiste en una barra de acero, de 572x80x16[mm], la cual desde el borde de su extremo más largo, tiene un orificio de 13 [mm] a 20 [mm] de cada uno de sus costados y a 40 [mm] de su borde superior, este orificio es para pasar la “barra de hilo” que sujeta toda la estructura; tiene una hendidura de 7 [mm] de profundidad y 16 [mm] de espesor a 56 [mm] a cada uno de sus bordes de su extremo más largo y en toda su longitud del lado más corto, donde encaja la “barra corta” para formar el rectángulo o pastelón; además posee 5 orificios de 6[mm] de diámetro a cada 85[mm], donde el primero se encuentra a 116[mm] del borde del lado más largo y a 40 [mm] del borde superior, estos orificios son para introducir los “topes” de las probetas.

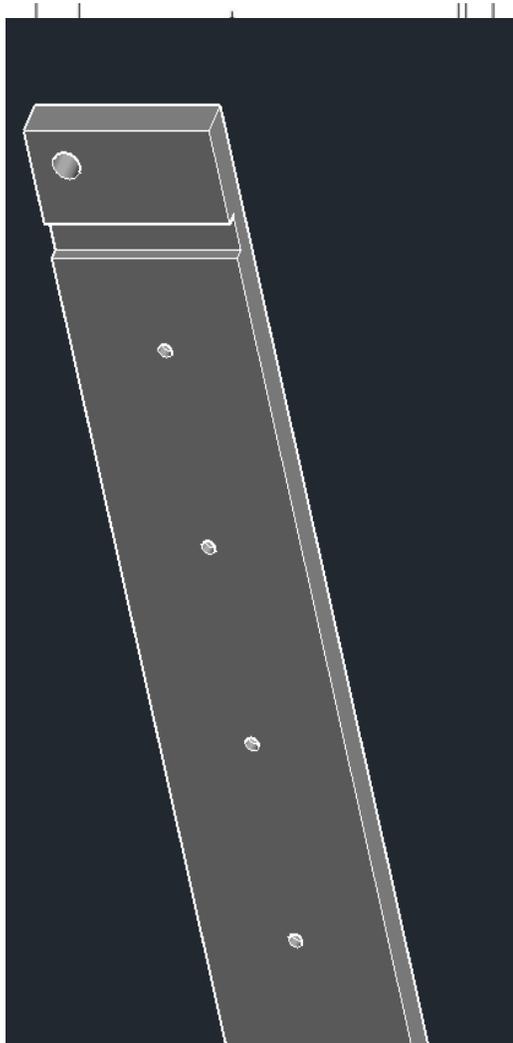


Figura 4-4: Ilustración Barra Larga. [21]

Figura 4-5: Ilustración 2 Barra Larga. [22]

3.2 Barra Corta

La “Barra Corta” es una barra de acero de 80x16x300[mm], la cual se encaja en la “Barra Larga” para formar el rectángulo o pastelón.

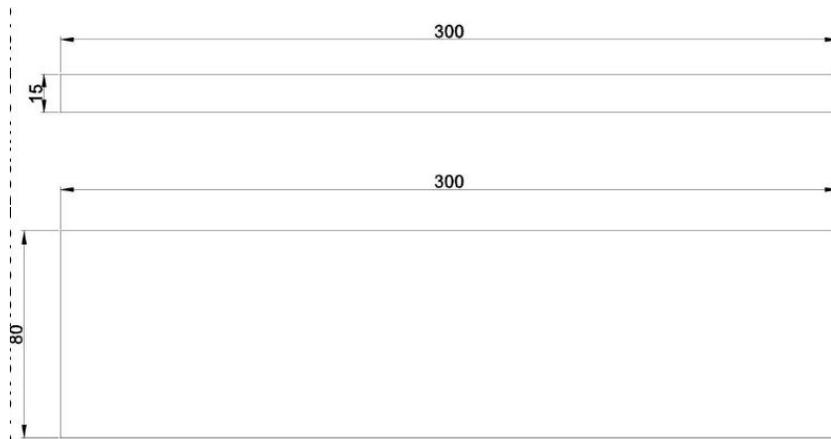


Figura 4-6: Ilustración Barra Corta. [23]

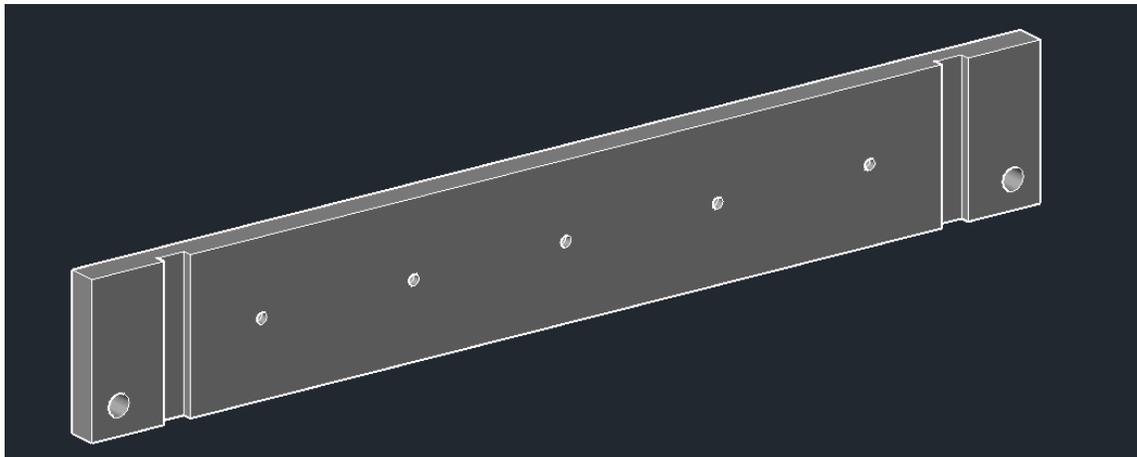


Figura 4-7: Ilustración 2 Barra Corta. [24]

3.3 Topes

Los topes utilizados son de acero galvanizado, de 6 [mm] de diámetro, 22 [mm] de largo y una punta redondeada, este tope se debe introducir en los orificios de la “barra larga”, para que al momento de colocar el hormigón, este quede incrustado en el y se puedan realizar las mediciones por expansión.

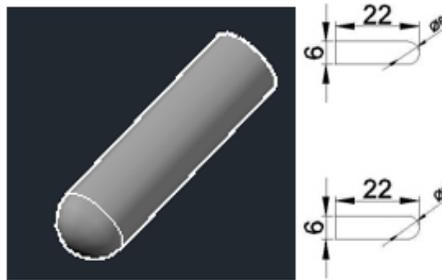


Figura 4-8: Ilustración Topes. [25]

3.4 Barra de Hilo

Estas barras de Hilo son de acero galvanizado de un diámetro de 16[mm] y de un largo mínimo de 350[mm], la función de esta barra de hilo es traspasar las “barras largas” por los extremos y atornillarlos con el fin de apretar cada barra la una con la otra.



Figura 4-9: Ilustración Barra de Hilo. [26]

3.5 Base

La base utilizada es de madera con una superficie impermeable, la principal función es darle una superficie al molde para verter el hormigón.

3.6 Sujetadores

Los sujetadores son de acero y su principal función es fijar las “barras largas” y “barras cortas” a la base, tiene una forma de L, como se puede ver en la imagen X.

4.0 Antecedentes del Ensayo.

4.1 Dosificación.

En el presente trabajo experimental se realizaron 6 diferentes dosificaciones, con el fin de evaluar el comportamiento de las diferentes proporciones de material cementicio como cemento Portland, ceniza volante y yeso, este último se adiciona con el fin de aumentar la cantidad de SO_3 en la mezcla, con el fin de colaborar con las expansiones debido al fenómeno DEF, se utilizó un alto contenido de pasta de cemento, alrededor de 40% en volumen y para las diferentes dosificaciones se varió la cantidad de ceniza volante adicionada (0%, 15% y 30%) y la cantidad de SO_3 (2,8% y 3,5%), manteniendo constante el material cementicio total, gravilla, arena y agua, de la misma forma que se realizó en el estudio anterior por Francisco Tapia, pero con puzolana como adición.

Tabla 17: Dosificaciones

Dosificaciones	Ceniza volante [%]	Contenido SO_3[%]
Dosificación 1	0	2,8
Dosificación 2	0	3,5
Dosificación 3	15	2,8
Dosificación 4	15	3,5
Dosificación 5	30	2,8
Dosificación 6	30	3,5
Dosificaciones	Puzolana [%]	Contenido SO_3[%]
Dosificación 7	15	2,8
Dosificación 8	15	3,5
Dosificación 9	30	2,8
Dosificación 10	30	3,5

Tabla 18: Resumen Materiales de las Dosificaciones.

Materiales	Dosificaciones					
	1	2	3	4	5	6

Ceniza Volante [%]	0	0	15	15	30	30
Ceniza Volante [Kg/m3]	0,	0	69	69	138	138
SO3[%]	2,8	3,5	2,8	3,5	2,8	3,5
Yeso[Kg/m3]	0,00	7,38	2,40	6,41	4,81	8,815
Gravilla [Kg/m3]	659	659	659	659	659	659
Arena [Kg/m3]	988	988	988	988	988	988
Agua [Kg/m3]	221	221	221	221	221	221
A/MC	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48

Para simplificar las notaciones de las dosificaciones se abreviara su nomenclatura como muestran las siguientes tablas.

Tabla 19: Notación Porcentaje de Ceniza Volante

Porcentaje Ceniza volante [%]	Notación
0	P ₀
15	P ₁
30	P ₂

Tabla 20: Notación Porcentaje de SO₃

Contenido SO ₃ [%]	Notación
2,8	Y ₁
3,5	Y ₂

La Notificación análoga a este estudio experimental realizada por Francisco Tapia se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21: Notación Porcentaje de Puzolana Estudio Anterior.

Porcentaje Puzolana [%]	Notación
-------------------------	----------

0	P_0
15	P_3
30	P_4

5.0 Método de Ensayo

5.1 Mezcla.

Los hormigones fueron elaborados cumpliendo con la norma NCh 1018⁴⁴, realizando los respectivos ensayos, cono de abrams según norma NCh 1019⁴⁵, contenido de aire según norma NCh 2184⁴⁶ y densidad aparente del hormigón fresco⁴⁷.

5.1.1 Preparación del molde y medición distancia libre.

Previo a la colocación de hormigón en el molde, se debió cubrir las juntas con silicona y la parte interior con desmoldante, además de introducir los topes en los respectivos orificios de las “barras largas” con silicona, para finalizar se midió la distancia libre (D_{Li}) entre los topes de cada probeta, como muestra la Figura 4-14.



Figura 4-10: Ilustración de Distancia Libre en la Probeta. [27]

5.2 Confección de Pastelones.

Una vez realizada la mezcla, se realizaron los cubos para ensayos de compresión según norma NCh1017⁴⁸, junto con la obtención del cono de abrams, el índice de aire y la confección de dos pastelones, los cuales como se explicó previamente serán cortados para obtener las probetas.

Estos Pastelones fueron vibrados durante 45 [seg] para finalmente platacharlos.

⁴⁴ NCh1018 Of.2009. (2009). Hormigón - Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio.

⁴⁵ NCh1019 Of.2009. (2009). Hormigón- Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams.

⁴⁶ NCh2184 Of.1992. (1992). Hormigón y mortero - Métodos de ensayo - Determinación del contenido de aire.

⁴⁷ NCh1564 Of.2009. (1979). Hormigón - Determinación de la densidad aparente del hormigón fresco.

⁴⁸ NCh1017 Of.2009 . (2009). Hormigón - Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento.



Figura 4-11: Pastelones y Cubos Vibrados. [28]



Figura 4-12: Cono de abrams [29]

5.3 Curado Inicial.

Los pastelones se dejaron 2 horas curando desde la hora de confección, en el laboratorio bajo una arpillera húmeda a 20 ± 3 °C, una vez finalizado este plazo, uno de los pastelones se le realizó un curado acelerado, mientras el otro permaneció en las mismas condiciones de curado inicial.

5.4 Curado Acelerado (C.A) o Tratamiento N° 1.

EL curado Acelerado consiste en llevar el pastelón a un horno el cual pasara de 20 ± 3 °C a 85°C en un periodo de 2 horas, luego permanecerá a 85°C por un periodo de 6 horas, finalmente se apagara el horno y se dejara que el pastelón llegue a temperatura ambiente de forma natural dentro del horno.

Para evitar pérdidas significativas de agua, se sella el pastelón con un plástico impermeable.

El objetivo de este curado acelerado es elevar las temperaturas (mayores a 70°C) en toda la mezcla de hormigón para fomentar la producción del fenómeno DEF.



Figura 4-13: Pastelón sellado y Hornos Utilizados. [30]

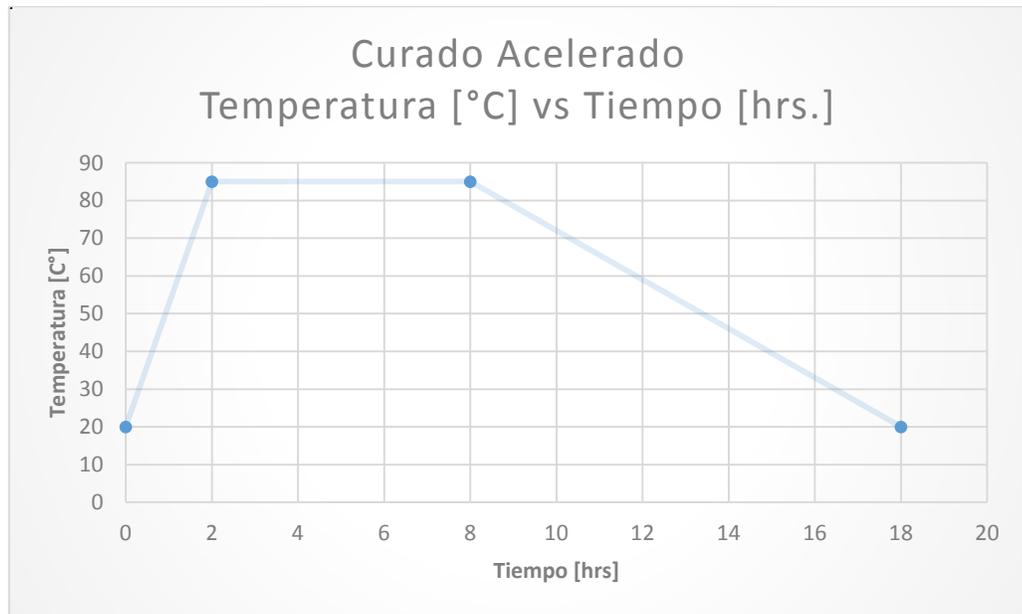


Figura 4-14: Gráfico Curado a Temperatura. [31]

5.5 Aserrado de los Pastelones.

Luego de 24 horas desde el horario de confección de ambos pastelones, se procede a acerrarlos para obtener las probetas de 8x8x29[cm], por cada pastelón se obtendrán 5 probetas, por lo cual se tendrán 5 probetas sometidas a curado acelerado y 5 probetas curadas a temperatura ambiente.



Figura 4-15: Desmolde de Pastelones [32]

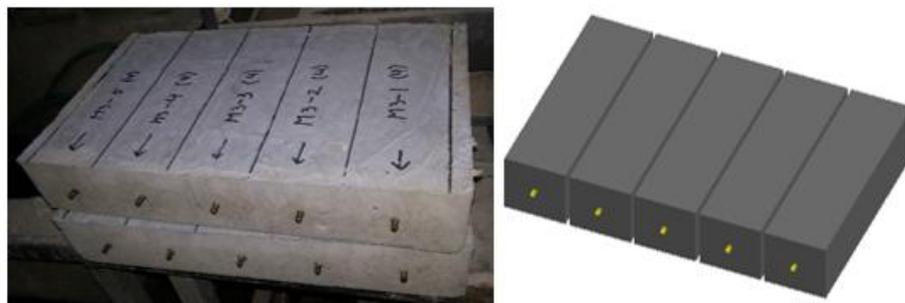


Figura 4-16: Pastelones antes de aserrar. [33]



Figura 4-17: Aserrado de Pastelones. [34]

5.6 Medición Inicial de las Probetas

Se procede a medir las probetas, para obtener la longitud inicial de éstas para esto se utiliza un reloj comparador, este sistema consta de una barra patrón el cual se mide para obtener una lectura referencial (L_p) respecto a la lectura de todas las probetas (L_i), por lo cual la lectura inicial de cada una de las probetas (L_{0_i}) será:

$$L_{0_i} = L_i - L_p$$

Donde:

L_{0_i} : Lectura Inicial de cada probeta.

L_i : Lectura de cada una de las probetas.

L_p : Lectura barra patrón.

4.7 Ciclos de Humedecimiento y Secado (C.H.S) o Tratamiento N°2.

Luego 3 probetas de cada pastelón se les realizaran un tratamiento de humedecimiento y secado, cabe destacar que a cada pastelón se le realizo un tratamiento diferente de curado.

Este tratamiento de humedecimiento y secado consta en lo siguiente:

- 3 días de curado a 21°C.
- 1 día de Secado en horno a 80°C.
- 1 día de Humedecimiento a 21°C.
- 1 día de Secado en horno a 80°C.
- 1 día de Humedecimiento a 21°C.
- 3 días de secado en horno a 80°C.

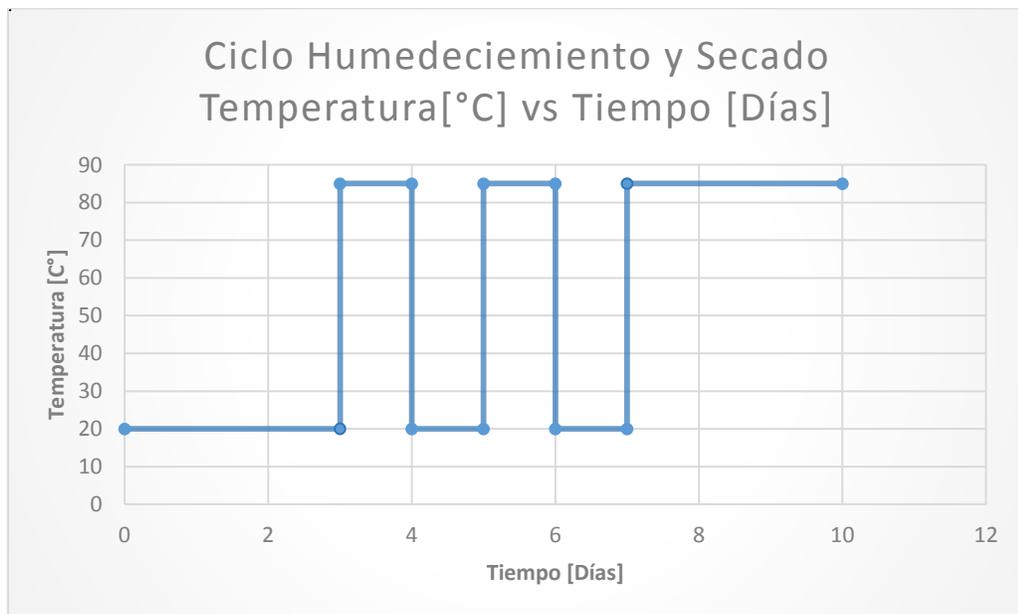


Figura 4-18: Grafico Ciclo de Humedecimiento y Secado. [35]

La finalidad de este ciclo es microfisurar la probeta para facilitar y acelerar las expansiones producto del fenómeno DEF, esta microfisuración se produce por los diferentes cambios de longitud de la pasta de cemento, agua, árido, entre otros. Esto se debe a los disímiles coeficientes de dilatación térmica de los materiales que componen el hormigón.

5.8 Metodología de Mediciones

Finalmente se procederá a dejar todas las probetas bajo un tratamiento de curado a $20\pm 3^{\circ}\text{C}$, además de realizar mediciones periódicamente, para las siguientes mediciones se medirá la barra patrón (L_p) el cual se mide para obtener una lectura referencial respecto a la lectura de todas las probetas (L_x), además previamente se obtuvieron los datos de la lectura inicial de cada probeta (L_{0_i}) y la distancia libre (D_{L_i}) Con estos datos se obtendrá la expansión de cada probeta con la siguiente ecuación:

$$Expansion [\%] = \frac{(L_x - L_{0_i})}{D_{L_i}}$$

Donde:

L_{0_i} : Lectura Inicial de cada probeta.

L_x : Lectura de cada una de las probetas.

D_{L_i} : Distancia Libre de cada probeta.

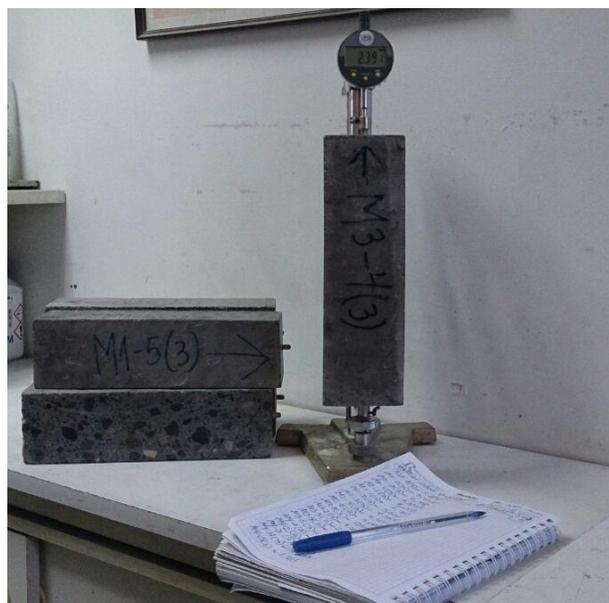


Figura 4-19: Medición de Probetas. [36]

5.9 Resumen Tratamientos

Según lo explicado recientemente se tendrán 4 diferentes tratamientos de curado en total, para simplificar las notaciones se dejarán los tratamientos con la siguiente notificación y etiqueta en gráficos:

Tabla 22: Resumen Tratamientos.

Tratamiento	Notificación	Etiqueta
Curado Acelerado	Tratamiento N°1	T ₁
Ciclos de humedecimiento y secado	Tratamiento N°2	T ₂
Curado Acelerado y Ciclos de Humedecimiento y Secado	Tratamiento N°1 y N°2	T ₁₂

5.9.1 Tratamiento N° 1 y 2.

Este tratamiento busca potenciar al máximo la Formación del fenómeno DEF y su expansión, como se explicó en el punto 4.4 y 4.7.

5.9.2 Tratamiento N°2

Este tratamiento a pesar de no fomentar el fenómeno DEF con un curado térmico, busca averiguar cómo reaccionaran las probetas a los ciclos de humedecimiento y secado.

5.9.3 Tratamiento N°1

Este tratamiento busca fomentar el fenómeno DEF y verificar la eficiencia del ciclo de humedecimiento y secado.

5.9.4 Sin ningún tratamiento

Este tratamiento busca compara una probeta completamente normal, con respecto al los otros tratamientos y verificar sus eficiencia.

5.10. Resumen Tratamientos.

A continuación se muestra una tabla resumen de los diferentes tratamientos aplicados, cabe decir que esta tabla resumen es para cada una de las dosificaciones.

Tabla 23: Número de Probetas por Tratamiento.

Dosificación	Tratamientos	N° Probetas
P ₀ , P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₄	T ₁	2
	T ₂	3
	T ₁₂	3
	(Sin Tratamiento)	2
	Total	10

6.0 Criterios del Estudio

Dado lo anterior se supone conservador adoptar el criterio por el ensayo LPC N°66 para determinar la susceptibilidad al fenómeno DEF, ya que las probetas utilizadas son de tamaño similar, al igual que el tratamiento de curado acelerado y ciclos de humedecimiento y secado, por lo que las probetas que sobre pasen el 0,04% de Expansión se consideraran propensas al fenómeno DEF.

CAPITULO IV: RESULTADOS

1.0 Propiedades del Hormigón.

En el siguiente punto se mostrarán los resultados obtenidos del hormigón fresco para todas las dosificaciones, en la siguiente tabla se muestra la densidad del hormigón fresco de todas las dosificaciones.

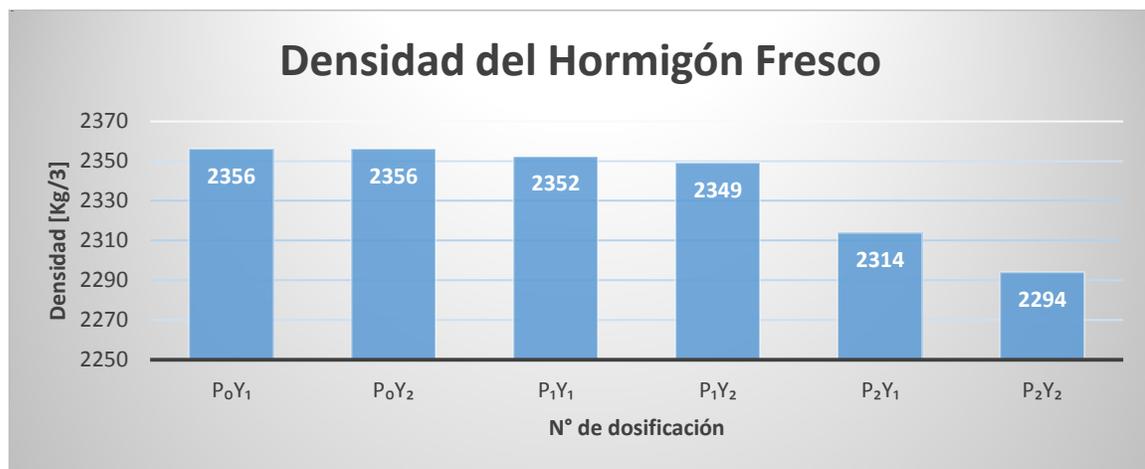


Figura 5-1: Grafico Densidad del Hormigón Fresco. [37]

En la siguiente tabla se muestra el resultado del cono de abrams según norma NCh 1019⁴⁹.

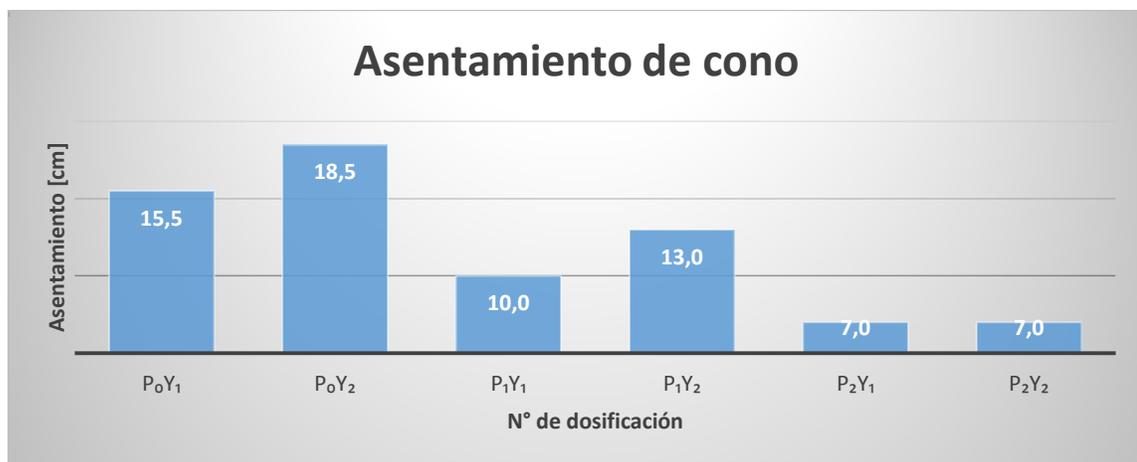


Figura 5-2: Grafico Asentamiento de Cono. [38]

⁴⁹ NCh1019 Of.2009. (2009). Hormigón- Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams.

1.1 Material Cementicio.

El material cementicio es la mezcla del Cemento Portland, yeso y Ceniza volante, Para el experimento se debieron hacer algunas modificaciones para cumplir con los requisitos de cada dosificación, por lo cual según el porcentaje químico de cada material se modificó hasta cumplir con los porcentajes de ceniza volante y yeso, considerando que la fórmula del Yeso es $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, se tendrá que el porcentaje de SO_3 en el yeso es de 46,51%.

La mezcla exacta utilizada para satisfacer las dosificaciones son las siguientes:

Tabla 24: Porcentaje de Material por Dosificación con ceniza volante.

Material	Dosificaciones					
	P_0Y_1	P_0Y_2	P_1Y_1	P_1Y_2	P_2Y_1	P_2Y_2
cimento	100,00%	98,40%	84,63%	83,90%	69,26%	68,53%
Ceniza Volante	0,00%	0,00%	15,00%	15,00%	30,00%	30,00%
yeso	0,00%	0,74%	0,37%	1,10%	0,74%	1,47%

Tabla 25: Porcentaje de Material por Dosificación con puzolana.

Material	Dosificaciones					
	P_0Y_1	P_0Y_2	P_3Y_1	P_3Y_2	P_4Y_1	P_4Y_2
cimento	100,00%	98,40%	84,04	82,44	68,08	66,48
Puzolana	0,00%	0,00%	15	15	30	30
yeso	0,00%	0,74%	0,96	2,56	1,92	3,52

El peso específico y la superficie específica se pueden obtener según los mismos datos de los materiales utilizados y las respectivas cantidades utilizadas en cada mezcla.

La superficie Específica y peso específico de cada material se resumen en la tabla 26:

Tabla 26: Resumen Superficie Específica de Materiales.

Material	Superficie Especifica [g/ml]	Peso Específico [cm^2/g]
Cemento Portland Puro	4100	3,12
Ceniza Volante	2800	2,22
Yeso	8400	2,57
Puzolana	4450	2,4

Con los datos anteriores se puede obtener el peso específico y superficie específica para cada dosificación:

Tabla 27: Superficie Específica por Dosificación.

Dosificación	Superficie Especifica	Peso especifico
--------------	-----------------------	-----------------

P ₀ Y ₁	4100	3,12
P ₀ Y ₂	4097	3,09
P ₁ Y ₁	3915	2,98
P ₁ Y ₂	3940	2,97
P ₂ Y ₁	3730	2,84
P ₂ Y ₂	3755	2,83
P ₃ Y ₁	4194	3,01
P ₃ Y ₂	4263	3,00
P ₄ Y ₁	4288	2,89
P ₄ Y ₂	4356	2,88

Finalmente se puede obtener dado los resultados de los análisis químicos y la dosificación, cuál será la composición química de cada dosificación, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 28: Resumen Composición Química Según Dosificación ceniza volante.

Componente	Dosificaciones					
	P ₀ Y ₁	P ₀ Y ₂	P ₁ Y ₁	P ₁ Y ₂	P ₂ Y ₁	P ₂ Y ₂
SiO ₂	21,00%	20,66%	25,30%	25,12%	29,60%	29,42%
Al ₂ O ₃	5,11%	5,03%	7,50%	7,45%	9,88%	9,84%
Fe ₂ O ₃	2,86%	2,81%	3,52%	3,49%	4,18%	4,15%
(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	28,97%	28,51%	36,31%	36,06%	43,66%	43,41%
CaO	63,60%	62,58%	54,10%	53,54%	44,59%	44,04%
SO ₃	2,80%	3,50%	2,80%	3,50%	2,80%	3,50%
NaO ₂	0,51%	0,50%	0,46%	0,45%	0,40%	0,40%
MgO	1,95%	1,92%	1,77%	1,75%	1,59%	1,57%
K ₂ O	0,40%	0,39%	0,36%	0,36%	0,33%	0,32%

Tabla 29: Resumen Composición Química Según Dosificación para estudio análogo realizado por Francisco Tapia.

Componente	Dosificaciones					
	P ₀ Y ₁	P ₀ Y ₂	P ₃ Y ₁	P ₃ Y ₂	P ₄ Y ₁	P ₄ Y ₂
SiO ₂	21,00%	20,66%	28,08%	27,75%	35,17%	34,83%
Al ₂ O ₃	5,11%	5,03%	6,26%	6,18%	7,41%	7,33%
Fe ₂ O ₃	2,86%	2,81%	2,66%	2,61%	2,45%	2,41%
(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	28,97%	28,51%	37,00%	36,54%	45,03%	44,57%
CaO	63,60%	62,58%	54,17%	53,68%	44,75%	44,25%
SO ₃	2,80%	3,50%	2,80%	3,50%	2,80%	3,50%

1.1.1 Fases minerales de la mezcla

Para calcular las fases minerales de las dosificaciones utilizaremos las ecuaciones de bogue, las cuales calculan el porcentaje de las fases minerales del Clinker, asumiendo que las reacciones son completas y las materias primas son puras, cabe destacar que estas ecuaciones solo son válidas para la dosificaciones sin adición de ceniza volante, ya que cumple con la proporción de minerales utilizadas en las ecuaciones, para el resto de las dosificaciones no se pueden utilizar las ecuaciones, ya que la composición química de la mezcla no está contenida dentro del subsistema para el cual se refiere el cálculo y se obtendrá como resultado porcentajes negativos para alguna o todas las fases.⁵⁰

Bogue plantea las siguientes 4 ecuaciones:

$$C3S = 4,071CaO - (7,6SiO_2 + 6,718Al_2O_3 + 1,43Fe_2O_3 + 2,852SO_3)$$

$$C2S = 2,867SiO_2 - 0,7544C3S$$

$$C3A = 2,65Al_2O_3 - 1,692Fe_2O_3$$

$$C4AF = 3,043Fe_2O_3$$

Dado las siguientes ecuaciones se obtuvieron los resultados, los cuales se pueden ver en la tabla 30:

⁵⁰ Pablo Kittl, C. Urrutia. (1982). El diagrama C-A-S-F y las fórmulas de Bogue.

Tabla 30: Fases Minerales para dosificación 1 y 2.

Componente	Dosificaciones	
	P ₀ Y ₁	P ₀ Y ₂
C3S	52,84%	49,88%
C2S	20,34%	21,62%
C3A	8,70%	8,56%
C4AF	8,70%	8,56%

2.0 Resistencia a la Compresión del Hormigón.

En el siguiente grafico se puede apreciar la resistencia a compresión de las dosificaciones a 7,28 y 56 días.

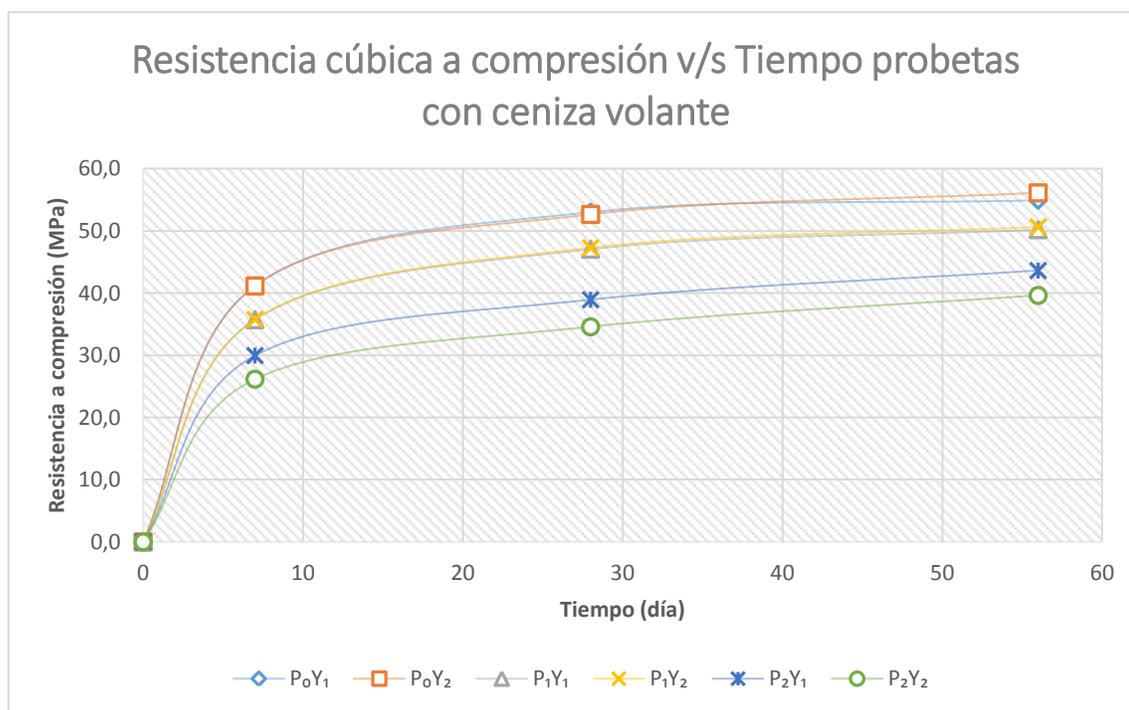


Figura 5-3: Grafico Resistencia a Compresión a 7,28 y 56 días probetas con ceniza volante. [39]

Tabla 31: Resistencia a Compresión a 7, 28 y 56 días probetas con ceniza volante.

Dosificación	Resistencia a Compresión probetas con ceniza volante		
	R7 [Mpa]	R28 [Mpa]	R56 [Mpa]
P ₀ Y ₁	41,2	53,0	54,9
P ₀ Y ₂	41,2	52,6	56,1
P ₁ Y ₁	35,7	47,1	50,2
P ₁ Y ₂	35,8	47,3	50,6
P ₂ Y ₁	30,0	38,9	43,6
P ₂ Y ₂	26,2	34,6	39,6

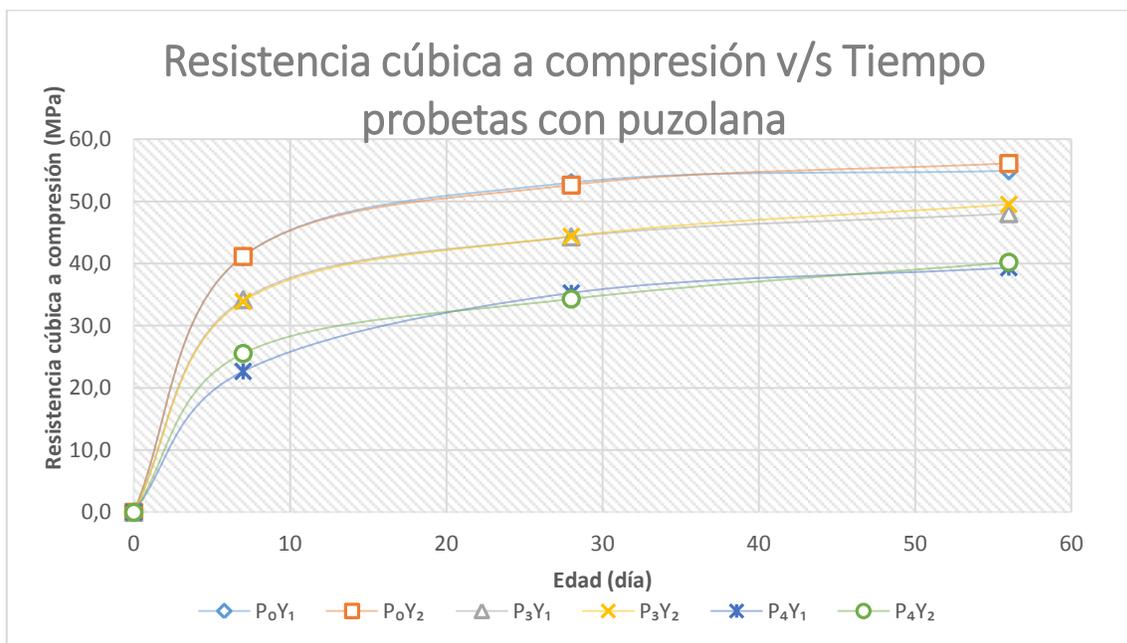


Figura 5-4: Resistencia a compresión probetas con puzolana [40]

Tabla 32: Resistencia a Compresión a 7, 28 y 56 días probetas con puzolana

Dosificación	Resistencia a Compresión probetas con puzolana		
	R7 [Mpa]	R28 [Mpa]	R56 [Mpa]
P ₀ Y ₁	41,2	53,0	54,9
P ₀ Y ₂	41,2	52,6	56,1
P ₃ Y ₁	34,2	34,2	44,3
P ₃ Y ₂	33,9	33,9	44,4
P ₄ Y ₁	22,7	22,7	35,3
P ₄ Y ₂	25,6	25,6	34,3

3.0 Medición de Expansiones

3.0.1 Expansiones Dosificación N°1

Las siguientes expansiones corresponden al promedio de las probetas de la dosificación N°1, cemento portland puro, 0% de Ceniza Volante y un 2,8% de SO₃, P₀Y₁.

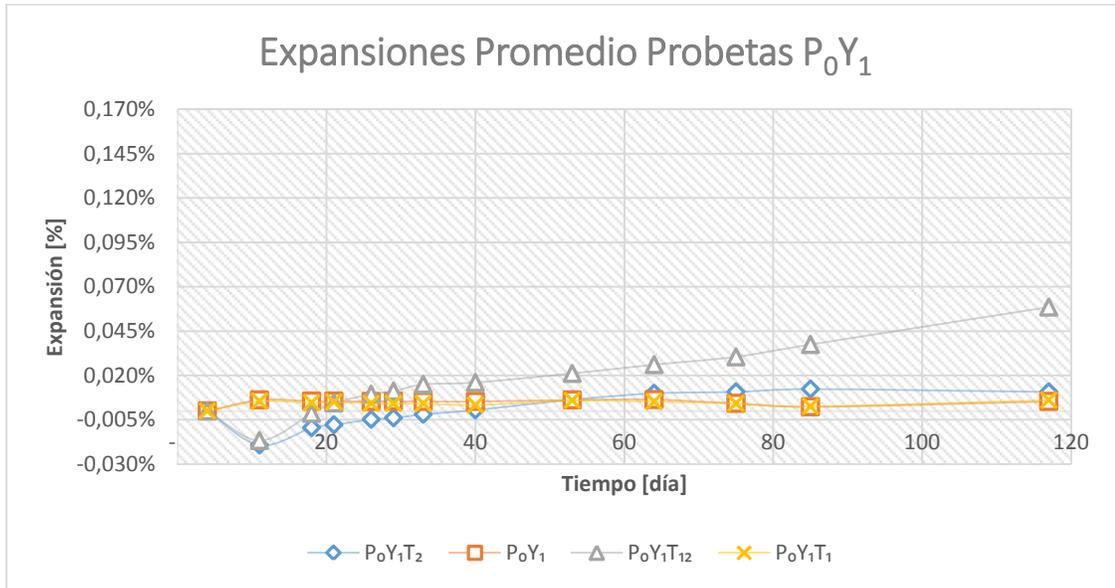


Figura 5-5: Grafico de Expansiones para P₀Y₁. [41]

Tabla 33: Expansiones para P₀Y₁.

Expansiones P ₀ Y ₁				
Días	Etiquetas			
	P ₀ Y ₁ T ₁₂	P ₀ Y ₁ T ₁	P ₀ Y ₁ T ₂	P ₀ Y ₁
4	0,000%	0,000%	0,00%	0,000%
11	-0,017%	0,006%	-0,02%	0,006%
18	-0,001%	0,005%	-0,01%	0,006%
21	0,005%	0,005%	-0,01%	0,006%
26	0,009%	0,004%	-0,01%	0,005%
29	0,011%	0,004%	0,00%	0,006%
33	0,015%	0,004%	0,00%	0,005%
40	0,016%	0,003%	0,00%	0,005%
53	0,021%	0,006%	0,01%	0,006%
64	0,026%	0,005%	0,01%	0,006%
75	0,030%	0,004%	0,01%	0,004%
85	0,037%	0,003%	0,01%	0,002%
117	0,059%	0,006%	0,01%	0,005%

3.0.2 Expansiones Dosificación N°2.

Las siguientes expansiones corresponden al promedio de las probetas de la dosificación N°2, cemento portland puro, 0% de Ceniza Volante, un 3,5% de SO₃, P₀Y₂.

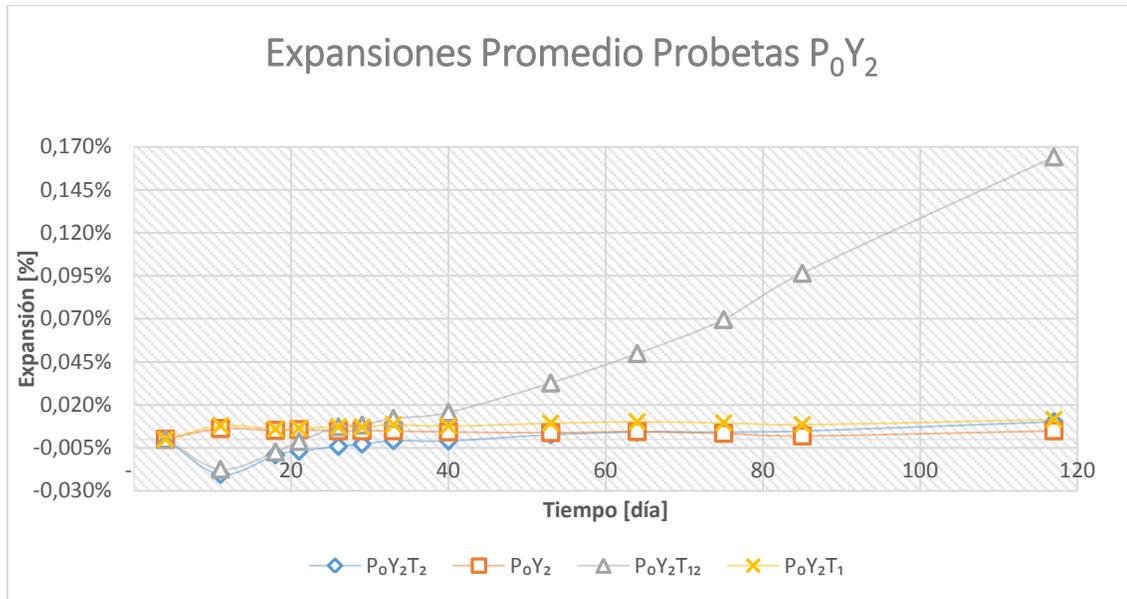


Figura 5-6: Grafico de Expansiones para P₀Y₂ [42]

Tabla 34: Expansiones de P₀Y₂

Expansiones P ₀ Y ₂				
Días	Etiquetas			
	P ₀ Y ₂ T ₁₂	P ₀ Y ₂ T ₁	P ₀ Y ₂ T ₂	P ₀ Y ₂
4	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
11	-0,017%	0,008%	-0,021%	0,006%
18	-0,007%	0,006%	-0,009%	0,005%
21	-0,001%	0,006%	-0,007%	0,006%
26	0,007%	0,007%	-0,004%	0,005%
29	0,008%	0,007%	-0,003%	0,005%
33	0,012%	0,008%	-0,001%	0,005%
40	0,016%	0,008%	-0,001%	0,004%
53	0,033%	0,009%	0,003%	0,004%
64	0,050%	0,010%	0,004%	0,004%
75	0,070%	0,010%	0,004%	0,003%
85	0,096%	0,008%	0,005%	0,002%
117	0,164%	0,023%	0,010%	0,005%

3.0.3 Expansiones Dosificación N°3.

Las siguientes expansiones corresponden a la dosificación N°3, esta contiene 15% de Ceniza Volante, un 2,8% de SO₃, P₁Y₁ y son los promedios de las probetas según tratamiento.

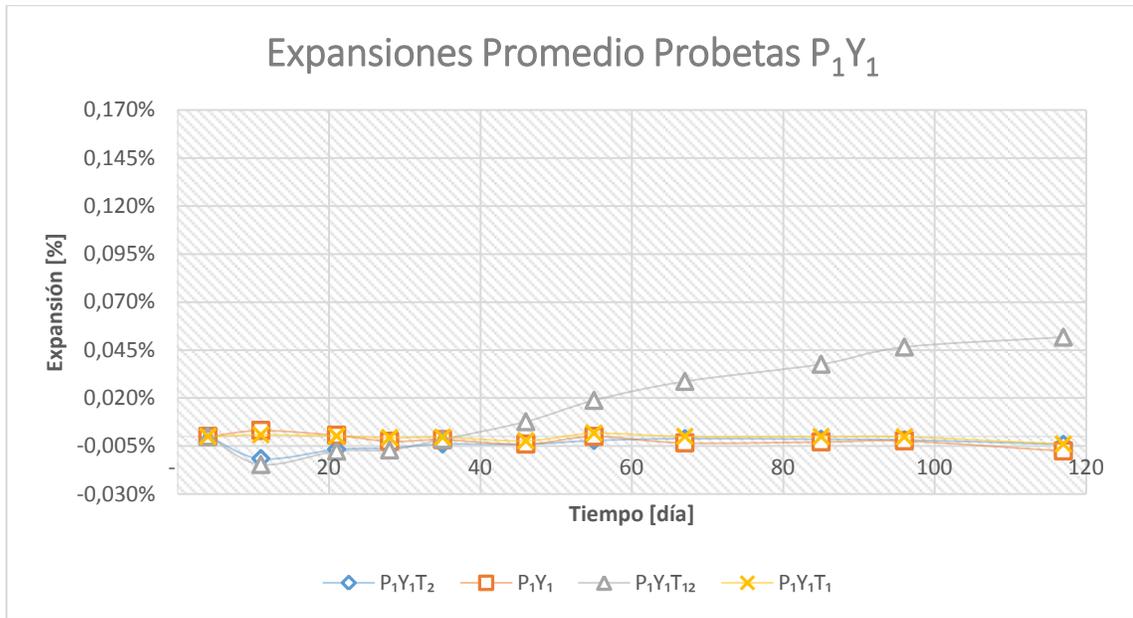


Figura 5-7: Grafico de Expansiones para P₁Y₁ [43]

Tabla 35: Expansiones de P₁Y₁

Expansiones P ₁ Y ₁				
Días	Etiquetas			
	P ₁ Y ₁ T ₁₂	P ₁ Y ₁ T ₁	P ₁ Y ₁ T ₂	P ₁ Y ₁
4	0,00%	0,000%	0,000%	0,000%
11	-0,015%	0,001%	-0,012%	0,003%
21	-0,008%	0,000%	-0,007%	0,001%
28	-0,007%	-0,001%	-0,006%	-0,003%
35	-0,002%	0,000%	-0,004%	-0,002%
46	0,008%	-0,002%	-0,004%	-0,004%
55	0,010%	0,002%	-0,002%	0,000%
67	0,029%	0,000%	-0,001%	-0,003%
85	0,038%	0,000%	-0,001%	-0,003%
96	0,047%	0,000%	-0,002%	-0,002%
117	0,052%	-0,004%	-0,004%	-0,008%

3.0.4 Expansiones Dosificación N°4.

Las siguientes expansiones corresponden a la dosificación N°4, esta contiene 15% de Ceniza Volante, un 3,5% de SO₃, P₁Y₂ y son los promedios de las probetas según tratamiento.

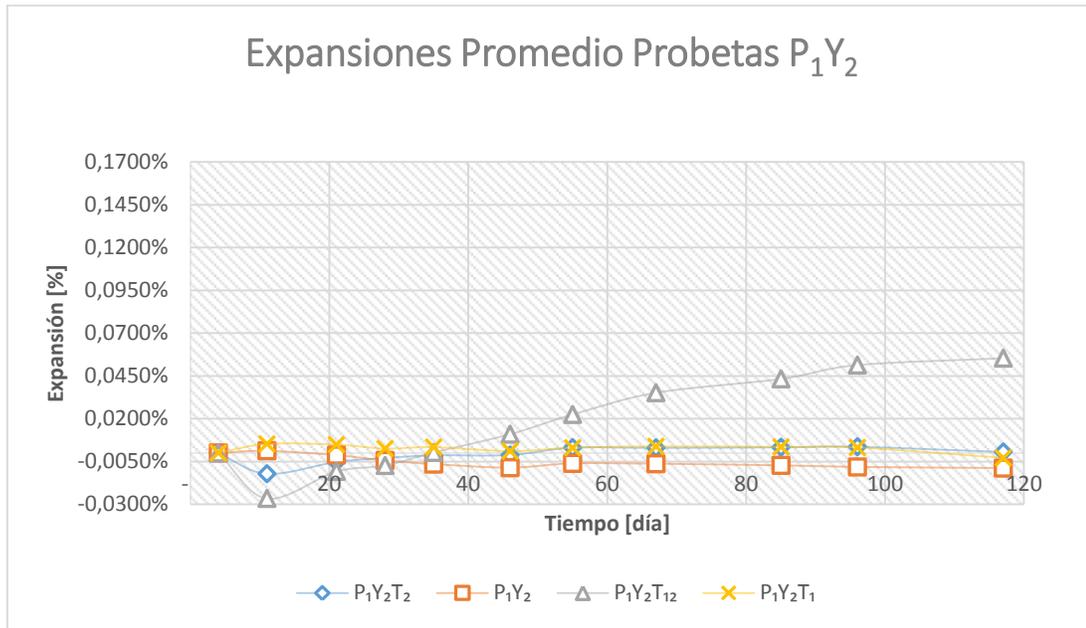


Figura 5-8: Gráfico de Expansiones para P₁Y₂ [44]

Tabla 36: Expansiones de P₁Y₂

Expansiones P ₁ Y ₂				
Días	Etiquetas			
	P ₁ Y ₂ T ₁₂	P ₁ Y ₂ T ₁	P ₁ Y ₂ T ₂	P ₁ Y ₂
4	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
11	-0,027%	0,005%	-0,012%	0,001%
21	-0,011%	0,005%	-0,005%	-0,001%
28	-0,007%	0,003%	-0,003%	-0,004%
35	0,000%	0,003%	-0,001%	-0,007%
46	0,011%	0,001%	-0,001%	-0,009%
55	0,022%	0,003%	0,003%	-0,006%
67	0,035%	0,004%	0,003%	-0,006%
85	0,043%	0,003%	0,003%	-0,007%
96	0,051%	0,003%	0,004%	-0,008%
117	0,055%	-0,003%	0,001%	-0,009%

3.0.5 Expansiones Dosificación N°5.

Las siguientes expansiones corresponden a la dosificación N°5, esta contiene 30% de Ceniza Volante, un 2,8% de SO₃, P₂Y₁ y son los promedios de las probetas según tratamiento.

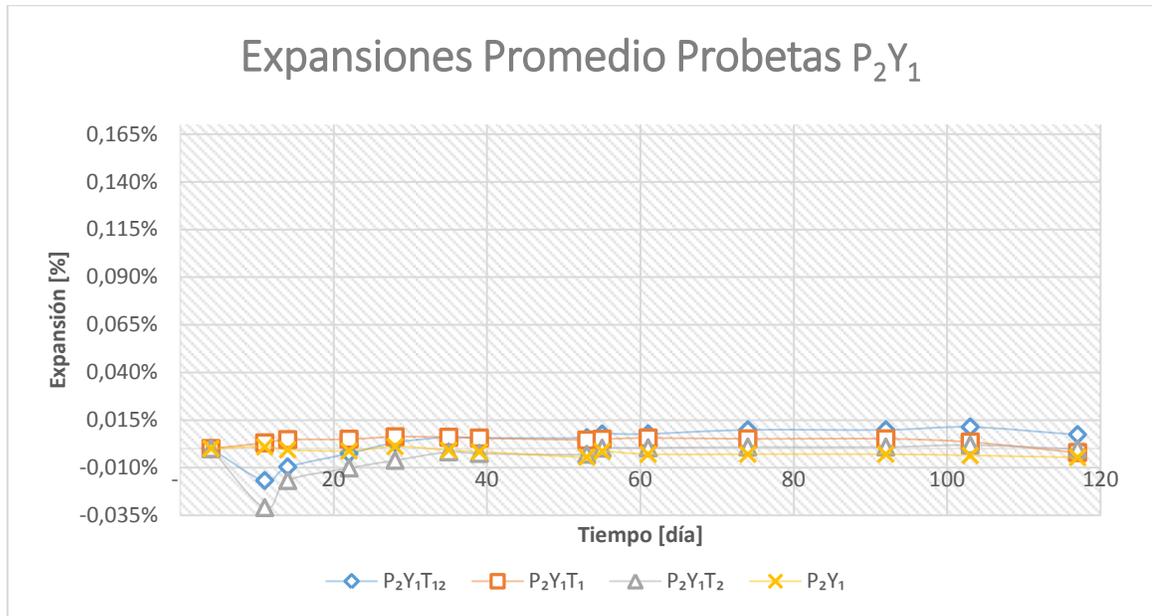


Figura 5-9: Grafico de expansiones de P₂Y₁. [45]

Tabla 37: Expansiones de P₂Y₁

Expansiones P ₂ Y ₁				
Días	Etiquetas			
	P ₂ Y ₁ T ₁₂	P ₂ Y ₁ T ₁	P ₂ Y ₁ T ₂	P ₂ Y ₁
4	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
11	-0,017%	0,003%	-0,031%	0,001%
14	-0,010%	0,005%	-0,017%	-0,001%
22	-0,003%	0,005%	-0,010%	-0,001%
28	0,003%	0,006%	-0,006%	0,001%
35	0,006%	0,006%	-0,002%	-0,001%
39	0,006%	0,006%	-0,003%	-0,002%
53	0,006%	0,004%	-0,003%	-0,004%
55	0,008%	0,005%	0,000%	-0,001%
61	0,008%	0,006%	0,000%	-0,003%
74	0,010%	0,005%	0,001%	-0,003%
92	0,010%	0,005%	0,001%	-0,003%
103	0,011%	0,003%	0,002%	-0,004%
117	0,007%	-0,002%	0,000%	-0,005%

3.0.6 Expansiones Dosificación N°6.

Las siguientes expansiones corresponden a la dosificación N°6, esta contiene 30% de Ceniza Volante, un 3,5% de SO₃, P₂Y₂ y son los promedios de las probetas según tratamiento.

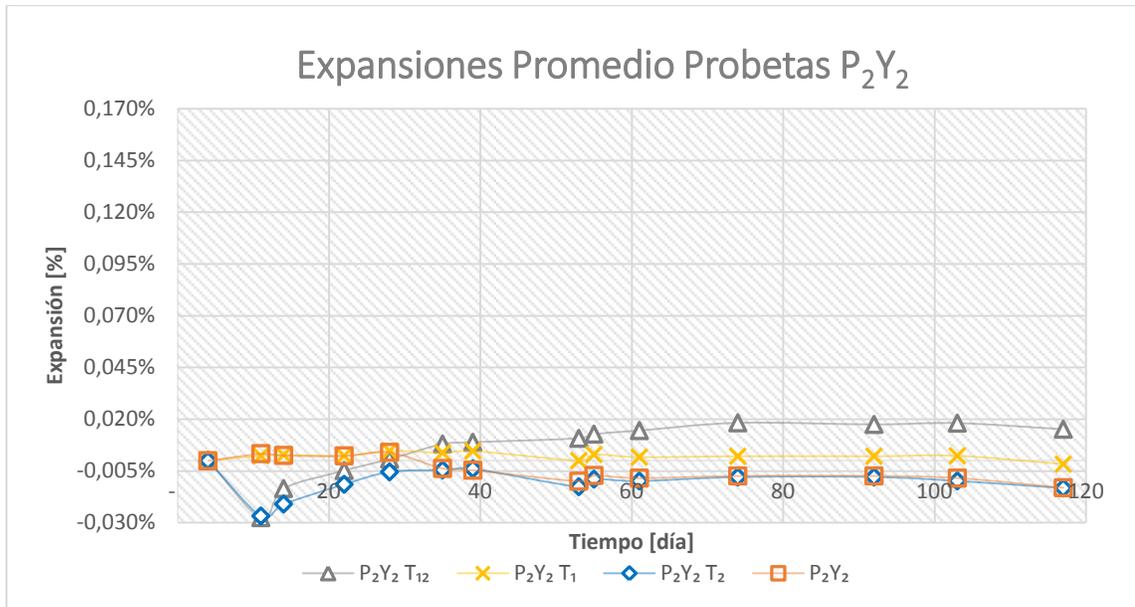


Figura 5-10: Grafico de expansiones para P₂Y₂ [46]

Tabla 38: Expansiones de P₂Y₂

Expansiones P ₂ Y ₂				
Días	Etiquetas			
	P ₂ Y ₂ T ₁₂	P ₂ Y ₂ T ₁	P ₂ Y ₂ T ₂	P ₂ Y ₂
4	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
11	-0,028%	0,002%	-0,027%	0,003%
14	-0,013%	0,003%	-0,021%	0,003%
22	-0,005%	0,002%	-0,011%	0,002%
28	0,001%	0,005%	-0,005%	0,004%
35	0,008%	0,004%	-0,005%	-0,004%
39	0,009%	0,005%	-0,004%	-0,005%
53	0,011%	0,000%	-0,013%	-0,010%
55	0,013%	0,003%	-0,009%	-0,007%
61	0,015%	0,002%	-0,010%	-0,008%
74	0,018%	0,002%	-0,008%	-0,007%
92	0,017%	0,002%	-0,008%	-0,007%
103	0,018%	0,002%	-0,010%	-0,008%
117	0,015%	-0,002%	-0,013%	-0,013%

3.0.7 Expansiones Dosificación N°7.

Las siguientes expansiones corresponden a la dosificación N°6, esta contiene 15% de Puzolana, un 2,8% de SO₃, P₃Y₁ y son los promedios de las probetas según tratamiento.

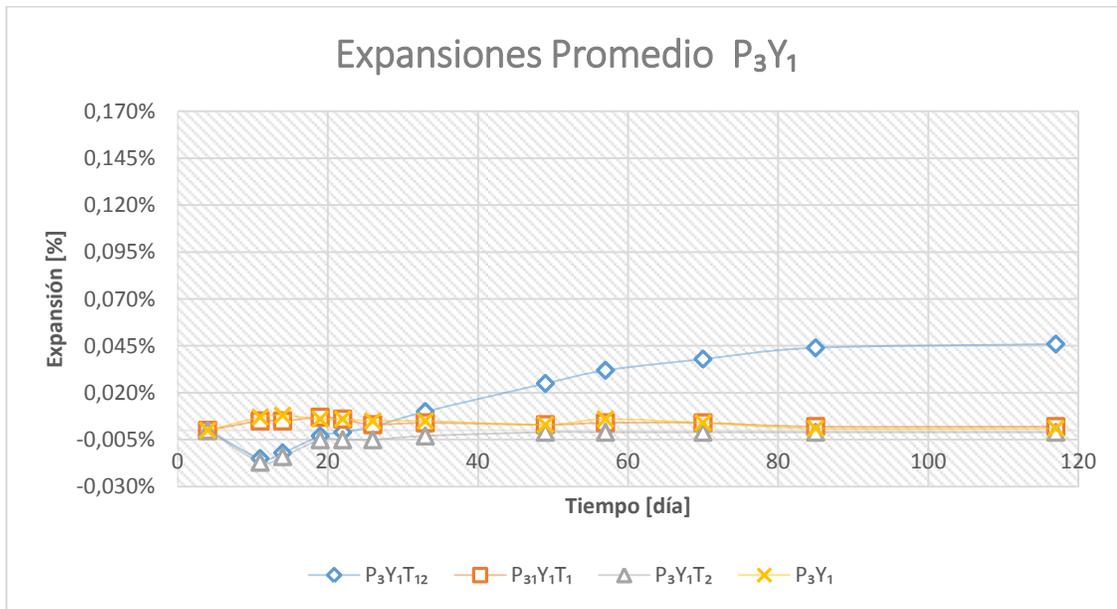


Figura 5-11: Grafico de Expansiones para P₃Y₁ [47]

Tabla 39: Expansiones de P₃Y₁

Expansiones P ₃ Y ₁				
Días	Etiquetas			
	P ₃ Y ₁ T ₁₂	P ₃ Y ₁ T ₁	P ₃ Y ₁ T ₂	P ₃ Y ₁
4	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
11	-0,015%	0,005%	-0,017%	0,007%
14	-0,012%	0,005%	-0,014%	0,008%
19	-0,003%	0,007%	-0,005%	0,006%
22	-0,001%	0,006%	-0,005%	0,006%
26	0,002%	0,003%	-0,005%	0,005%
33	0,010%	0,004%	-0,003%	0,005%
49	0,025%	0,003%	-0,001%	0,003%
57	0,032%	0,004%	-0,001%	0,006%
70	0,038%	0,004%	-0,001%	0,004%
85	0,044%	0,002%	-0,001%	0,001%
117	0,046%	0,002%	-0,001%	0,001%

3.0.8 Expansiones Dosificación N°8.

Las siguientes expansiones corresponden a la dosificación N°6, esta contiene 15% de Puzolana, un 3,5% de SO₃, P₃Y₂ y son los promedios de las probetas según tratamiento.

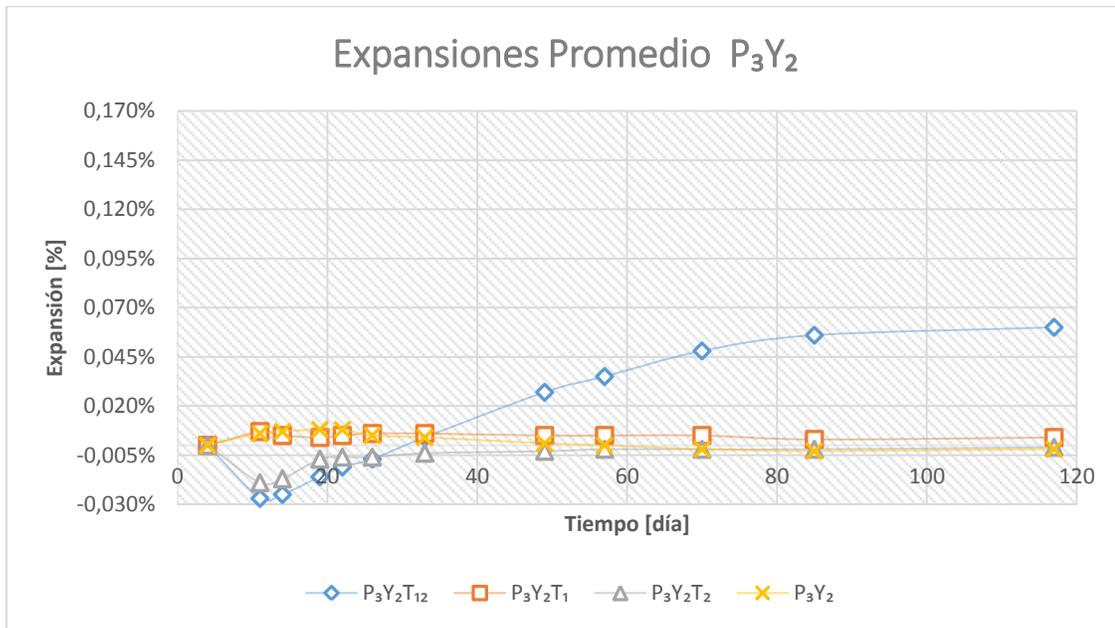


Figura 5-12: Grafico de Expansiones para P₃Y₂ [48]

Tabla 40: Expansiones para P₃Y₂.

Expansiones P ₃ Y ₂				
Días	Etiquetas			
	P ₃ Y ₂ T ₁₂	P ₃ Y ₂ T ₁	P ₃ Y ₂ T ₂	P ₃ Y ₂
4	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
11	-0,027%	0,007%	-0,019%	0,006%
14	-0,025%	0,005%	-0,017%	0,007%
19	-0,016%	0,004%	-0,007%	0,008%
22	-0,011%	0,005%	-0,006%	0,008%
26	-0,007%	0,006%	-0,006%	0,005%
33	0,004%	0,006%	-0,004%	0,004%
49	0,027%	0,005%	-0,003%	0,001%
57	0,035%	0,005%	-0,002%	0,000%
70	0,048%	0,005%	-0,002%	-0,002%
85	0,056%	0,003%	-0,002%	-0,003%
117	0,060%	0,004%	-0,001%	-0,002%

3.0.9 Expansiones Dosificación N°9.

Las siguientes expansiones corresponden a la dosificación N°6, esta contiene 30% de Puzolana, un 2,8% de SO₃, P₄Y₁ y son los promedios de las probetas según tratamiento.

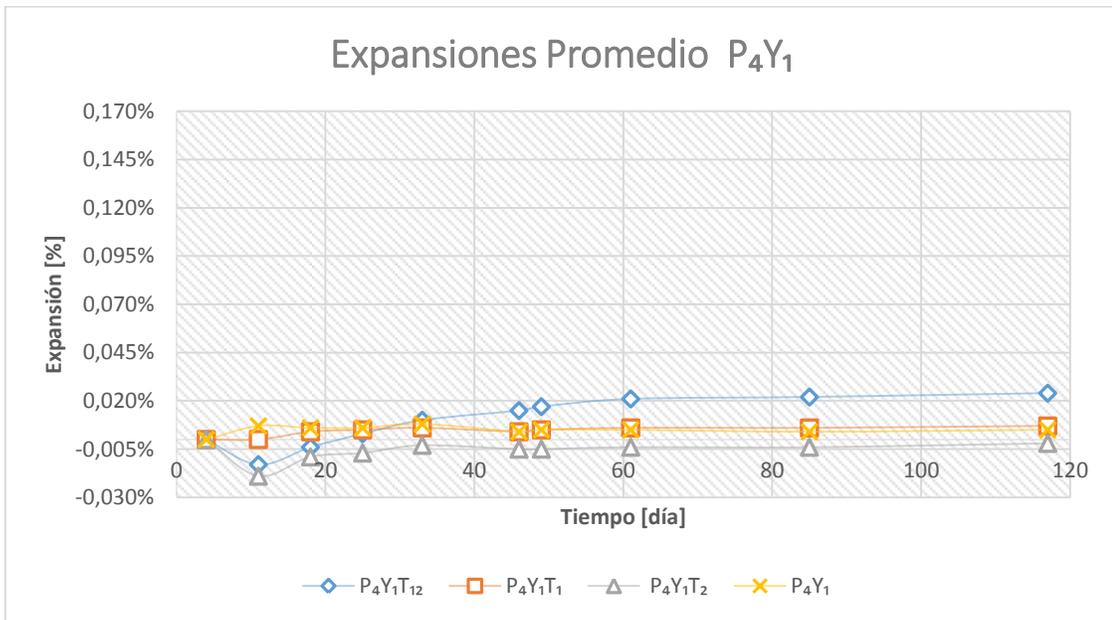


Figura 5-13: Grafico de expansiones de P₄Y₁. [49]

Tabla 41: Expansiones de P₄Y₁.

Expansiones P ₄ Y ₁				
Días	Etiquetas			
	P ₄ Y ₁ T ₁₂	P ₄ Y ₁ T ₁	P ₄ Y ₁ T ₂	P ₄ Y ₁
4	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
11	-0,013%	0,000%	-0,019%	0,007%
18	-0,004%	0,004%	-0,009%	0,006%
25	0,003%	0,005%	-0,007%	0,006%
33	0,010%	0,006%	-0,003%	0,008%
46	0,015%	0,004%	-0,005%	0,004%
49	0,017%	0,005%	-0,005%	0,005%
61	0,021%	0,006%	-0,004%	0,005%
85	0,022%	0,006%	-0,004%	0,004%
117	0,024%	0,007%	-0,002%	0,005%

3.0.10 Expansiones Dosificación N°10.

Las siguientes expansiones corresponden a la dosificación N°10, esta contiene 30% de Puzolana, un 3,5% de SO₃, P₄Y₂ y son los promedios de las probetas según tratamiento.

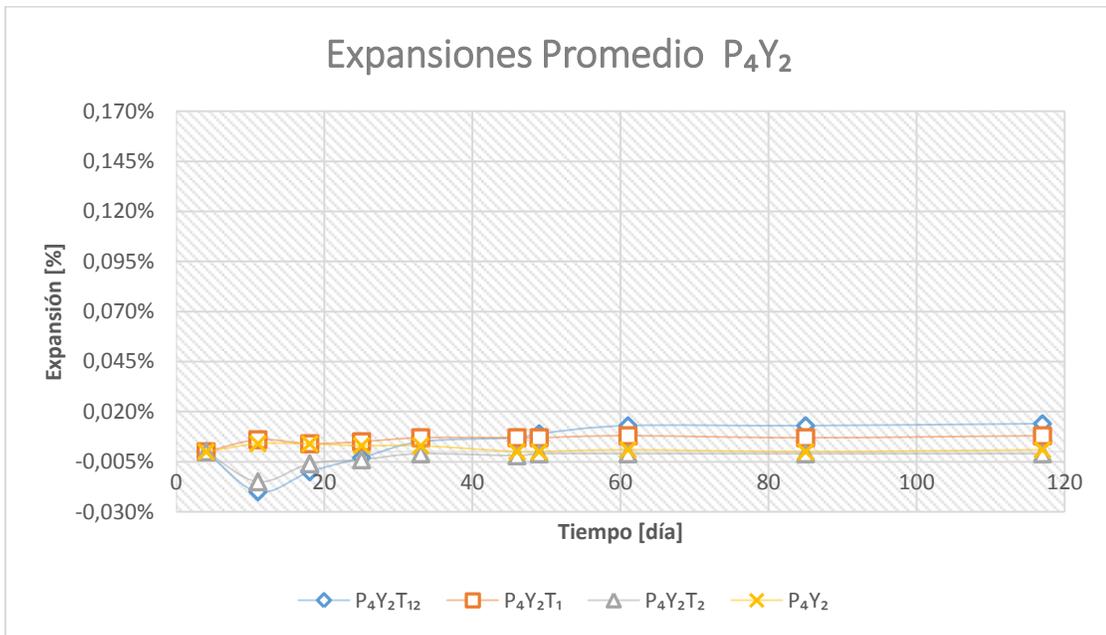


Figura 5-14: Grafico de expansiones para P₄Y₂ [50]

Tabla 42: Expansiones para P₄Y₂.

Expansiones P ₄ Y ₂				
Días	Etiquetas			
	P ₄ Y ₂ T ₁₂	P ₄ Y ₂ T ₁	P ₄ Y ₂ T ₂	P ₄ Y ₂
4	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
11	-0,020%	0,006%	-0,015%	0,004%
18	-0,010%	0,004%	-0,006%	0,004%
25	-0,003%	0,005%	-0,004%	0,003%
33	0,005%	0,007%	-0,001%	0,003%
46	0,007%	0,007%	-0,002%	0,000%
49	0,009%	0,007%	-0,001%	0,000%
61	0,013%	0,008%	-0,001%	0,001%
85	0,013%	0,007%	-0,001%	0,000%
117	0,014%	0,008%	-0,001%	0,001%

3.1 Comparación de Expansiones.

En el siguiente gráfico se puede apreciar la comparación de las mayores expansiones según dosificación, éstas corresponden a las probetas que tuvieron tratamiento de T_{12} y contenido de SO_3 de 3,5%.

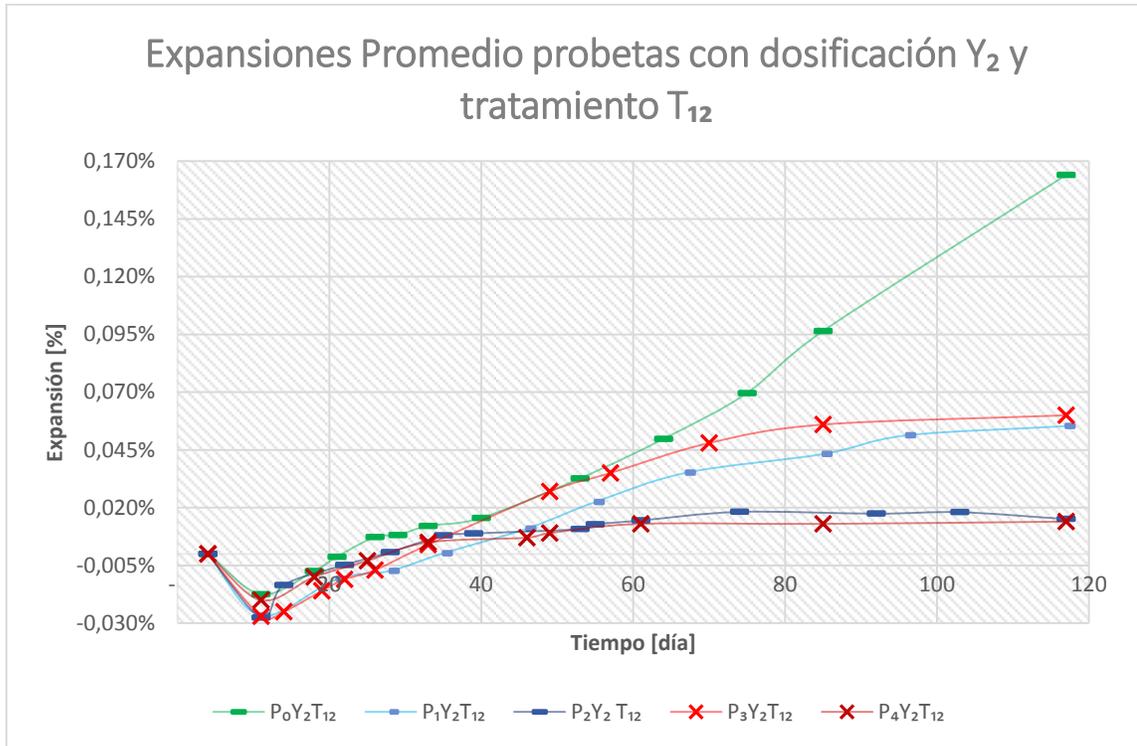


Figura 5-15: Gráfico de Expansiones para Probetas con Tratamiento T_{12} [51]

4.0 Microscopia de Barrido Electrónico SEM.

Para la realización de la microscopia de barrido, se extrajo una muestra de $1 \times 1 \times 0,5$ [cm] sacada de la probeta con mayor expansión, correspondiente P_0Y , con tratamiento T_{12} .

La realización de la microscopia tiene como fin encontrar la formación de etringita tardía.

A continuación los resultados obtenidos.

1.0.1 Primera Muestra.

A continuación se muestra la fotografía de una etringita tardía en crecimiento

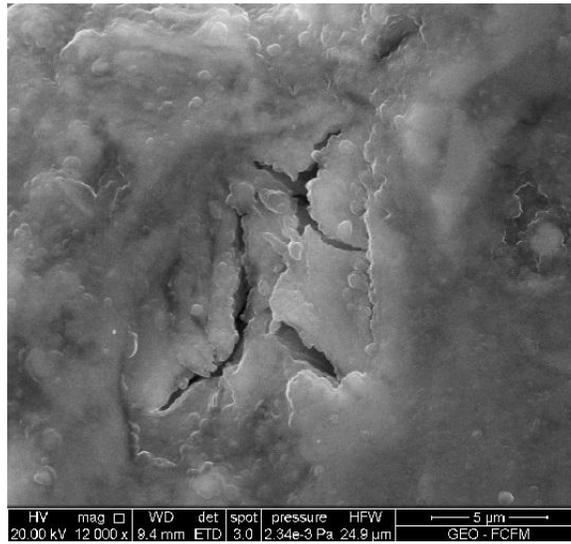


Figura 5-16: Imagen Microscópica de Barrido SEM a Primera Muestra P_0Y_2 , con tratamiento T_{12} . [52]

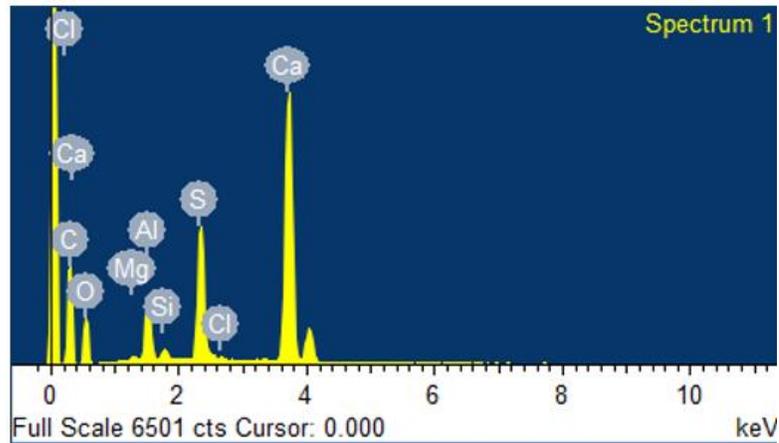


Figura 5-17: Espectroscopia de la primera muestra. [53]

Tabla 43: Composición de la primera muestra.

Elemento	Peso [%]	Atomico [%]
C	41,6	58,16
O	25,11	26,36
Mg	0,19	0,13
Al	3,02	1,88
Si	0,48	0,29
S	7,24	3,79
Cl	0,24	0,12
Ca	22,12	9,27
Total	100	100

1.0.2 Segunda Muestra

A continuación se muestra los resultados de una etringita encontrada en la superficie de la segunda muestra

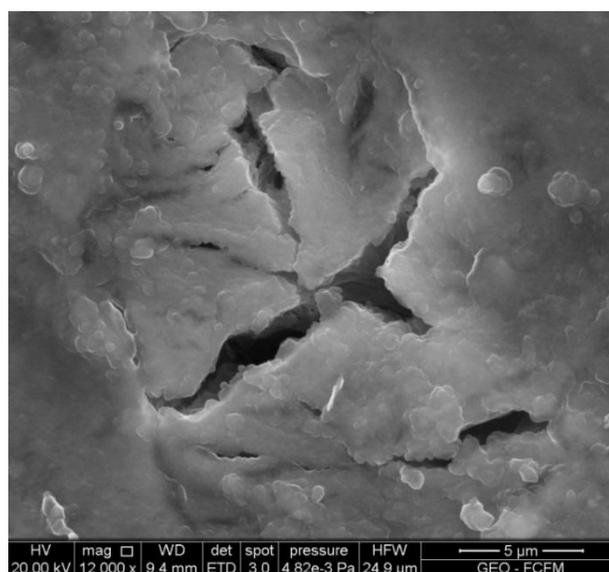


Figura 5-18: Imagen Microscópica de Barrido SEM a Segunda Muestra P_0Y_2 , con tratamiento T_{12} [54]

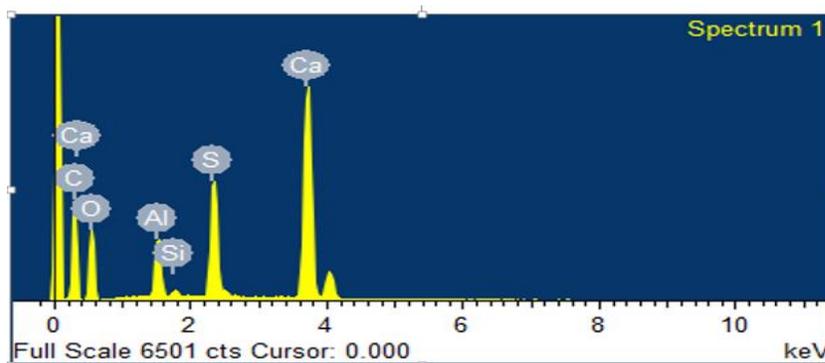


Figura 5-19: Espectroscopia de la Segunda Muestra [55]

Tabla 44: Composición Química de la Segunda Muestra

Elemento	Peso [%]	Atómico [%]
C	35,91	50,02
O	34,76	36,35
Al	2,99	1,86
Si	0,34	0,2
S	6,97	3,64
Ca	19,03	7,94
Total	100	100,01

CAPITULO VI: ANALISIS DE RESULTADOS

1.0 Propiedades del Hormigón.

En el siguiente punto se analizarán los resultados de los ensayos realizados a los hormigones, según dosificación.

1.0.1 Densidad del Hormigón Fresco

Según los datos tenemos que las densidades del Cemento Portland es de $3120 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$, Ceniza volante $2220 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$ y yeso de $2570 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$, por lo cual se notan dos diferencias, la primera diferencia es que por cada porcentaje de cemento remplazado por yeso, bajará la densidad del hormigón fresco, lo cual se ve reflejado en las dosificaciones que tienen igual contenido de ceniza, pero diferente de yeso, las dosificaciones con mayor contenido de yeso tienen una menor densidad; La segunda diferencia ocurre con las dosificaciones con distinta cantidad de ceniza volante, con la diferencia que en este caso es mayor la baja de la densidad, ya que la cantidad de cemento removido por ceniza volante es mayor, sumando que la ceniza tiene una densidad aún menor que la de yeso.

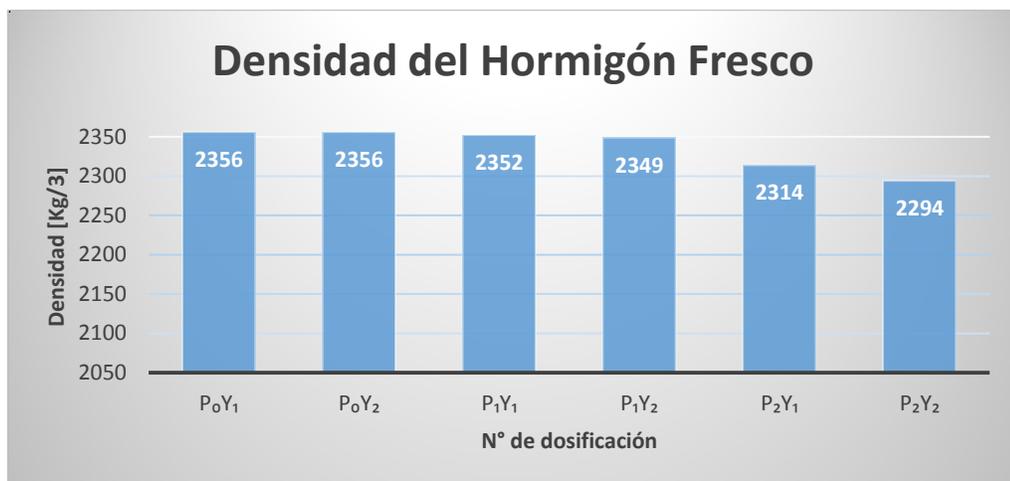


Figura 6-1: Grafico de Densidad del Hormigón Fresco. [56]

1.0.2 Asentamiento del Cono.

Existen dos diferencias notorias en el asentamiento de cono, la primera es que con mayor porcentaje de ceniza volante, disminuye el asentamiento del cono de Abram, esto se debe a que la ceniza volante, requiere una demanda de agua mayor que el cemento, haciendo al hormigón más consistente; La segunda es que a mayor cantidad de SO_3 , mayor el asentamiento del cono, esto se

debe a que el SO_3 actúa como retardador de fraguado, ya que aplaza el inicio de las reacciones de hidratación del cemento, por lo cual este pierde consistencia, además este efecto es menor a mayor cantidad de ceniza volante, ya que predomina el efecto producido por la ceniza volante que el yeso.

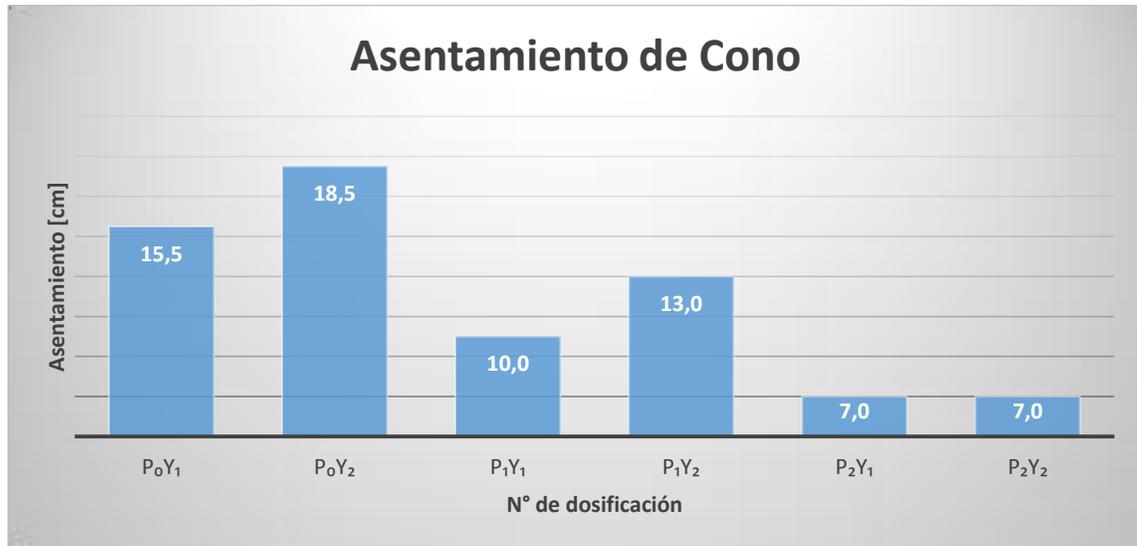


Figura 6-2: Grafico de Asentamiento de Cono[57]

1.2 Resistencia a la Compresión del Hormigón.

Se sabe que la incorporación de ceniza volante en el cemento ayuda a la resistencia a compresión del hormigón a largo plazo (mayores a 28 días), en este caso debido a las reacciones puzolánicas, las cuales son más lentas, no se logra apreciar una mejora en la resistencia del hormigón, aun a los 56 días, por lo que mientras mayor es la cantidad de cemento portland puro reemplazado por ceniza volante, menor será su resistencia a edades tempranas.

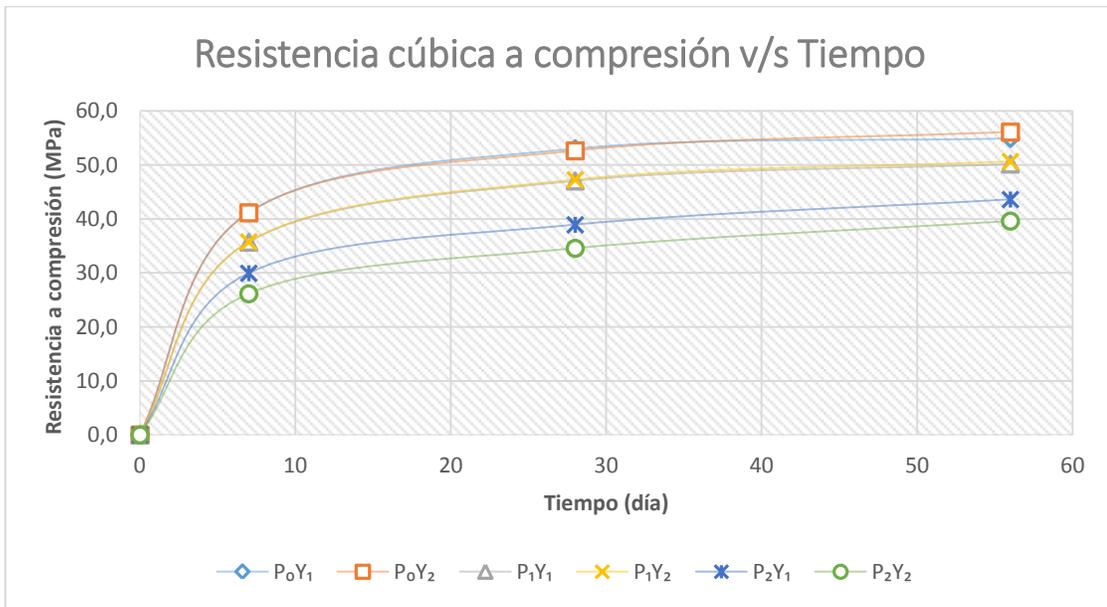


Figura 6-3: Grafico de Resistencia Cúbica a Compresión a 7,28 y 56 días. [58]

Tabla 45: Resistencia Cúbica a Compresión a 7, 28 y 56 días.

Dosificación	Resistencia a Compresión		
	R7 [Mpa]	R28 [Mpa]	R56 [Mpa]
P ₀ Y ₁	41,2	53,0	54,9
P ₀ Y ₂	41,2	52,6	56,1
P ₁ Y ₁	35,7	47,1	50,2
P ₁ Y ₂	35,8	47,3	50,6
P ₂ Y ₁	30,0	38,9	43,6
P ₂ Y ₂	26,2	34,6	39,6

2.0 Expansiones

Para todas las dosificaciones las cuales fueron sometidas al tratamiento 2, sufrieron contracciones entre 0,012-0,031% para el día 11 debido a la pérdida de agua durante el proceso. En el caso de las probetas sin tratamiento y con tratamiento 1 se puede apreciar que al día 11 éstas se han expandido levemente entre 0,001-0,008%

2.0.1 Expansiones de P_0

Podemos apreciar que para el día 18, las probetas T_{12} se desacoplan de las probetas T_2 , donde la probeta con T_{12} toma una pendiente ascendente, la cual no se detiene hasta el día 120, sobrepasando el resultado de 0,04% para considerar que las probetas son propensas a DEF según el método LPC N°66, en cambio la T_2 sigue la tendencia de las probetas sin tratamiento y con T_1 , de las cuales destaca T_2 para P_0Y_1 y T_1 para P_0Y_2 , las cuales logran una expansión levemente mayor, pero muy por debajo del límite para ser considerada susceptibilidad al fenómeno DEF.

Otro de los puntos destacables es la diferencia de expansiones para las probetas T_{12} Según la cantidad de yeso, para $P_0Y_1T_{12}$ la mayor expansión alcanzo el 0,059%, mientras que para $P_0Y_2T_{12}$ alcanzo un 0,164%, debido a que mientras mayor cantidad de yeso este incorporada en la mezcla, mayor será el contenido de sulfatos internos, favoreciendo las condiciones para la producción del fenómeno DEF.

2.0.2 Expansiones de P_1 .

Para esta cantidad de ceniza volante en la mezcla de cemento, las probetas se comportaron de manera muy similar, sin notar grandes diferencias debido a la cantidad de yeso, para el día 35, las probetas con T_{12} se desacopla de la T_2 , donde la probeta con T_{12} toma una pendiente ascendente, la cual no se detiene hasta la última medición, llegando a un 0,052% y 0,055% para el caso de la dosificación con mayor contenido de yeso, en cambio la T_2 sigue la tendencia de las probetas sin tratamiento y con T_1 , de las cuales se puede apreciar que no hubo expansiones significantes y permanecen prácticamente sin modificaciones, por lo cual T_{12} es el único tratamiento el cual se considera susceptibilidad a DEF.

En este caso no se puede analizar respecto a la cantidad de SO_3 ya que la diferencia no es lo suficientemente grande en términos de magnitud.

2.0.3 Expansiones de P_2

Esta cantidad de ceniza volante en la mezcla de cemento, fue la que obtuvo mejores resultados, ya que ninguna de las probetas se expandió considerablemente, llegando a un máximo para las

probetas T_{12} de 0,011-0,018% por lo que no hubo expansiones significantes y permanecieron prácticamente sin modificaciones, en consecuencia ninguno de los tratamientos se considera propenso al fenómeno DEF.

2.0.4 Expansiones de P_3

Para la incorporación de 15% de puzolana en el cemento solo obtuvieron expansiones mayores al 0,04% la serie de probetas con tratamiento T_{12} Las cuales se desacoplan del resto de las probetas el día 33, continuando su expansión hasta el día 70, con la diferencia que la serie un porcentaje mayor de SO_3 obtuvo una expansión levemente mayor.

2.0.5 Expansiones de P_4

Esta cantidad de puzolana en la mezcla obtuvo los mismos resultados satisfactorios que su análoga P_2 , ya que ninguna de las probetas logro una expansión considerable y muy por debajo del 0,04% para considerarlas susceptibles al fenómeno DEF.

2.0.6 Análisis de Expansiones para probetas con T_{12}

Según el método LPC N°66, ensayo más similar al utilizado a este experimento señala que las probetas con una expansión mayor al 0,04% son propensas a la formación de etringita tardía o fenómeno DEF.

Por lo cual en el figura 6-4 se puede observar el promedio de las probetas que tuvieron mayor expansiones (probetas con tratamiento T_{12} según) dosificación. Es notorio el efecto que produce el remplazo de cemento por ceniza volante o puzolana, el cual disminuye notoriamente las expansiones a medida que se aumenta la cantidad de ceniza, llegando a disminuir las expansiones entre 65-95% aproximadamente, en la Tabla 46 y figura 6-5 se puede apreciar las diferencias entre las probetas en porcentaje, para esto se utilizó el promedio de probetas con mayor expansión ($P_0Y_2T_{12}$) como referencia para compararlas con las otras dosificaciones con igual tratamiento.

En esta se destaca las dosificaciones P_2 y P_4 las cuales son las únicas que no pasaron el 0,04% de expansión, por lo cual no estarían susceptibles al fenómeno DEF.

Por otro lado se puede ver el efecto ya conocido del SO_3 , el cual provoca una mayor expansión mientras mayor sea la cantidad en los hormigones, afirmando que el fenómeno DEF es producido por ataque de sulfatos internos.

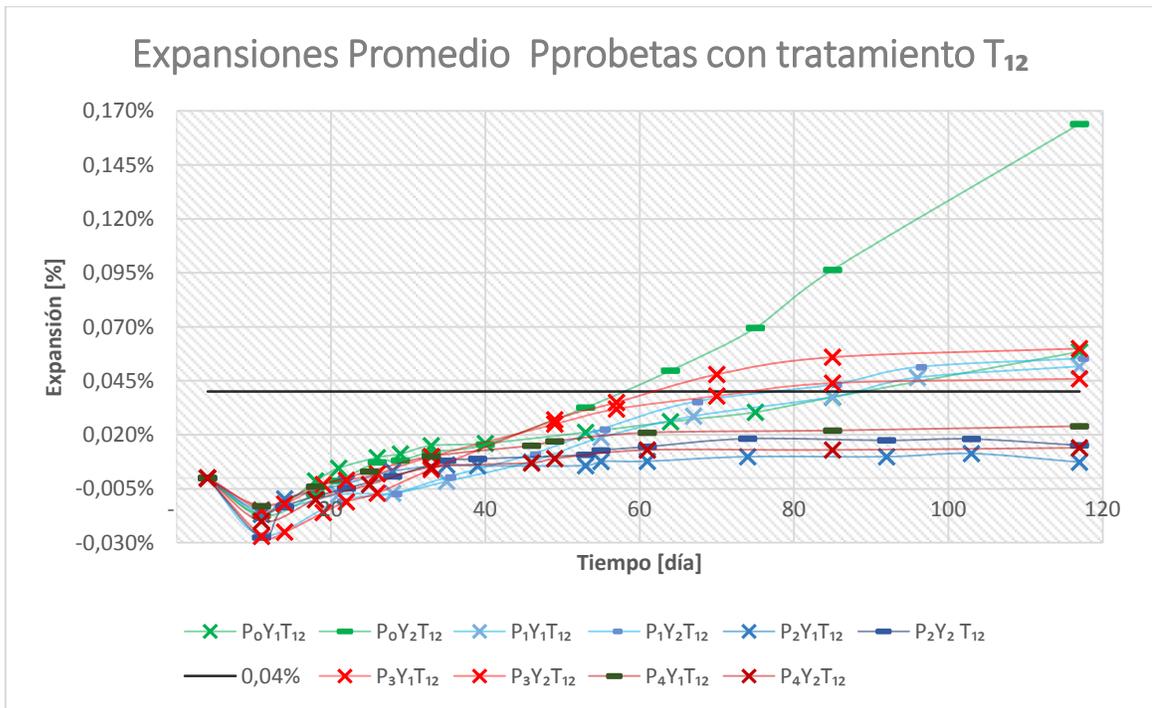


Figura 6-4: Expansiones para todas las dosificaciones con tratamiento T₁₂. [59]



Figura 6-5: Grafico de Expansiones a 120 días para todas las dosificaciones con tratamiento T₁₂. [60]

Tabla 46: Expansiones a 120 días para todas las dosificaciones con tratamiento T_{12} y la diferencia entre ellas [%].

Dosificación	Expansiones a 120 días	Diferencia de Expansión [%]
$P_0Y_1T_{12}$	0,059%	64%
$P_0Y_2T_{12}$	0,164%	0%
$P_1Y_1T_{12}$	0,052%	68%
$P_1Y_2T_{12}$	0,055%	66%
$P_2Y_1T_{12}$	0,007%	96%
$P_2Y_2T_{12}$	0,015%	91%
$P_3Y_1T_{12}$	0,05%	71%
$P_3Y_2T_{12}$	0,06%	63%
$P_4Y_1T_{12}$	0,02%	85%
$P_4Y_2T_{12}$	0,01%	91%

2.0.7 Comparación de Expansiones para probetas sin Tratamientos y Sometidas a T_2 .

En el siguiente grafico se puede observar el promedio de las probetas que no tuvieron tratamiento, con el promedio de probetas que solo tuvieron tratamiento 2, para P_0 , las cuales obtuvieron mayor expansión.

En esta se destaca las probetas a las cuales se les hizo el tratamiento T_2 ya que se comprobó la efectividad de este para dañar o microfisurar las probetas para beneficiar la expansión de estas, sin cambiar significativamente su comportamiento, por lo que el tratamiento 1 es esencial para impulsar la formación de etringita tardía.

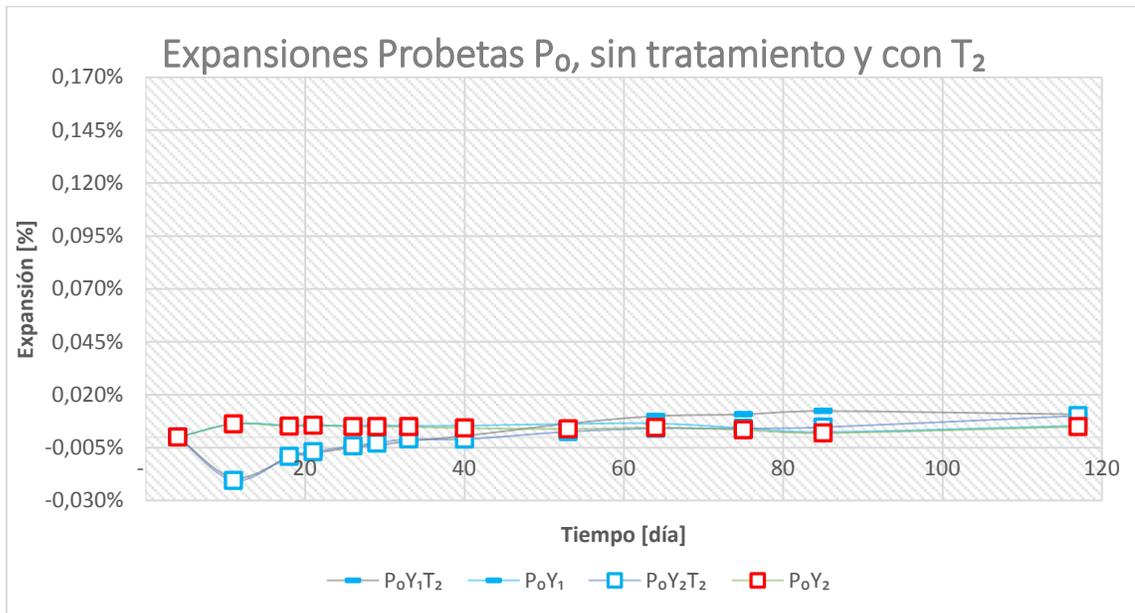


Figura 6-6: Grafico de Expansiones Probetas P_0 , sin tratamiento y con T_2 . [61]

3.0.9 Microscopia de Barrido Electrónico SEM.

En los resultados no se pudo encontrar etringita tardía en la interfaz de la pasta agregado, por la temprana edad de las probetas, pero se puede apreciar los altos contenidos de sulfatos en la primera y segunda muestra, estos corresponden a sulfoaluminatos de calcio, los cuales producen fuerzas expansivas en la formación de etringita tardía, las cuales superan la resistencia que la pasta de cemento es capaz de soportar, por lo que se agrieta.

CAPITULO VI: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este capítulo se expondrán una discusión sobre aspectos importantes y conclusiones obtenidas a partir del trabajo realizado.

Primero se sabe que los comienzos rápidos de fraguado producen resistencias más bajas, por ende aumenta la probabilidad de existencia de DEF, por otra parte, tiempos de fraguados más largos permiten la formación de etringita primaria y un adecuado desarrollo de resistencias, por lo que el tiempo mínimo recomendado para el inicio del curado térmico es de 2-4 horas.⁵¹ En este estudio se utilizó curado inicial a temperatura ambiente de 2 horas. Para dar paso al curado térmico. Por lo que se deja propuesto para siguientes investigaciones el estudio del efecto de variar el tiempo de espera antes del inicio del tratamiento térmico, el cual además va ligado al aumento de temperatura en los tratamientos, como se explica a continuación.

El aumento de temperatura para el curado térmico es otro punto a considerar en el ensayo, ya que el aumento excesivo y rápido de la temperatura, puede ocasionar perdidas excesivas de agua y fisuraciones no deseadas en el hormigón. Por lo que es recomendable realizar el aumento de temperatura de forma adiabática, esto se puede lograr con termocuplas en el núcleo de las probetas e ir subiendo la temperatura de tal forma que sea la misma tanto al interior como al exterior, además esta sería la condición más desfavorable para el hormigón, ya que no habrían perdidas de calor, también se recomienda que la humedad relativa sea del 100%.

De acuerdo a lo mencionado en el presente estudio se realizó un análisis comparativo para 10 diferentes dosificaciones, en las cuales se varió la cantidad de SO_3 y porcentaje de ceniza volante o puzolana en la mezcla de cemento, a las cuales se le realizaron diferentes tratamientos conforme al método propuesto por Duggan y LPC N°66 con el fin de medir sus expansiones y verificar la eficiencia de las adiciones para inhibir el fenómeno de etringita tardía DEF, dado esto se pudo concluir que:

- El uso de la ceniza volante o puzolana en el cemento ayuda a inhibir el fenómeno DEF, su eficiencia depende de la cantidad utilizada.

⁵¹ Skalny, J., Johansen, V., Thaulow, N., & Palomo, A. (1996). DEF: As a form of sulfate attack. *Materiales de construccion*, 46(244), 5-29.

- Dado los resultados obtenidos ambas adiciones se desempeñaron de manera muy similar y prácticamente sin diferencias en términos de inhibición del fenómeno y expansiones, la única diferencia destacable entre ellas es que la puzolana es un producto natural de Chile el cual necesita una molienda para ser utilizada y por ende un costo asociado, mientras que la ceniza volante es un desecho de termo eléctricas el cual solo necesita un tamizado.
- Se puede concluir que aunque el aumento de temperatura sobrepase los 70°C en la pasta, no es obligatoriamente una razón para la formación de etringita tardía, ya que se obtuvieron resultados en el cual mezclas de cementos con 30% de adición (ceniza volante o puzolana), no son susceptibles a DEF al estar expuestos a estas temperaturas.
- Se logró aplicar una metodología para realizar comparaciones entre diferentes dosificaciones y verificar si son susceptibles al fenómeno DEF.
- La incorporación de ceniza volante o puzolana en el cemento ayuda a disminuir el costo total de la construcción, ya que las cenizas volantes al ser un desecho tiene un menor costo que el cemento y no afecta negativamente en su rendimiento, sino al contrario, incrementa su durabilidad, por lo que disminuirá futuros costos por reparaciones o sustituciones en el hormigón.
- La incorporación de puzolana al igual que la ceniza volante tiene un costo menor al del cemento y es un producto natural en Chile.
- Para las dosificaciones con 30% de ceniza volante o puzolana se pudo ver que prácticamente no tuvieron expansiones y estuvieron muy por debajo del 0,04% indicado por el método análogo LPC N°66 para considerar que es susceptible a DEF, esta dosificación en comparación a las probetas P₀Y₂T₁₂ (con mayores expansiones) tuvieron una disminución en las expansiones entre 85-96%. No se pudo establecer una relación entre la cantidad de SO₃ y las expansiones, aunque las probetas con mayor cantidad de SO₃ se expandieron más, no es de una suficiente magnitud para concluir, esto dado que los efectos causados por la incorporación de la ceniza volantes (30% del material cementicio) son más notorios que los provocados por el contenido de SO₃.
- Para las dosificaciones con 15% de ceniza volante o puzolana se alcanzan expansiones superiores al 0,04% para ambas cantidades de SO₃, por lo que se consideran susceptible a DEF, esta dosificación en comparación a las probetas P₀Y₂T₁₂ (con mayores Expansiones) tuvieron una disminución en las expansiones entre 63-71%. En este caso se pudo establecer una relación entre la cantidad de SO₃ y las expansiones aunque de una

magnitud baja, las probetas con mayor cantidad de SO_3 se expandieron más, aunque las expansiones no tienen una gran diferencia, debido a que prevalece el efecto causado por la incorporación de la adición.

- Para las dosificaciones con 0% de ceniza volante o puzolana se alcanzan expansiones superiores al 0,04% para ambas cantidades de SO_3 , por lo que se consideran susceptible a DEF, en esta destaca las probetas $P_0Y_2T_{12}$ las cuales llegaron a un 0,165% de expansión. En este caso si se puede apreciar el efecto producido por la cantidad de SO_3 , las expansiones de las probetas $P_0Y_1T_{12}$ son 64% menos que las probetas $P_0Y_2T_{12}$, Afirmando que este fenómeno se produce por ataque de sulfatos internos.
- A pesar que las probetas con tratamiento 2 sufren una contracción inicial, producto de la pérdida de agua que sufre, no varía el comportamiento de las probetas y se obtienen expansiones similares a las probetas sin tratamiento. De la misma forma ocurre con el tratamiento 1, pero sin sufrir contracciones, esto confirma la importancia del tratamiento 1 y 2 como un conjunto, ya que solo con T_{12} se logró obtener resultados significativos y acelerar el proceso.
- De acuerdo a la microscopia de barrido electrónico SEM, se logró confirmar la presencia y formación de la etringita en las probetas.
- No se logró obtener resultados aceptables respecto a la resistencia a compresión adquirida por las cenizas volantes y puzolana debido a que los ensayos realizados fueron a edades relativamente tempranas y no a largo plazo, por lo que no se obtuvo mejora en la resistencia.

CAPITULO V: BIBLIOGRAFIA

- F. Tapia. (2015). Vulnerabilidad de los hormigones masivos frente al fenómeno expansivo por formación de etringita tardía, en función del contenido de puzolana en cementos nacionales
- Montecinos Cuadros, H. (2012). Hormigones masivos: influencia inhibidora de las adiciones incorporadas al cemento Portland sobre el fenómeno expansivo DEF. Universidad De Chile.
- NANAYAKKARA, A. (2011). Importance of controlling temperature rise due to heat of hydration in massive concrete elements. Society For Social Management Systems.
- E. Grabowski et al. (1992), Rapid Test of Concrete Expansivity Due to Internal Sulfate Attack, Materials Journal
- Diamond, S. (1986). The microstructure of cement paste in concrete. Proc. 8th Int. Congr. Chem. Cement, Rio de, 122-147.
- WOLFGANG, C. (1963). La Química del cemento. Ed. Palestra, Barcelona.
- Diamond, S. (1996). Delayed ettringite formation—processes and problems. Cement and Concrete Composites, 18(3), 205-215.
- Diamond, S. (2002). Delayed ettringite formation—a current assessment. Proc. Int. RILEM TC, 178-194.
- Taylor, H. F. W., Famy, C., & Scrivener, K. L. (2001). Delayed ettringite formation. Cement and Concrete Research, 31(5), 683-693.
- NCh0147 Of.69 Cemento - Análisis Químico. (1969). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh0148 Of.68 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales. (1968). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh0152 Of.71 Cemento - Método de determinación del tiempo de fraguado. (1971). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh0154 Of.69 Cemento - Determinación del peso específico relativo. (1969). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh0159 Of.70 Cemento - Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine. (1970). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh0161 Of.69 Cemento - Puzolana para uso en cementos - Especificaciones. (1969). Instituto Nacional de Normalización.

- NCh0163 Of.79 Áridos para morteros y hormigones - Requisitos. (1979). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh0165 Of.1977 Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría. (1977). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh1017 Of.2009 Hormigón - Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento. (2009). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh1018 Of.2009 Hormigón - Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio. (2009). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh1019 Of.2009 Hormigón- Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams. (2009). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh1037 Of.2009 Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. (2009). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh1116. Of.2008 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente. (2008). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh1117 Of.2010 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las gravas. (2010). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh1239 Of.2009 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas. (2009). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh1326 Of.2012 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de huecos. (2012). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh1564 Of.2009 Hormigón - Determinación de la densidad aparente del hormigón fresco. (1979). Instituto Nacional de Normalización.
- NCh2184 Of.1992 Hormigón y mortero - Métodos de ensayo - Determinación del contenido de aire. (1992). Instituto Nacional de Normalización.
- LCPC. (2007). LPC Test Method n°66 : Reactivity of a concrete mix design with respect to the delayed ettringite formation - Performance testing.
- LCPC. (2009). Recommendations for preventing disorders due to delayed ettringite formation. Guide technique of the laboratoires des ponts et chaussées.