



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

VULNERABILIDAD DE LOS HORMIGONES MASIVOS FRENTE AL FENÓMENO
EXPANSIVO POR FORMACIÓN DE ETRINGITA TARDÍA, EN FUNCIÓN DEL
CONTENIDO DE PUZOLANA EN CEMENTOS NACIONALES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO JAVIER TAPIA PARADA

PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFIN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL GONZÁLEZ TALEP
MIGUEL FIGUEROA NEICUN

SANTIAGO DE CHILE
2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Ingeniero Civil
POR: Francisco Javier Tapia Parada
FECHA: 10/07/2015
PROFESOR GUÍA: Federico Delfin Ariztía

VULNERABILIDAD DE LOS HORMIGONES MASIVOS FRENTE AL FENÓMENO EXPANSIVO POR FORMACIÓN DE ETRINGITA TARDÍA, EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE PUZOLANA EN CEMENTOS NACIONALES.

El fenómeno expansivo por formación de etringita tardía en etapa de hormigón endurecido, es un factor a considerar cuando se diseña el hormigón de un elemento estructural de grandes dimensiones, o que por su alta dosificación de material cementicio es necesario considerar los efectos de la generación de calor de hidratación asociada. La aparición de este fenómeno provoca agrietamiento y pérdida de resistencia del hormigón años más tarde del vaciado (2 a 20 años), y se relaciona directamente con altas temperaturas en la etapa inicial de endurecimiento al interior del elemento (núcleo), debido al calor generado por las reacciones de hidratación del material cementicio. Para controlar la temperatura a edades tempranas (que cuando superan los 70 °C, se sabe, puede dar origen a un proceso de transformación del sulfoaluminato de calcio hidratado (etringita) en un monosulfoaluminato de calcio hidratado disperso en la matriz cementicia del hormigón) se toman diversas consideraciones, las cuales están enfocadas en mantener la etringita en un rango de temperatura en el que ésta se mantenga estable.

Es deseable desde el punto de vista del proceso constructivo, poder liberarse de estas restricciones, estudiando posibles variaciones a la composición del material cementicio o la incorporación de adiciones, que actúen como inhibidoras de la transformación de la etringita primaria bajo condiciones de curado a altas temperaturas. En el presente trabajo se estudia el efecto de la incorporación de puzolana en reemplazo de cemento portland, como parte del material cementicio, a través de ensayos experimentales, en los que se intenta simular de forma acelerada, el comportamiento durante la etapa de servicio, de un hormigón sometido a altas temperaturas a edades tempranas.

A partir de los resultados obtenidos en un periodo de ensayo de 120 días se observa que, al utilizar un material cementicio compuesto con 70% de cemento portland y 30% de puzolana con finura similar a la del cemento portland base, manteniendo el contenido de SO_3 dentro del rango típico entre 2,8% a 3,5%, es posible controlar el fenómeno expansivo por formación de etringita tardía. Las probetas que utilizaron este material cementicio, se mantuvieron por debajo de las expansiones sugeridas como indicadoras de potenciales problemas por formación de etringita tardía durante la etapa de servicio.

Para mis Padres, Marcela y Carlos.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Marcela y Carlos, por ser mi ejemplo de vida, quererme tanto y apoyarme siempre. Este logro es en gran medida de ustedes. A mi abuela Hilde por estar con mi familia siempre. A mis hermanas Carla y Elen, tío César, tía Hellen y tío Patricio.

A mi profesor guía don Federico Delfín por su apoyo y dedicación para poder realizar este trabajo. A los miembros de mi comisión, don Miguel Ángel González y don Miguel Figueroa por su interés en la presente memoria.

A mis amigos de plan común, Simón, Igor, Álvaro y Nicolás, por los gratos momentos que hemos vivido.

A mis amigos de Ingeniería Civil, Nicolás, Gonzalo, Hernán, Ary, Esteban y Sebastián, por compartir tantos momentos juntos. Especialmente a Felipe Parra, por ayudarme a conseguir materiales, realizar ensayos y parte importante de esta memoria.

A Idiem, por facilitarme sus instalaciones, ensayos y por proveerme de materiales, además de permitirme conocer gente tan valiosa, que me ayudaron durante la realización de este trabajo, como Pablo Sandoval, Luis Pulgar, Jacques Bornand, Bastian Mellado, Jaime Bravo, Pablo Villar y Francisco Agüero.

A Julio Diaz, encargado del taller de cortes del Departamento de Geología.

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

A don Claudio Olate, por proporcionarme materiales para la confección de los hormigones.

En general a todas las personas, que de una u otra forma, me permitieron desarrollar este trabajo de título.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo I : Introducción	1
I.1 Presentación del tema.....	1
I.2 Objetivos	2
I.2.1 Objetivos Generales.	2
I.2.2 Objetivos Específicos.	2
Capítulo II : Antecedentes.....	3
II.1 Introducción.....	3
II.2 Hormigones Masivos	3
II.3 Formación de Etringita Tardía (Fenómeno DEF)	8
II.3.1 Introducción	8
II.3.2 Etringita en la pasta de cemento y hormigón	9
II.3.3 Química del DEF.....	10
II.3.4 Expansiones producto de DEF	11
II.3.5 Mecanismo de agrietamiento debido a DEF	12
II.3.6 Efecto de la incorporación de puzolana en el DEF	15
II.3.7 Principales parámetros asociados con el DEF	17
II.3.8 Consideraciones durante la construcción	18
II.3.9 Casos donde se ha observado el fenómeno.....	19
II.3.10 Detección del fenómeno	31
Capítulo III : Estudio Experimental	37
III.1 Introducción.....	37
III.2 Desarrollo del trabajo experimental.....	39
III.2.1 Caracterización de los Materiales.....	39
III.2.2 Material Cementicio	43

III.2.3	Materialización y acondicionamiento de molde y probetas.....	45
III.2.4	Dosificación del hormigón.....	48
III.2.5	Confección de los hormigones.....	48
III.2.6	Llenado de Moldes.....	49
III.2.7	Curado Inicial	50
III.2.8	Aserrado de la Loseta	51
III.2.9	Medición inicial de las probetas	53
III.2.10	Ciclos Humedecimiento Secado (C.H.S.)	53
III.2.11	Almacenamiento y medición de las expansiones.....	55
III.2.12	Resistencia a compresión	55
III.2.13	Microscopía de barrido electrónico (SEM)	55
III.2.14	Resumen.....	57
III.3	Resultados	62
III.3.1	Propiedades de los hormigones confeccionados	62
III.3.2	Comportamiento de los hormigones en estudio en el ensayo Duggan modificado	64
Capítulo IV	: Análisis de Resultados	71
IV.1	Propiedades de los materiales cementicios	71
IV.1.1	Propiedades físicas	71
IV.1.2	Composición química de los cementos en estudio	72
IV.2	Propiedades de los hormigones.....	74
IV.2.1	Propiedades en estado fresco.....	74
IV.2.2	Propiedades en estado endurecido.....	76
IV.3	Comportamiento de los distintos hormigones estudiados en el ensayo de expansión	77
IV.3.1	Hormigón P_2,8_0	77

IV.3.2	Hormigón P_3,5_0	79
IV.3.3	Hormigón PP_2,8_15	80
IV.3.4	Hormigón PP_3,5_15	81
IV.3.5	Hormigón PP_2,8_30	82
IV.3.6	Hormigón PP_3,5_30	83
IV.4	Comparación expansiones obtenidas tratamiento 1.A	84
IV.4.1	Observaciones generales.....	84
IV.4.2	Expansiones al término del ensayo	84
IV.4.3	Hormigón P_3,5_0	87
IV.4.4	Hormigón PP_2,8_30 y Hormigón PP_3,5_30	90
Capítulo V :	Conclusiones	91
Capítulo VI :	Bibliografía	93

INDICE DE TABLAS

Tabla II-1. Composición de óxidos de Puzolana Argelina (Nguyen, Leklou, Aubert, & Mounanga, 2013).....	16
Tabla II-2. Tabla resumen de los hallazgos.	24
Tabla II-3. Composición química del cemento utilizado en la fabricación de durmientes.	27
Tabla III-1. Propiedades físicas cemento portland puro.	39
Tabla III-2. Propiedades químicas cemento portland puro.....	39
Tabla III-3. Óxidos principales cemento portland puro.....	39
Tabla III-4. Propiedades físicas puzolana Pudahuel.	40
Tabla III-5. Composición química puzolana Pudahuel.	40
Tabla III-6. Actividad Puzolánica puzolana Pudahuel.	40
Tabla III-7. Propiedades Físicas Yeso.	41
Tabla III-8. Granulometría de los Áridos.....	41
Tabla III-9. Propiedades Físicas de los Áridos.....	43
Tabla III-10. Propiedades Físicas de los Áridos.....	43
Tabla III-11. Materiales cementicios confeccionados para su estudio.....	44
Tabla III-12. Proporciones utilizadas en la confección de los materiales cementicios.....	44
Tabla III-13. Dosificación tipo.	48
Tabla III-14. Resistencia a compresión de hormigones en estudio a diferentes edades.	63
Tabla III-15. Expansión probetas hormigón P_2,8_0.....	65
Tabla III-16. Expansión probetas hormigón P_3,5_0.....	66
Tabla III-17. Expansión probetas hormigón PP_2,8_15.	67
Tabla III-18. Expansión probetas hormigón PP_3,5_15.	68

Tabla III-19. Expansión probetas hormigón PP_2,8_30.	69
Tabla III-20. Expansión probetas hormigón PP_3,5_30.	70
Tabla IV-1. Peso Específico y Superficie Específica de los materiales cementicios en estudio.	71
Tabla IV-2. Óxidos principales de los materiales cementicios.	72
Tabla IV-3. Composición mineralógica de los materiales cementicios.	73
Tabla IV-4. Expansiones y tasa de expansión al término del periodo de estudio para el tratamiento 1.A (Duggan Modificado).	85
Tabla IV-5. Composición del área señalada en la figura IV-16.	88
Tabla IV-6. Composición del área señalada en la figura IV-18.	89

INDICE DE FIGURAS

Figura II-1. Hormigón Masivo. (Cement.org, 2015).....	4
Figura II-2. Evolución de la temperatura en el tiempo para un elemento de hormigón masivo (Fernández, 2009).....	5
Figura II-3. Evolución del gradiente térmico en el tiempo para un hormigón masivo H-35(90)-20-09. (Fernández, 2009)	5
Figura II-4. Columnas y fundaciones del James River Bridge que corresponden a hormigones masivos (Cement.org, 2015).	6
Figura II-5. Agrietamiento térmico (Cement.org, 2015).....	6
Figura II-6. Mantas de aislamiento sobre una columna de concreto (Cement.org, 2015).	7
Figura II-7. Expansión lineal para un mortero curado inicialmente a 20°C y otro curado a 100°C seguido de un almacenamiento en piscina a temperatura ambiente. Adaptado por Yang et al. (Yang, Lawrence, Lynsdale, & Sharp, 1999)	8
Figura II-8. Expansión uniforme de la pasta genera espacios entre el agregado y la pasta de cemento (NANAYAKKARA, 2011).	12
Figura II-9. Formación de un borde alrededor del agregado en un hormigón afectado por el fenómeno DEF (NANAYAKKARA, 2011).	13
Figura II-10. Agrietamiento de un encepado producto de la expansión del núcleo del elemento debido al fenómeno DEF (NANAYAKKARA, 2011).	13
Figura II-11. Diagrama esquemático donde se ilustra el mecanismo sugerido de expansión de la pasta en un mortero que se expande producto de DEF. Las áreas sombreadas representan todas las otras fases que no son monosulfato y etringita. Áreas en blanco representan poros (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001).	14
Figura II-12. La expansión no uniforme de la pasta produce grietas en la pasta y en la interfaz pasta agregado. Etringita y portlandita recristaliza en estas grietas sin contribuir significativamente en la expansión (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001).	15
Figura II-13. Tratamiento térmico aplicado a las probetas de mortero (Nguyen, Leklou, Aubert, & Mounanga, 2013).....	16

Figura II-14. Expansión de morteros preparados con diferentes finuras de puzolana. (Nguyen, Leklou, Aubert, & Mounanga, 2013)	16
Figura II-15. Extremo de durmiente que muestra una red de grietas causadas por DEF (LCPC, 2009).	20
Figura II-16. Vista general de un puente con una viga transversal afectada por DEF (LCPC, 2009).....	20
Figura II-17. Agrietamiento multidireccional localizado en la cara vertical, en las extremidades de la viga mostrada en la figura anterior (LCPC, 2009)..	20
Figura II-18. Aspecto de las columnas luego de 15 años de servicio (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).....	22
Figura II-19. Expansión de testigos de 50 mm de diámetro, en almacenamiento en agua con cal (izquierda) y solución de NaOH (derecha) (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).	24
Figura II-20. SEM de una muestra obtenida de la columna A (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).....	25
Figura II-21. SEM de una muestra obtenida de la columna A (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).....	25
Figura II-22. SEM de una muestra de la columna B (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).....	26
Figura II-23. SEM a la izquierda y fluorescencia donde se muestran los compuestos que tienen azufre (etringita) de la columna A (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).....	26
Figura II-24. Agrietamiento del extremo del durmiente (Sahu & Thaulow, 2004).	27
Figura II-25. Morfología y composición química de un depósito de etringita ubicado en un vacío de aire (Sahu & Thaulow, 2004).	28
Figura II-26. Depósitos de etringita en la interfaz pasta-agregado (Sahu & Thaulow, 2004).....	29
Figura II-27. Depósitos de etringita en los microporos de la pasta de cemento (Sahu & Thaulow, 2004).....	29
Figura II-28. Producto de hidratación interno con altos niveles de sulfato. Estos durmientes no fueron expuestos a las condiciones de servicio (Sahu & Thaulow, 2004).....	30

Figura II-29. Productos de hidratación externos con alto contenido de sulfato y potasio. Estos durmientes no fueron expuestos a las condiciones de servicio (Sahu & Thaulow, 2004).....	31
Figura II-30. Ciclos de humedecimiento Secado (Grabowski, Czarnecki, Gillot, Duggan, & Scott, 1992).	33
Figura II-31. Probeta prismática con sus respectivos topes o referencias de medición (LCPC, 2009).....	35
Figura II-32.Ciclos de Humedecimiento-Secado (LCPC, 2009).	35
Figura III-1. Esquema de los tratamientos a las que son sometidas las probetas que utilizan cada uno de los materiales cementicios empleados en el estudio.	37
Figura III-2. Granulometría de los áridos.	42
Figura III-3. Proporciones utilizadas en la confección de los materiales cementicios	45
Figura III-4. Vista en planta del diseño del molde.	46
Figura III-5. Vista isométrica molde de la loseta de hormigón.	46
Figura III-6- Vista lateral molde de la loseta de hormigón.....	47
Figura III-7. Vista superior molde de la loseta de hormigón.	47
Figura III-8. Distancia libre entre topes de la probeta (235 mm).	48
Figura III-9. Molde relleno de hormigón antes del vibrado.	49
Figura III-10. Platachado posterior al vibrado de la loseta.	49
Figura III-11. Loseta cubierto de una lámina de plástico.....	50
Figura III-12. Evolución de la temperatura durante el curado acelerado. ...	50
Figura III-13. Horno seco en el cual se lleva a cabo el curado acelerado....	51
Figura III-14. Loseta curada de forma acelerada antes de ser desmoldada. 51	
Figura III-15. Losetas después de ser desmoldadas. La loseta de la parte superior de la imagen fue curada aceleradamente.	52
Figura III-16. Aserrado de la loseta que se realiza a las 24 h después de la confección del hormigón.....	52

Figura III-17. Probeta obtenida del aserrado de la loseta.....	52
Figura III-18. Ciclos humedecimiento secado.	53
Figura III-19. Probetas siendo retiradas del horno.	54
Figura III-20. Probetas después del secado en horno durante 1 día.	54
Figura III-21. Probetas después del humedecimiento durante 1 día.	54
Figura III-22. Medición de probeta.....	55
Figura III-23. Pulido de las muestras.	56
Figura III-24. Muestra terminada.....	56
Figura III-25. Laboratorio SEM Depto. Geología U de Chile.	57
Figura III-26. Esquema del método de ensayo.	59
Figura III-27. Tratamiento 1.A: Curado Acelerado / Ciclos Humedecimiento Secado.....	59
Figura III-28. Tratamiento 1.B: Curado Acelerado.	60
Figura III-29. Tratamiento 2.A: Curado Húmedo / Ciclos Humedecimiento Secado.....	60
Figura III-30. Tratamiento 2.B: Curado Húmedo.	61
Figura III-31. Densidad fresca de los hormigones confeccionados.....	62
Figura III-32. Asentamiento de cono de los hormigones confeccionados. ...	62
Figura III-33. Rendimiento de la amasada para los hormigones confeccionados.....	63
Figura III-34. Evolución resistencia a compresión para los hormigones en estudio.....	64
Figura III-35. Expansiones promedio probetas P_2,8_0.....	65
Figura III-36. Expansiones promedio probetas P_3,5_0.....	66
Figura III-37. Expansiones promedio probetas P_2,8_15.....	67
Figura III-38. Expansiones promedio probetas P_3,5_15.....	68

Figura III-39. Expansiones promedio probetas P_2,8_30.	69
Figura III-40. Expansiones promedio probetas P_3,5_30.	70
Figura IV-1. Óxidos principales de los materiales cementicios.	73
Figura IV-2. Composición mineralógica de los materiales cementicios.	73
Figura IV-3. Densidad en estado fresco de los hormigones confeccionados.	74
Figura IV-4. Asentamiento de cono de los hormigones confeccionados.	75
Figura IV-5. Rendimiento de la amasada para los hormigones confeccionados.	76
Figura IV-6. Evolución resistencia cúbica a compresión para los hormigones en estudio.	76
Figura IV-7. Expansiones promedio probetas hormigón P_2,8_0.	78
Figura IV-8. Expansiones promedio probetas puzolana: 0% SO ₃ : 3,5%.	79
Figura IV-9. Expansiones promedio probetas puzolana: 15% SO ₃ : 2,8%. ..	80
Figura IV-10. Expansiones promedio probetas puzolana: 15% SO ₃ : 3,5%.	81
Figura IV-11. Expansiones promedio probetas puzolana: 30% SO ₃ : 2,8%.	82
Figura IV-12. Expansiones promedio probetas puzolana: 30% SO ₃ : 3,5%.	83
Figura IV-13. Comparación de curvas de comportamiento en el ensayo Duggan modificado (Tratamiento 1.A) para los hormigones estudiados.	85
Figura IV-14. Expansiones al término del periodo de estudio para el tratamiento 1.A (Duggan Modificado).	86
Figura IV-15. Tasa de expansión al término del periodo de estudio para el tratamiento 1.A (Duggan Modificado).	86
Figura IV-16. Expansión al término del ensayo de acuerdo al contenido de puzolana del material cementicio empleado en el hormigón de prueba.	87
Figura IV-17. Imagen de SEM a muestra perteneciente al hormigón P_3,5_0 con curado acelerado y ciclos humedecimiento secado.	88
Figura IV-18. Espectroscopia del área señalada en la figura IV-16.	88

Figura IV-19. Imagen de SEM a muestra perteneciente al hormigón P_3,5_0 con curado acelerado y ciclos humedecimiento secado. 89

Figura IV-20. Espectroscopia del área señalada en la figura IV-18. 89

CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN

I.1 PRESENTACIÓN DEL TEMA

La motivación de este trabajo de título son los hormigones masivos, o con altas dosificaciones de material cementicio que se ocupan en Chile, donde se producen altas temperaturas debidas al calor liberado por las reacciones de hidratación del cemento. Este es el caso de fundaciones, represas, estructuras industriales, etc. La aparición del fenómeno expansivo por formación de etringita tardía es una problemática actual, y un desafío para la tecnología del hormigón.

De los cuatro componentes principales del cemento (Silicato dicálcico C_2S , Silicato tricálcico C_3S , Aluminato tricálcico C_3A y FerroAluminato tetracálcico C_4AF), el C_3A es el responsable de la formación de la etringita. Cuando el C_3A reacciona con agua en presencia de yeso se forma etringita, esta es una reacción exotérmica y expansiva. El aumento de volumen producto de esta reacción no genera problemas ya que el cemento recién está comenzando a hidratarse, por lo que no ha adquirido rigidez alguna. Esta reacción continúa hasta que el yeso se ha consumido en su totalidad. Luego la etringita formada inicialmente reacciona con el aluminato tricálcico restante, produciendo monosulfato.

En los núcleos de los hormigones masivos se presentan altas temperaturas, ya que la tasa de generación de calor por parte de las reacciones de hidratación del cemento, es mayor que la tasa de liberación de calor hacia el entorno debido a la masividad del elemento. La etringita no es una fase estable a altas temperaturas (mayores a 70 °C), por lo que ésta se convierte en monosulfato, liberando iones de sulfato que son incorporados a las fases mayoritarias de los productos de hidratación. Una vez que el concreto ha endurecido bajo condiciones de humedad (permanente o esporádica), el monosulfato reacciona con los iones de sulfato, volviendo a formar etringita, esto es conocido como formación de etringita tardía. La etringita necesita más espacio que los monosulfatos de los cuales se forma, por lo que la reacción es expansiva agrietando el hormigón. La aparición de agrietamiento debido a formación de etringita tardía puede demorar 2 a 20 años después del vaciado. (NANAYAKKARA, 2011)

Debido a lo anterior, durante la etapa de construcción se toman diversas medidas con el fin de moderar las temperaturas, para no tener el problema de la aparición del fenómeno de formación de etringita tardía (DEF), ya que esto significa tener que reparar o reemplazar el hormigón, lo que tiene un alto costo.

Es deseable poder liberarse de estas restricciones que afectan al proceso constructivo, estudiando las posibles variaciones a la composición del material cementicio o la incorporación de adiciones, que puedan actuar como inhibidoras del fenómeno DEF. La modificación que se evalúa en este trabajo, es el uso de puzolana natural proveniente de Pudahuel en reemplazo parcial de cemento portland.

La metodología a utilizar se basa en un método de ensayo acelerado, en el cual se preparan probetas de hormigón, las que son curadas a temperaturas cercanas a los 80°C (simulando las temperaturas en el núcleo de un hormigón masivo durante el endurecimiento), para luego ser sometidas a ciclos de humedecimiento-secado (para debilitar la estructura y acelerar la evolución del fenómeno expansivo). Finalizado el proceso anterior se procede a verificar posibles expansiones a través de mediciones de las probetas, lo que daría un índice del potencial expansivo del hormigón para una determinada composición química del cemento empleado.

El planteamiento de la investigación contempla estudiar, a través de un hormigón típico para obras masivas (fundaciones, represas, estructuras industriales, etc.) el potencial efecto expansivo de los distintos materiales cementicios bajo condiciones de ensayo acelerado, y conocer el eventual efecto inhibidor de dichas reacciones asociado a la incorporación de puzolana natural.

I.2 OBJETIVOS

I.2.1 Objetivos Generales.

Verificar la efectividad de las adiciones puzolánicas, incorporadas al cemento o al hormigón, como inhibidoras frente al fenómeno expansivo por formación de etringita tardía (fenómeno DEF).

I.2.2 Objetivos Específicos.

Evaluar el comportamiento de hormigones que incorporan puzolana natural bajo condiciones de ensayo acelerado.

CAPÍTULO II : ANTECEDENTES

II.1 INTRODUCCIÓN

Cuando un hormigón es sometido a altas temperaturas (mayores a 70°C) durante la etapa inicial de endurecimiento, la etringita (uno de los productos de hidratación) se transforma en monosulfato. Una vez endurecido el hormigón, bajo la presencia permanente o intermitente de humedad, este monosulfato se vuelve a convertir en etringita. Este proceso es conocido como formación de etringita tardía o fenómeno DEF (delayed ettringite formation). (NANAYAKKARA, 2011)

La etringita requiere más espacio que los monosulfatos de los cuales se forma, por lo que esta transformación es una reacción expansiva que produce agrietamiento en el hormigón (NANAYAKKARA, 2011).

La tasa y la extensión final de la expansión dependen de factores de 3 tipos: química, la cual determina la cantidad de etringita tardía que puede ser formada; microestructura de la pasta, ya que esta determina el nivel de esfuerzos que se producen por la formación de los cristales; y la microestructura del hormigón o mortero, la cual determina la respuesta del material dado el nivel de esfuerzos generados (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001).

Las altas temperaturas que se necesitan para gatillar el fenómeno, se pueden presentar en hormigones masivos, producto del gran calor de hidratación y la baja conductividad térmica del hormigón, como también en hormigones prefabricados, los cuales son sometidos a curados acelerados, en los cuales se eleva la temperatura de los elementos estructurales con vapor de agua a baja presión, con el fin de acelerar la ganancia de resistencia.

II.2 HORMIGONES MASIVOS

El Instituto Americano del Hormigón (ACI) define a los hormigones masivos como: "Cualquier volumen de hormigón en las que 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."(ACI 207.1R).

Los hormigones masivos han sido históricamente asociados con grandes estructuras como lo son fundaciones, represas, columnas de puentes, y otras de gran volumen (figura II-1 y II-4). Sin embargo, debido al uso de prácticas

que aceleran el proceso de construcción, y al uso de hormigones de alto desempeño que poseen altos contenidos de material cementicio, los problemas asociados con los hormigones masivos están siendo experimentados durante la colocación de hormigón en estructuras comunes. (Cement.org, Mass Concrete, 2015)



Figura II-1. Hormigón Masivo. (Cement.org, 2015)

El principal problema, y el que lo diferencia a otro tipo de colocación, es que durante la colocación de hormigones masivos las temperaturas que se alcanzan son suficientemente altas como para dañar este material de construcción. Todos los hormigones generan calor producto de las reacciones de hidratación que forman los compuestos que le dan su resistencia y durabilidad. La temperatura que se alcanza dentro de la masa de concreto depende de la tasa de generación de calor, y de la tasa de liberación de este, por ejemplo, en muchas colocaciones el calor escapa tan rápido como este es generado (estructuras delgadas como pavimentos). En un hormigón masivo el calor escapa de una forma mucho más lenta de lo que éste es generado, por lo que se producen altas temperaturas. Si la temperatura interna supera los 70°C , la durabilidad de algunos hormigones podría verse afectada por la formación de etringita tardía (DEF). Cuando la formación de etringita tardía ocurre, la pasta de cemento se expande y agrieta el hormigón con resultados perjudiciales, los cuales podrían no ser evidentes por varios años. Adicionalmente, cuando la temperatura en el interior del masivo puede ser bastante alta, la superficie puede estar relativamente fría, resultando un gran diferencial de temperatura que provoca tensiones térmicas que pueden causar agrietamiento en la superficie. Históricamente se ha recomendado mantener el diferencial de temperatura entre el núcleo y la superficie bajo los 20°C , ya que se ha observado que este límite previene o minimiza el agrietamiento térmico (figura II-5).

Respetar estos límites de temperatura es bastante complejo, más aun cuando las tendencias actuales de construcción desarrollan programas cada vez más comprimidos. En las figuras II-2 y II-3 se muestra la evolución de la temperatura en el tiempo para el núcleo y la superficie de hormigones masivos. Es posible notar que se superan los límites de temperatura recomendados para el núcleo (figura II-2) y para el gradiente térmico (figura II-3).

COMPORTAMIENTO TEMPERATURAS HORMIGON AUTOCOMPACTANTE NÚCLEO - SUPERIOR

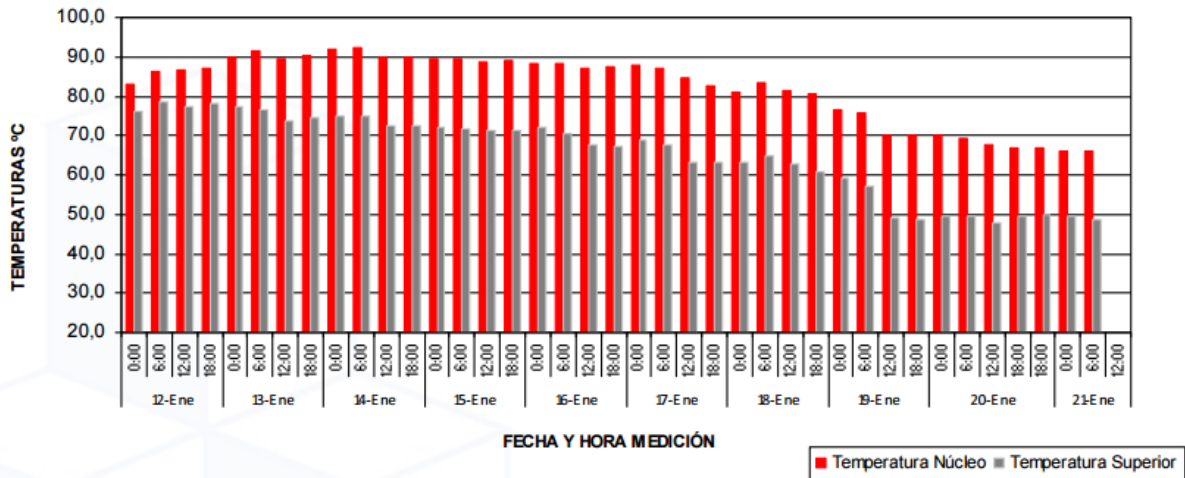


Figura II-2. Evolución de la temperatura en el tiempo para un elemento de hormigón masivo (Fernández, 2009)

DIFERENCIAL DE TEMPERATURA SUP - AMBIENTE

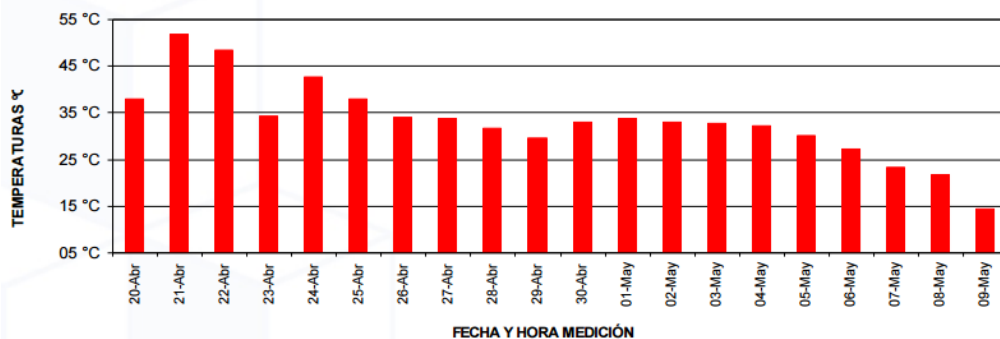


Figura II-3. Evolución del gradiente térmico en el tiempo para un hormigón masivo H-35(90)-20-09. (Fernández, 2009)

Seleccionar un diseño de mezcla apropiado, es el primer paso para prevenir altas temperaturas internas y grandes diferenciales de temperatura, ya que esto reducirá posteriores esfuerzos de controlar la temperatura después de la colocación. El aumento de la temperatura está directamente relacionado con el tipo y cantidad de material cementicio en el hormigón, por lo que un diseño apropiado contiene la menor cantidad de material cementicio requerido por resistencia y durabilidad. Para reducir el calor de hidratación del material cementicio lo que se hace usualmente es reemplazar cierta cantidad de cemento portland con materiales cementicios suplementarios.



Figura II-4. Columnas y fundaciones del James River Bridge que corresponden a hormigones masivos (Cement.org, 2015).



Figura II-5. Agrietamiento térmico (Cement.org, 2015).

En el caso de que usando esta mezcla se estime o calcule que se superará el límite de temperatura máxima en el hormigón, deben ser tomadas medidas

adicionales como utilizar agua de amasado fría, o sustituyendo una parte de agua de amasado por hielo. En el caso de requerirse un enfriamiento mayor, se pueden colocar tuberías dentro de la masa de hormigón, por las cuales circula un líquido frío, las cuales deben ser llenadas posterior a su uso. Con respecto al diferencial de temperatura, una forma de disminuirlo es aislando la superficie del hormigón con mantas de aislación (figura II-6).

Lo ideal es desarrollar un plan de control térmico, en donde todas las partes involucradas acuerden las medidas a tomar y los resultados esperados. Tales medidas podría incluir enfriamiento del hormigón, instalación y operación de tuberías de enfriamiento, aislación, equipo para monitoreo de las temperaturas.



Figura II-6. Mantas de aislación sobre una columna de concreto (Cement.org, 2015).

(Cement.org, 2015)

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, lo óptimo después de elegir la dosificación más adecuada, sería realizar un modelo de elementos finitos en donde se puedan incorporar todas las variables que tiene el problema (materiales a emplear, condiciones ambientales, metodología de colocación, medidas adicionales de enfriamiento) para estimar las temperaturas que se desarrollaran durante el proceso. Lamentablemente esto no se suele realizar por el costo que tiene, pero considerando que en estructuras donde se ha presentado DEF han sido reemplazadas de forma parcial o total, vale la pena evaluar esta medida para poder anticiparse y tomar las consideraciones pertinentes.

II.3 FORMACIÓN DE ETRINGITA TARDÍA (FENÓMENO DEF)

II.3.1 Introducción

La formación de etringita tardía podría ser definida como la formación de etringita en un material cementicio por un proceso que comienza después que el endurecimiento del hormigón ha terminado, y en el cual ninguno de los sulfatos necesarios para formar la etringita proviene desde el exterior de la pasta de cemento. Este fenómeno se presenta en hormigones que han sido sometidos a altas temperaturas durante las etapas iniciales de las reacciones de hidratación del cemento. Además, hay casos en que el DEF ha provocado daños en el hormigón sin que éste haya sido sometido a altas temperaturas, pero esto se debe al uso de cementos con cantidades excesivas de SO_3 . (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001)

De acuerdo a estudios realizados en paralelo por varios investigadores acerca del efecto de la temperatura de curado inicial en las expansiones de los hormigones o morteros, se ha encontrado que expansiones significativas se presentan sólo en el caso de haber tenido un curado a alta temperatura. Estos resultados típicos se muestran en la figura II-7.

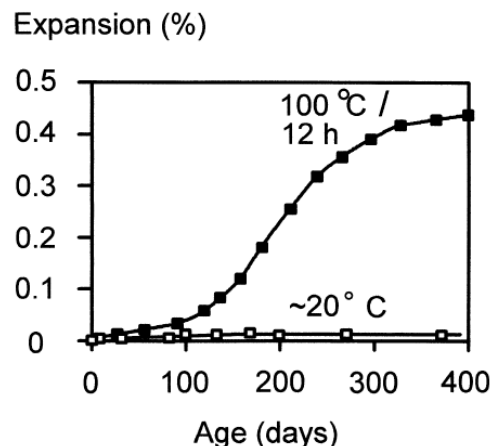


Figura II-7. Expansión lineal para un mortero curado inicialmente a 20°C y otro curado a 100°C seguido de un almacenamiento en piscina a temperatura ambiente. Adaptado por Yang et al. (Yang, Lawrence, Lynsdale, & Sharp, 1999)

Son 2 las condiciones necesarias, pero no suficientes para que ocurra el fenómeno DEF. La primera, como se menciona anteriormente, es que la temperatura interna del hormigón debe ser superior a 70°C por un periodo de tiempo suficiente en edades tempranas; y la segunda, es que el material debe permanecer mojado o húmedo de forma intermitente o permanente. (Ghorab, Heinz, Ludwig, Meskendahl, & Wolter, 1981) (Heinz & Ludwig, 1987) (Heinz & Ludwig, 1986)

II.3.2 Etringita en la pasta de cemento y hormigón

Son varios los tipos de etringita que pueden coexistir dentro de un hormigón, los cuales se diferencian por el tiempo y el modo como se originan. Se pueden distinguir los siguientes 3 tipos¹:

- Formación de etringita primaria, la cual no provoca expansión alguna.
- Formación de etringita secundaria, la cual podría provocar expansión.
- Formación de etringita tardía, se produce posterior a un aumento de temperatura dentro de la masa de hormigón, cuando este se encuentra en su etapa inicial de endurecimiento. Puede provocar expansión.

II.3.2.1 Formación de etringita primaria

Corresponde a uno de los productos de la hidratación del cemento, y se forma a partir del yeso (sulfato de calcio) y los aluminatos de calcio. Los cristales de etringita tienen una forma acicular y no provocan expansión en el hormigón, ya que estos se forman antes de que el hormigón ha endurecido, dentro de espacios desocupados del material.

II.3.2.2 Formación de etringita secundaria

La formación de etringita secundaria ocurre una vez que el hormigón ha endurecido, y es el resultado de 2 procesos. Primero, el movimiento del agua dentro del hormigón que produce un fenómeno de disolución y precipitación de etringita. Segundo, la existencia de una fuente de sulfatos, que puede ser externa (contacto con el suelo, con el agua, etc.) o interna (uso de agregados que contengan sulfatos, el agua de mezcla) que puedan reaccionar con compuestos dentro del hormigón para formar etringita. (LCPC, 2009)

Con respecto al fenómeno de disolución y precipitación, se puede mencionar que los procesos de recristalización continúan hasta varios años después del vaciado, ya que los pequeños cristales son inherentemente inestables en comparación con los cristales de mayor tamaño, debido a sus grandes superficies. Los pequeños cristales que se encuentran en la pasta de cemento, tienden a recristalizar en los huecos o grietas que pudiesen existir en el hormigón, formando cristales de mayor tamaño, que no necesariamente provocaron estados tensionales dentro de la masa de hormigón. (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001).

¹ La notación ocupada para los tipos de etringita corresponde a la que es propuesta por la asociación francesa de ingenieros civiles (AFGC).

Por otra parte, la formación de etringita secundaria producto de un aporte adicional de sulfatos (externo o interno) puede provocar hinchamiento y agrietamiento en el hormigón, por lo que es necesario tomar las medidas preventivas necesarias con respecto a las condiciones a las que se expone el hormigón, y los materiales que se emplean en la confección de este.

II.3.2.3 Formación de etringita tardía

La formación de etringita tardía ocurre solamente en hormigones que han sido sometidos a temperaturas sobre los 70°C durante su etapa inicial de endurecimiento. A esta temperatura, la etringita primaria deja de formarse, y la que se había formado anteriormente se descompone. Al dejar de formarse etringita primaria, queda disponible una gran cantidad de iones de sulfato, que se suma a los iones de sulfato liberados producto la descomposición de la etringita ya formada. Estos iones de sulfato libres son adsorbidos por otros productos de hidratación del cemento. Cuando la temperatura desciende hasta la temperatura ambiente, y en presencia de humedad intermitente o continua, la etringita es capaz de volver a formarse, produciendo presiones capaces de expandir el concreto.

(LCPC, 2009)

II.3.3 Química del DEF

De los 4 compuestos principales del cemento, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S), $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S), $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A), $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF), el aluminato tricálcico es el responsable de la formación de etringita. Cuando el C_3A reacciona con agua en presencia de yeso, se forma la etringita ($\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_32$). C_4AF también reacciona con yeso y produce ($\text{C}_3(\text{AF})\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_32$). Las reacciones mencionadas anteriormente no sólo son exotérmicas, como lo son todas las reacciones de hidratación de los compuestos del cemento, sino también expansivas. Como estas reacciones ocurren en las primeras etapas de la hidratación del cemento, es decir, el hormigón no ha alcanzado a desarrollar resistencia, la expansión puede ocurrir sin causar destrucción alguna. Estas reacciones continúan hasta consumir todo el sulfato de calcio. Cuando se acaba el sulfato de calcio, la etringita formada inicialmente reacciona con el remanente de C_3A para formar monosulfato.

Alrededor de un 9,5% de yeso (es decir 4,4% de SO_3) sería necesario, por ejemplo, para transformar 5% de C_3A completamente en etringita. Sin embargo, en la mayoría de las normativas aplicables a cementos, se limita el contenido de sulfato a un 2,5 a 3% dependiendo del contenido del C_3A . Por lo tanto, siempre se forma monosulfato (NANAYAKKARA, 2011)

Como se menciona anteriormente, la etringita no es una fase estable a altas temperaturas. Cuando la temperatura en el hormigón supera los 70°C durante las primeras etapas de las reacciones de hidratación, la etringita formada se convierte en monosulfato y se liberan iones de sulfato. Estos iones de sulfato son absorbidos por el gel de Tobermorita (C-S-H), que es el principal producto de hidratación del silicato dicálcico (C₂S) y silicato tricálcico (C₃S). Una vez endurecido el hormigón bajo condiciones de humedad permanente o intermitente, el monosulfato reacciona con estos iones de sulfato para producir etringita. Esta reacción es conocida como formación de etringita tardía (DEF). La etringita formada requiere más espacio del que ocupaban los monosulfatos de los cuales se forma, por lo que es una reacción expansiva, que induce estados tensionales locales, que superan la resistencia que ha adquirido el hormigón en esa zona, agrietándolo.

El agrietamiento debido a la formación de etringita tardía, puede aparecer entre 2 a 20 años después del vaciado. Este tiempo depende de varios factores asociados con la composición del cemento, las condiciones en que se cura inicialmente el hormigón, la mano de obra que coloca la mezcla y la exposición ambiental que se tenga.

(NANAYAKKARA, 2011)

II.3.4 Expansiones producto de DEF

De acuerdo a los estudios realizados, donde usualmente se evalúan las expansiones lineales que presentan probetas de hormigón o mortero producto del DEF, se ha observado que las expansiones siguen una curva en forma de S, por ejemplo, para prismas de mortero de 40 x 40 x 160 mm curados a 80-100 °C y posteriormente almacenados en agua, las expansiones comienzan a ser significativas luego de pocos meses de almacenamiento y llegan a la expansión final luego de 1 o 2 años.

El tamaño de las probetas que se utilizan en los estudios, el libre acceso que tiene el agua durante el periodo de almacenamiento, y la ausencia de restricciones geométricas a la expansión, son las condiciones más favorables (con respecto a las condiciones reales en terreno) para que el fenómeno DEF se desarrolle. Debido a lo anterior, las expansiones obtenidas en el laboratorio y la velocidad con que estas se desarrollan, son mayores a las que se obtendrían en terreno utilizando el mismo hormigón, y el mismo curado. Las expansiones y agrietamiento para un hormigón en terreno, ocurren de una forma mucho más lenta.

Además, las expansiones producto del DEF se potencian cuando el hormigón presenta otro tipo de problemas, especialmente cuando se producen las reacciones expansivas por álcali-agregado (ASR). (Diamond & Ong, 1994)

II.3.5 Mecanismo de agrietamiento debido a DEF

Los investigadores sugieren 2 mecanismos para explicar el agrietamiento que sufre el hormigón cuando se forma la etringita tardía.

II.3.5.1 Teoría de la expansión uniforme de la pasta

De acuerdo a esta teoría, los monosulfatos que se encuentran mezclados íntimamente con el gel de Tobermorita (C-S-H), al reaccionar de forma expansiva con los iones de sulfato libre para formar etringita tardía, provocan una expansión uniforme e isotrópica de la pasta de cemento (figura II-8). Esta expansión de la pasta genera espacios entre la pasta de cemento y los agregados, los cuales, de forma posterior, son llenados con la recristalización de la etringita formada y también de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (figura II-9). Sin embargo, esto podría no generar presiones expansivas significativas.

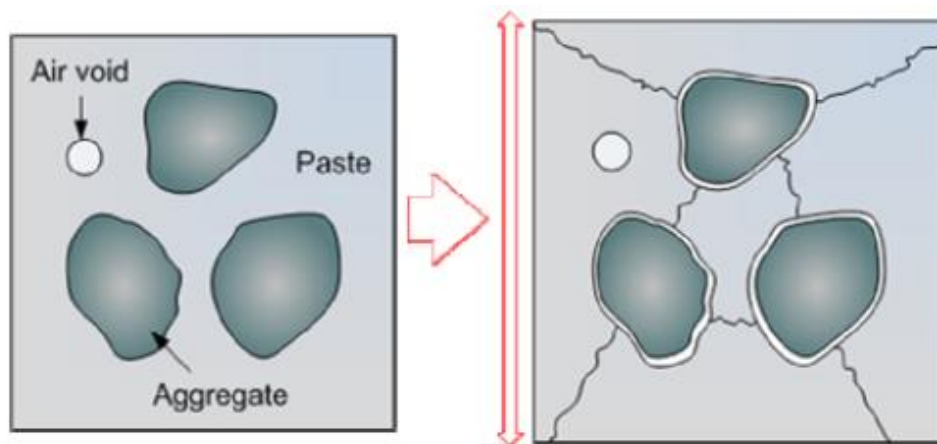


Figura II-8. Expansión uniforme de la pasta genera espacios entre el agregado y la pasta de cemento (NANAYAKKARA, 2011).

II.3.5.2 Teoría del crecimiento de cristales de etringita

De acuerdo a esta teoría, la expansión es atribuida a las presiones ejercidas por el crecimiento de cristales en las microfisuras entre la pasta de cemento y el agregado.

Notar que existe evidencia para sostener ambas teorías, ambos mecanismos podrían ser posibles y dependiendo de las condiciones ambientales uno podría prevalecer en desmedro del otro. Sin embargo, no hay un acuerdo entre los investigadores acerca del mecanismo con que el DEF actúa, solo concuerdan en que las expansiones debidas al DEF se presentan en hormigones que han sido sometidos a altas temperaturas en edades tempranas.

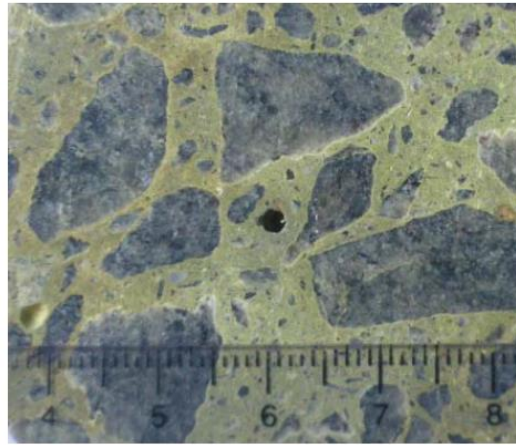


Figura II-9. Formación de un borde alrededor del agregado en un hormigón afectado por el fenómeno DEF (NANAYAKKARA, 2011).

En la figura II-10 se puede apreciar el agrietamiento que presenta un encepado. El núcleo de este hormigón masivo fue sometido a altas temperaturas en edades tempranas producto del calor de hidratación generado. Las expansiones provocadas por DEF se generan solamente en el núcleo, las cuales producen agrietamiento en la capa superficial de este elemento.

(NANAYAKKARA, 2011)



Figura II-10. Agrietamiento de un encepado producto de la expansión del núcleo del elemento debido al fenómeno DEF (NANAYAKKARA, 2011).

II.3.5.3 Mecanismo expansivo sugerido por Taylor et al.

Taylor et al sugiere un mecanismo expansivo debido a la formación de etringita tardía, de acuerdo a las evidencias microestructurales que se han encontrado en hormigones que han tenido un tratamiento térmico y que posteriormente han presentado el fenómeno.

La evidencia microestructural muestra que el monosulfato se encuentra íntimamente mezclado con el C-S-H al final de un tratamiento térmico, y que en hormigones donde se den las condiciones para el desarrollo de DEF, la etringita formada también está íntimamente mezclada con el C-S-H. Esta evidencia, en combinación con que las presiones sustanciales requeridas para el crecimiento de los cristales son más probables que se generen si esto ocurre en lugares confinados con alta supersaturación, sugieren el mecanismo presentado en la figura II-11. El diagrama superior representa parte de la microestructura inmediatamente después del tratamiento térmico, los hexágonos representan los cristales de monosulfato y las áreas sombreadas todas las otras fases sólidas. En la pasta curada a altas temperaturas, el producto interno que reemplaza cada grano de cemento está rodeado por una capa de producto externo, el cual es relativamente denso. A mayor distancia desde el producto interno, la textura del producto externo es más abierta. Las condiciones que favorecen el desarrollo de las altas presiones para el crecimiento de cristales, se producen en la capa densa de producto externo que se forma inmediatamente sobre el producto interno. El diagrama inferior representa la situación después del almacenamiento, donde se muestra que el monosulfato ha reaccionado y ha sido reemplazado por etringita.

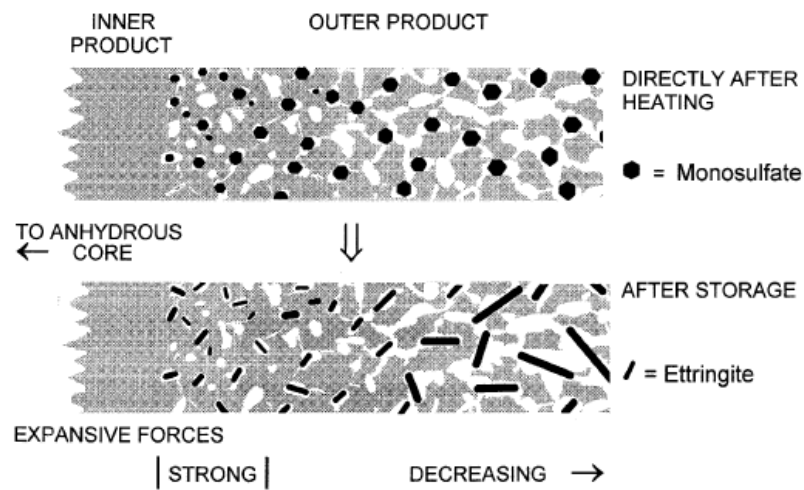


Figura II-11. Diagrama esquemático donde se ilustra el mecanismo sugerido de expansión de la pasta en un mortero que se expande producto de DEF. Las áreas sombreadas representan todas las otras fases que no son monosulfato y etringita. Áreas en blanco representan poros (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001).

Se asume que la expansión de la pasta produce grietas en la pasta y en las interfaces pasta-agregado (figura II-12). La etringita, y también el hidróxido de calcio, recrystalizan en estas grietas sin generar presiones expansivas significativas.

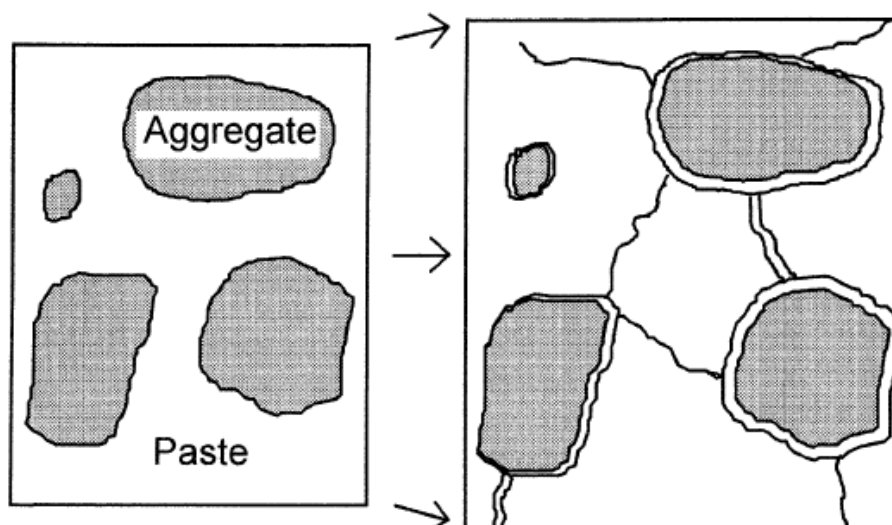


Figura II-12. La expansión no uniforme de la pasta produce grietas en la pasta y en la interfaz pasta agregado. Etringita y portlandita recristaliza en estas grietas sin contribuir significativamente en la expansión (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001).

(Taylor, Famy, & Scrivener, 2001)

II.3.6 Efecto de la incorporación de puzolana en el DEF

Como se mencionó anteriormente, la tasa de expansión y la expansión final presentadas por el hormigón producto de la formación de etringita tardía dependen de factores de 3 tipos: la química, que determina la cantidad de etringita que puede ser formada; microestructura de la pasta de cemento, ya que esta determina el nivel de esfuerzo que se producen por la formación de cristales; y la microestructura del hormigón o mortero, la cual determina la respuesta del material dado el nivel de esfuerzos (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001).

Al incorporar puzolanas en reemplazo de cemento en un mortero u hormigón, se está disminuyendo la cantidad de elementos reactivos, como el aluminato tricálcico o el sulfato, que son los responsables de la formación de los sulfoaluminatos de calcio hidratado que podrían provocar daño. Es decir, en un hormigón que utiliza cemento adicionado la cantidades totales de etringita y monosulfatos es menor que en un hormigón que utiliza un cemento portland puro. Esta es la manera más directa en que la incorporación de puzolanas ayuda a mitigar o inhibir el fenómeno DEF.

Nguyen et al en el año 2013 determina la influencia de la incorporación de una puzolana natural argelina en las expansiones que presenta un mortero producto de la aparición y desarrollo del fenómeno DEF. Con este fin reemplaza cierta cantidad de cemento portland con puzolana empleando diferentes dosis (10%, 20% y 30%) y finuras ($1.235 \text{ cm}^2/\text{g}$, $1.768 \text{ cm}^2/\text{g}$ y $3.710 \text{ cm}^2/\text{g}$). Este material cementicio posteriormente es usado en la confección de prismas de

mortero de 40x40x160 mm los cuales son sometidos a un curado acelerado dentro de un horno (figura II-13). Posterior al desmolde, se controla periódicamente el cambio de longitud de las probetas (figura II-14).

Tabla II-1. Composición de óxidos de Puzolana Argelina (Nguyen, Leklou, Aubert, & Mounanga, 2013).

Composición de Óxidos	Puzolana Argelina
SiO ₂ (%)	46,8
Al ₂ O ₃ (%)	17,5
CaO (%)	9,4
Fe ₂ O ₃ (%)	8,4
SO ₃ (%)	0,4
MgO (%)	3,9
Na ₂ O (%)	4,32
K ₂ O (%)	1,40

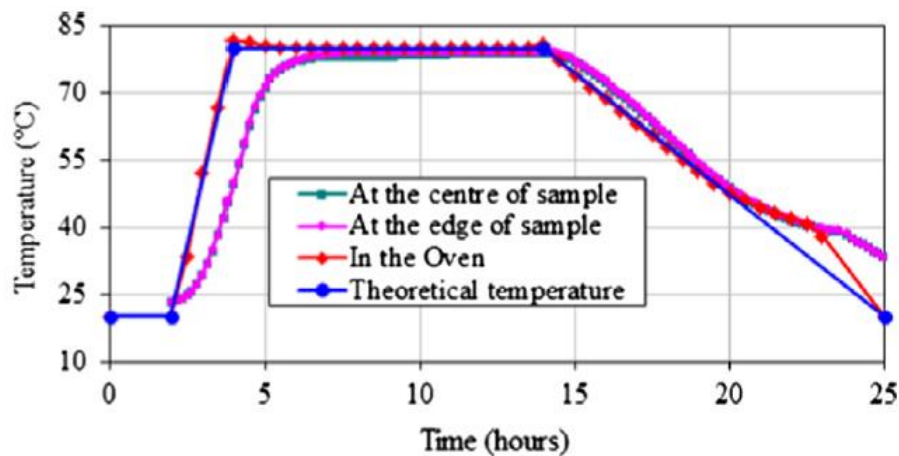


Figura II-13. Tratamiento térmico aplicado a las probetas de mortero (Nguyen, Leklou, Aubert, & Mounanga, 2013).

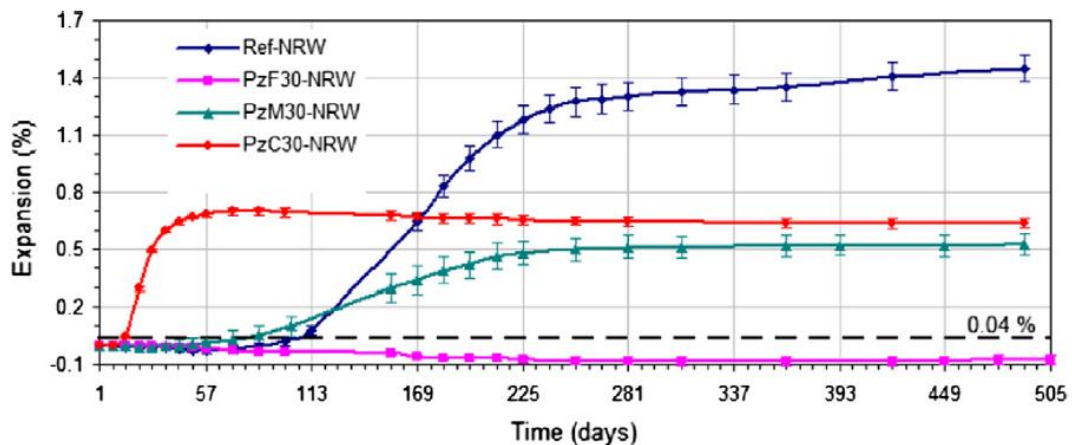


Figura II-14. Expansión de morteros preparados con diferentes finuras de puzolana. (Nguyen, Leklou, Aubert, & Mounanga, 2013)

Se aprecia que las probetas con un 30% de puzolana fina no presentaron expansiones significativas dentro del periodo de investigación. La puzolana fina fue más eficiente en controlar e incluso eliminar la expansión, ya que esta consume más portlandita, liberando de forma más rápida el Al_2O_3 , y absorbiendo más álcalis por parte del C-S-H producto de la reacción puzolánica, provocando una disminución de la relación $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ y por lo tanto disminuyendo el potencial expansivo de la DEF (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001). Por otra parte, el consumo de la portlandita por parte de las reacciones puzolánicas aumenta con la finura de la puzolana, esto conlleva a una reducción del pH de la solución de poros, seguida por la disminución de la concentración de SO_4^{-2} en la solución de poros y por lo tanto la absorción de sulfatos por parte del C-S-H durante el tratamiento térmico es reducida (Divet & Randriambololona, 1998) y el potencial de expansión disminuye. Además cabe mencionar que todas las muestras que contienen puzolana tuvieron una expansión menor que las probetas de referencia, esto puede ser atribuido a la influencia beneficiosa de las reacciones puzolánicas y la reducción de elementos reactivos debido al reemplazo parcial de cemento con puzolana. (Nguyen, Leklou, Aubert, & Mounanga, 2013)

II.3.7 Principales parámetros asociados con el DEF

Aún no se conoce con precisión el inicio y desarrollo del DEF, por lo que se están realizando extensas investigaciones con el fin de entender de mejor manera este fenómeno. Sin embargo, son varios los factores que deben presentarse para que DEF ocurra en una estructura, y esto podría explicar el pequeño número de hormigones en los que se ha observado el fenómeno. Estos parámetros se mencionan a continuación:

- Agua y humedad: Según lo observado en terreno y en laboratorio, es esencial para que se desarrolle el fenómeno. El agua participa formando productos y transportando otros. DEF afecta principalmente a los elementos estructurales en contacto directo con el agua, o los que sufren la entrada de agua, y tal vez a los sometidos a condiciones de alta humedad.
- Temperatura y tiempo de aplicación: El máximo de la temperatura alcanzada, y el tiempo en que esta temperatura se mantiene, influyen el riesgo de la aparición del fenómeno DEF.
- Contenidos de sulfatos y aluminatos del cemento: A partir de estos compuestos se forma la etringita, por lo que es de esperar que utilizando cementos con altos contenidos de C_3A y SO_3 se pueda presenciar reacciones expansivas por el ataque interno de sulfatos.
- Contenido de álcalis del concreto: La etringita es más soluble cuando se tiene un alto contenido de álcalis. Por lo tanto, es conveniente utilizar un cemento bajo en álcalis, con el fin de aumentar el valor de la

temperatura crítica a la que se puede llegar sin tener preocupaciones por la potencial formación de etringita tardía.

(LCPC, 2009)

II.3.8 Consideraciones durante la construcción

Las nociones básicas a tener en cuenta durante el proceso de construcción son las siguientes:

- Para estructuras hormigonadas in situ:
 - Las tendencias actuales que favorecen programas de construcción más comprimidos, el intento de acelerar la ganancia de resistencia temprana con el fin de aumentar la rotación de los moldajes o la introducción de fuerzas de pretensión, particularmente en el caso de hormigones masivos, no debe realizarse a expensas de la durabilidad de la estructuras construidas bajo esas condiciones.
 - Elegir una dosificación de hormigón que se adapte al elemento estructural del cual formará parte, y al ambiente en el cual se encontrará. Por ejemplo evitar el uso de cementos con altos calores de hidratación, y el uso de altas dosis de cemento dentro de elementos estructurales masivos.
 - La colocación del hormigón para la construcción de hormigones masivos se debe evitar durante periodos calurosos, mientras no sean adoptadas las medidas necesarias para mitigar estas altas temperaturas en el hormigón.
- Para estructuras compuestas de elementos de hormigón prefabricado:
 - Para estos elementos, sería necesario evitar todos los tratamientos térmicos que involucren temperaturas máximas excesivas en conjunto con prolongados tiempos de aplicación, para hormigones susceptibles a DEF.

Hasta el momento, se ha observado que los elementos de concreto afectados por esta patología:

- Son elementos que liberan el calor de forma marginal hacia el exterior, lo que produce la elevación de la temperatura de forma significativa.
- Fueron hormigonados en periodos de verano y que sus núcleos tuvieron temperaturas sobre los 80°C durante el tiempo de endurecimiento.
- Fueron sometidos a ambientes húmedos durante la etapa de servicio.

(LCPC, 2009)

II.3.9 Casos donde se ha observado el fenómeno

Los primeros casos conocidos en que el DEF ha sido señalado como el principal causante de deterioro, corresponde a los durmientes de las líneas de ferrocarril de varios países. Los durmientes son elementos de hormigón prefabricado que han sido sometidos a tratamiento de curado acelerado en edades tempranas. La aparición del agrietamiento producto del DEF ocurre después de varios años del vaciado, típicamente dentro de los primeros 10 años, y sólo ocurre en los durmientes que han sido expuestos de forma permanente o intermitente a la humedad. Estos mismos durmientes, ubicados dentro de túneles no muestran signos de alteración. En ciertos casos, DEF se produce de forma asociada con otros mecanismos de deterioro del hormigón como son el hielo-deshielo y la reacción álcali agregado.

DEF también ha sido identificado en otros elementos prefabricados como vigas, canales de hormigón, gradas de estadios, etc. En la mayoría es estos, los signos de DEF son observados antes de los 10 años después de la construcción.

DEF también ha sido descubierto en hormigones masivos. La mayor parte de estos hormigones fueron colocados durante el verano y contienen una alta dosis de material cementicio (420 a 550 kg/m³), así como altos contenidos de álcalis equivalente (>4,0 kg/m³). Estos elementos estructurales tienen por los menos 60 cm en su dimensión menor y se estima que las temperaturas alcanzadas en los núcleos fueron cercanas a los 80°C. Los daños producto del DEF aparecieron entre 2 y 20 años posteriores al vaciado. (LCPC, 2009)

El alto calor del concreto que produce temperaturas del orden de los 80°C, son el resultado de la geometría de los elementos, el tiempo en que se realiza el vaciado (verano) y una alta dosis de material cementicio.

En la mayoría de los casos observados, los trastornos productos del DEF nunca afectan a la estructura completa, sólo a las partes que están más expuestas a humedad o entrada de agua (figura II-15, II-16 y II-17).



Figura II-15. Extremo de durmiende que muestra una red de grietas causadas por DEF (LCPC, 2009).



Figura II-16. Vista general de un puente con una viga transversal afectada por DEF (LCPC, 2009).



Figura II-17. Agrietamiento multidireccional localizado en la cara vertical, en las extremidades de la viga mostrada en la figura anterior (LCPC, 2009).

De acuerdo al inventario de las estructuras afectadas por DEF realizada por el LCPC² en Francia, el fenómeno aparece cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- Hormigones donde se produce mucho calor, elevando las temperaturas cerca de los 80°C. Esto se debe a varios factores, como la masividad de los elementos estructurales, un cemento que al hidratarse genere altos calores de hidratación, una alta dosis de cemento y la colocación del hormigón durante el verano.
- El uso de cementos cuyo contenido de álcalis exceda el 0,6% de Na₂O equivalente, con un contenido de SO₃ del orden de 2,6% y un contenido de C₃A entre los 7 y 11%.
- La presencia de humedad de forma intermitente o permanente.
- Agregados creados principalmente por rocas silíceas.

DEF se manifiesta principalmente por el desarrollo de expansión, que a su vez produce mayor deterioro a nivel estructural. Los síntomas visuales son similares a los causados por la reacción álcali agregado. Un mapa de grietas es lo que se observa en las caras de las estructuras que han sido afectadas por DEF. Este agrietamiento es multidireccional y puede ser considerado como desordenado en toda su extensión, aunque hay casos en que las grietas prefieren tomar cierta orientación, debido a la distribución que tiene el reforzamiento.

La abertura de las grietas varía desde varias décimas de milímetro hasta pocos milímetros. La abertura va incrementando con el desarrollo del fenómeno DEF, y a veces se puede observar exudación blanquecina desde cada grieta.

(LCPC, 2009)

A continuación se mencionan algunos casos en donde los hormigones han sufrido la aparición de DEF. Estos corresponden a las columnas de un viaducto ubicado en el sur de Estados Unidos, y unos durmientes de ferrocarril ubicados en Suecia.

II.3.9.1 Columnas de autopista afectadas por DEF en Estados Unidos.

Thomas et al investigaron las causas del agrietamiento presentado por las columnas que soportan una viaducto en el sur de Estados Unidos. El agrietamiento se hizo visible a los 10 años después del vaciado del hormigón,

² Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

y posterior a los 15 años de servicio las columnas lucen como se muestra en la figura II-18.

De acuerdo a los registros, para la construcción de las columnas se utilizó un hormigón que poseía una dosis de 450 kg de cemento portland de alta resistencia temprana (ASTM Tipo III). Esta dosis en combinación con la masividad de los elementos (dimensión mínima de 2 m) y la alta temperatura ambiente que se tuvo durante el proceso de la colocación, provocó que dentro de los hormigones se alcanzaran temperaturas sobre los 70°C, temperatura que es considerada como temperatura mínima requerida para gatillar el fenómeno DEF. De hecho, durante la construcción se observó que los moldajes se deformaron debido al efecto de las altas temperaturas, lo que llevó a la utilización de ceniza volante como material cementicio suplementario en las colocaciones posteriores.



Figura II-18. Aspecto de las columnas luego de 15 años de servicio (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).

La investigación completa involucró un gran número de columnas, sin embargo en el documento sólo se informa acerca de cuatro (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008). Tres de ellas están agrietadas en toda su superficie, y la cuarta no presenta deterioro.

Durante la investigación se procede a tomar testigos de cada columna, a los cuales se les determina el contenido de álcalis a través de un método químico, se les realiza una SEM, y se determina su potencial expansivo remanente debido a ASR y a DEF.

Para determinar el potencial expansivo remanente, los testigos de 50 mm de diámetro y 100 mm de largo son equipados con topes, los cuales ayudan el

proceso de medición realizado durante su almacenamiento. El almacenamiento se realizó en agua con cal (para determinar el potencial expansivo por DEF) y en una solución alcalina (1 M NaOH) y a altas temperaturas (80°C) para determinar su potencial expansivo por ASR.

El almacenamiento en agua no podría producir una expansión adicional producto de ASR, debido a que los álcalis que originalmente están dentro del hormigón, pueden escapar rápidamente desde el hormigón hacia el agua (por el tamaño pequeño de la probeta), y de esta forma no estarían disponibles para la reacción característica de ASR. Sin embargo, este almacenamiento es ideal para el obtener una expansión adicional debido a DEF, ya que los álcalis al salir del hormigón hacia el agua disminuyen el pH dentro de la probeta, acelerando el fenómeno. Por otra parte, el almacenamiento en una solución alcalina caliente inhibe la expansión adicional por DEF, ya que a esa temperatura alta, y pH elevado producto de la alta concentración de álcalis, la etringita no puede ser formada ya que el C-S-H en estas condiciones no libera los iones de sulfato, en cambio, con respecto al ASR estas son las condiciones más favorables en el caso de tener un árido reactivo, ya que se tiene una mayor cantidad de álcalis para la formación de gel expansivo.

Las expansiones presentadas por los testigos se muestran en la figura II-19, donde se puede apreciar que la columna C, la que no presenta agrietamiento, no tiene potencial expansivo remanente por DEF, ni por ASR. Por otra parte, los testigos de las columnas A, B y D tienen potencial expansivo remanente por DEF y ASR.

Cabe mencionar que la diferencia entre la columna C y el resto de las columnas, es que a esta se le incorporó una cantidad de ceniza volante en su dosificación para disminuir el calor de hidratación del material cementicio, y con ello bajar las temperaturas dentro del hormigón durante el fraguado. Además, La ceniza volante es conocida por su efectividad en controlar el ASR y el DEF cuando es utilizada en cantidades suficientes.

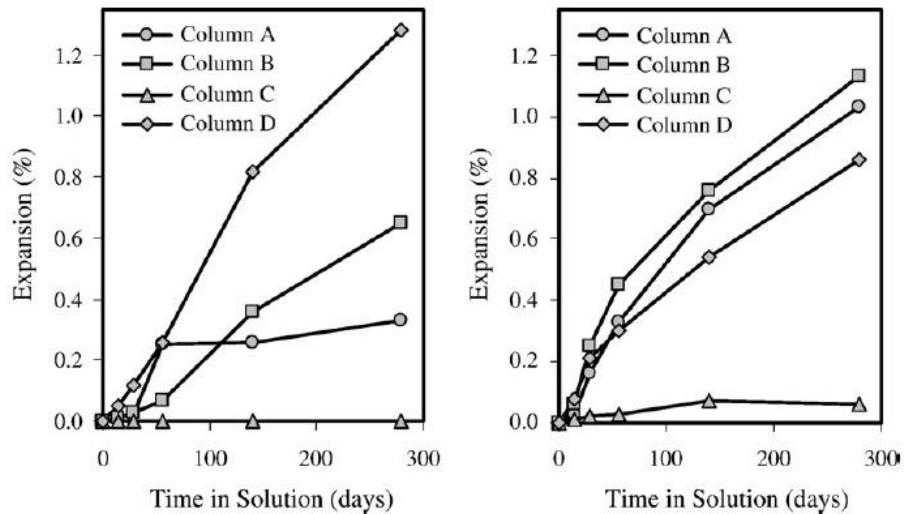


Figura II-19. Expansión de testigos de 50 mm de diámetro, en almacenamiento en agua con cal (izquierda) y solución de NaOH (derecha) (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).

A muestras pulidas provenientes de otros testigos tomados desde cada columna, se les realizó una SEM y una fluorescencia. De acuerdo a esto se pueden obtener las siguientes conclusiones con respecto a la causa del agrietamiento.

Tabla II-2. Tabla resumen de los hallazgos.

Columna	Daño en terreno	Contenido de álcalis (kg/m ³)	ASR detectado	DEF detectado	Ceniza Volante detectada
A	Severo	2.32	No	Si	No
B	Moderado	3.17	Si	Si	No
C	Ninguno	5.25	No	No	Si
D	Severo	2.69	Si	Si	No

La columna A no presenta ASR a pesar de que en todas las columnas se ocuparon los mismos áridos. Esto se atribuye a que en la columna A se utilizó un cemento con un menor contenido de álcalis. Las siguientes figuras corresponden a las SEM realizadas a muestras de esta columna, en ellas se puede ver el agrietamiento alrededor de los áridos y a través de la pasta (figura II-20, II-21, II-22 y II-23). Notar que los espacios disponibles dentro de las grietas son llenados con etringita secundaria, la cual es la recristalización de la etringita tardía que provocó la formación de esas grietas.

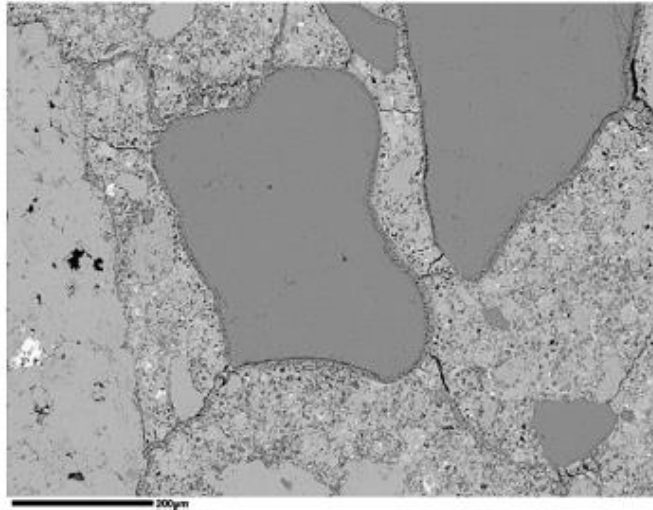


Figura II-20. SEM de una muestra obtenida de la columna A (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).

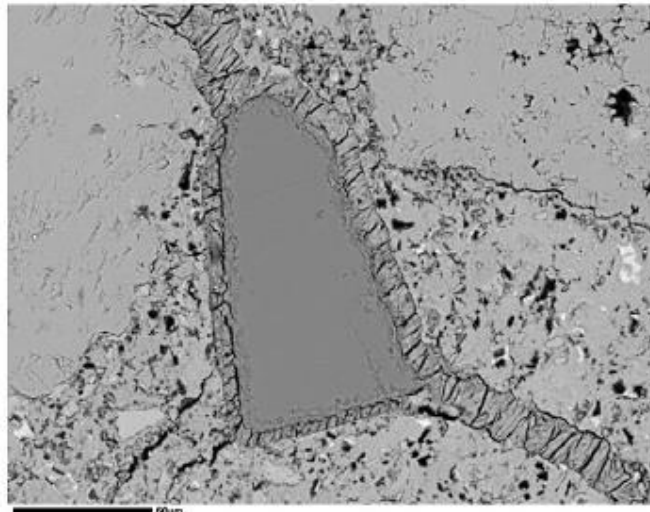


Figura II-21. SEM de una muestra obtenida de la columna A (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).

Además, se puede observar una imagen de la columna B (figura II-22), en la cual se observa el espacio entre el árido y la pasta lleno con etringita secundaria, y un árido agrietado por la formación de gel expansivo producto de ASR.

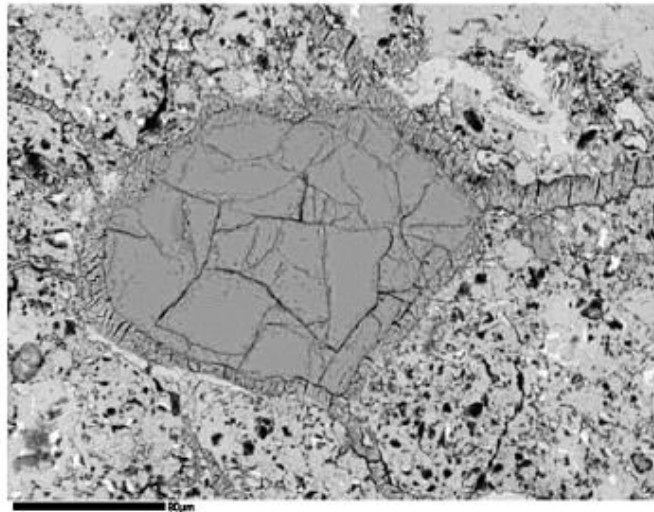


Figura II-22. SEM de una muestra de la columna B (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).

A través de una fluorescencia realizada a una muestra proveniente de la columna A, se puede apreciar que los espacios que se producen alrededor del árido producto de la expansión de la pasta, son llenados con etringita como se muestra en la figura II-23.

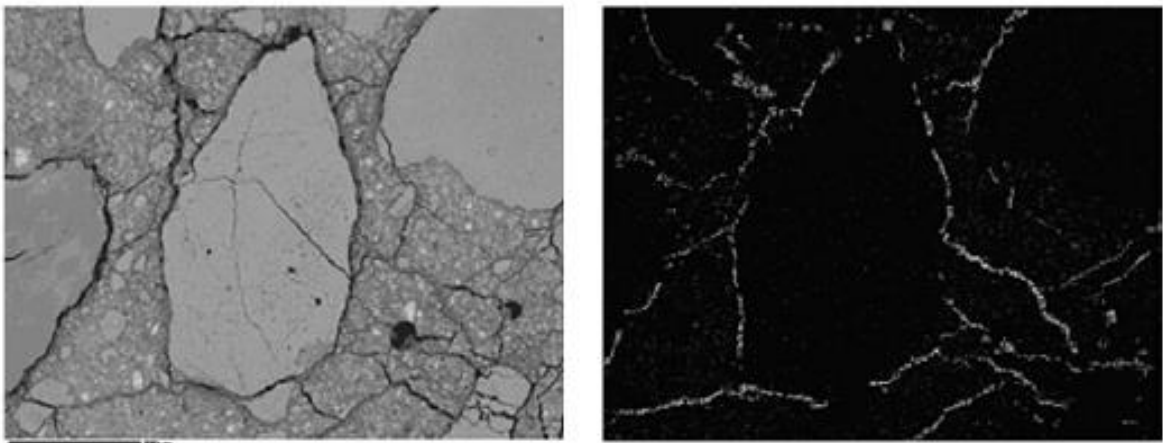


Figura II-23. SEM a la izquierda y fluorescencia donde se muestran los compuestos que tienen azufre (etringita) de la columna A (Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008).

(Thomas, Folliard, Drimalas, & Ramlochan, 2008)

II.3.9.2 Durmientes de ferrocarril afectados por DEF en Suecia.

Desde 1970 un gran número de elementos prefabricados han sido estudiados por presentar agrietamiento después de varios años de servicio en ambientes expuestos a la intemperización. En particular, un pequeño porcentaje de durmientes fabricados entre 1992 a 1996 en Suecia, los que fueron puestos en servicio de forma inmediata después de su construcción, presentaron

agrietamiento durante el invierno de 1999. Lo que llama la atención es que no todos los durmientes presentaron agrietamiento a pesar de haber sido construidos de la misma forma y utilizando materiales de similares características.



Figura II-24. Agrietamiento del extremo del durmiente (Sahu & Thaulow, 2004).

El cemento utilizado fue un cemento portland especial, y su composición química se muestra en la siguiente tabla.

Tabla II-3. Composición química del cemento utilizado en la fabricación de durmientes.

Composición química	Cemento utilizado en la fabricación de durmientes
C_3S (% en peso)	59
C_3A (% en peso)	8
Al_2O_3 (% en peso)	4,4
MgO (% en peso)	3,5
SO_3 (% en peso)	3,7
Na_2O_{eq} (% en peso)	1,16
SO_3/Al_2O_3	0,84
Finura (cm^2/g)	5500

La composición química indica un alto contenido de álcalis, sulfato y aluminato tricálcico. Adicionalmente la superficie específica es bastante alta. La dosis de cemento se mantuvo dentro del rango de los 470 kg/m^3 a los 520 kg/m^3 durante la fabricación de los durmientes. La relación agua-cemento fue de 0,4 y se añadió un aditivo superplastificante para llegar al nivel de trabajabilidad deseada. El proceso de curado del hormigón consiste en un curado inicial en los moldes en cámara húmeda durante 12 horas, posteriormente son curadas al vapor con una máxima de temperatura menor a los 60°C (medidos en el interior del hormigón) durante 5 horas.

Los durmientes agrietados y los durmientes no agrietados fueron examinados utilizando métodos petrográficos. Los resultados se muestran a continuación.

II.3.9.2.1 Observaciones de los durmientes agrietados.

A través de los métodos petrográficos, se pudo apreciar que en los durmientes agrietados existían depósitos de etringita bien desarrollada (con su forma acicular característica) en los vacíos de aire que estaban en la superficie de la muestra (figura II-25).

Además, no se encontraron signos de que la reacción álcali-agregado se haya desarrollado dentro del hormigón.

En la figura II-26 se puede apreciar los depósitos de etringita que se pudieron encontrar en la interfaz pasta agregado formando un borde alrededor de los áridos. También el vacío de aire se encuentra lleno de etringita.

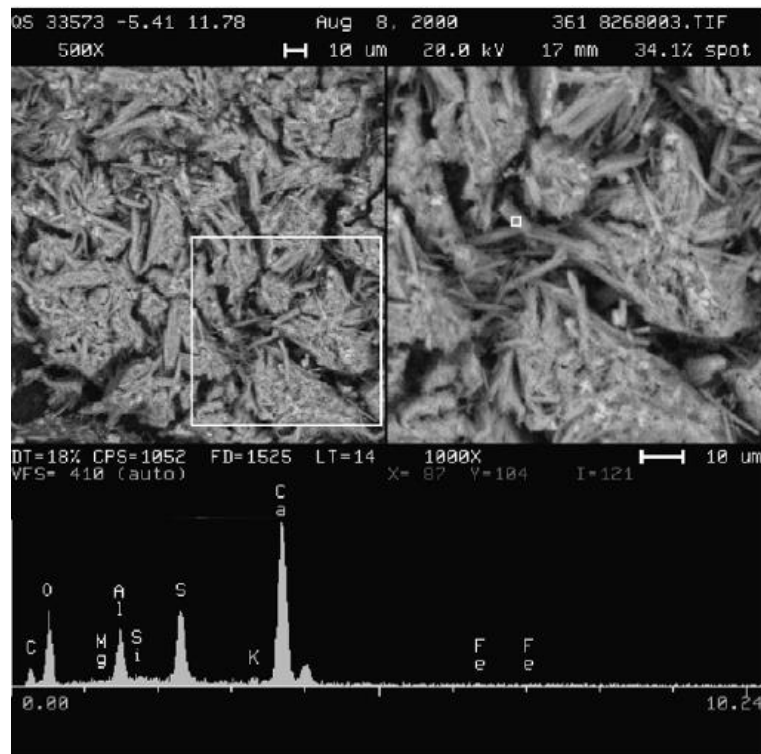


Figura II-25. Morfología y composición química de un depósito de etringita ubicado en un vacío de aire (Sahu & Thaulow, 2004).

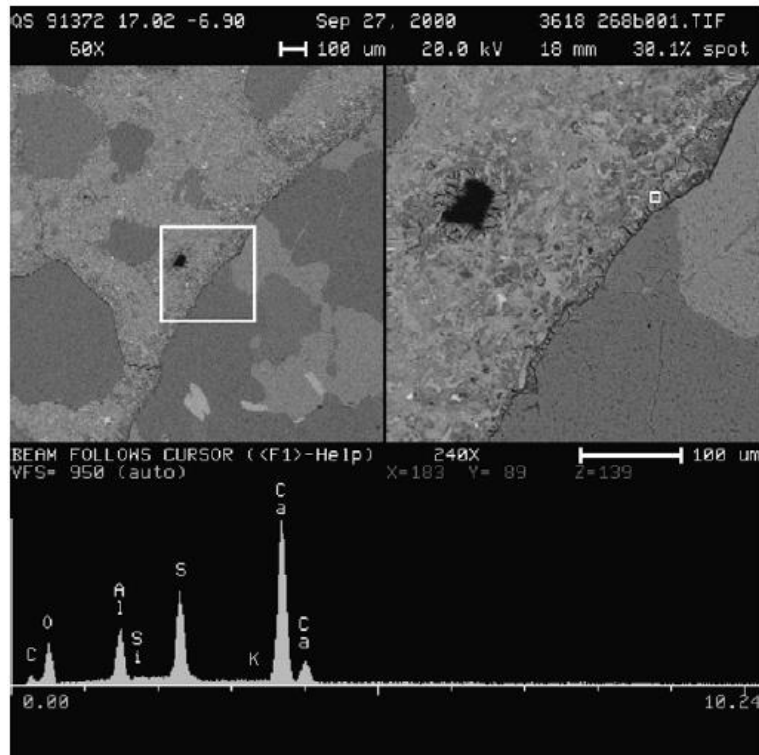


Figura II-26. Depósitos de etringita en la interfaz pasta-agregado (Sahu & Thaulow, 2004).

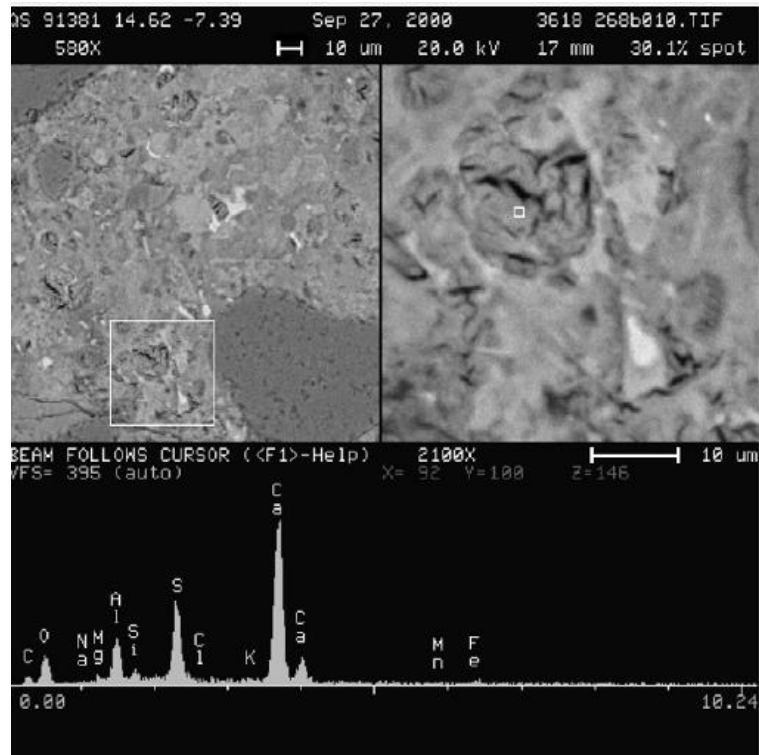


Figura II-27. Depósitos de etringita en los microporos de la pasta de cemento (Sahu & Thaulow, 2004).

La figura II-27, que corresponde a una imagen de la microestructura de la pasta a un aumento relativamente alto, muestra depósitos de etringita en los microporos de la pasta de cemento.

Las observaciones mencionadas anteriormente, sugieren que la causa del agrietamiento es la formación de etringita tardía. Las grietas no solo están en la superficie del hormigón, sino que ellas se profundizan dentro del hormigón.

II.3.9.2.2 Observaciones de los durmientes no agrietados.

Nuevos durmientes de ferrocarril fueron construidos con los mismos agregados, cemento, superplastificante, dosificación y régimen de curado, los cuales no fueron puestos en servicio. Luego de 3 meses de su construcción, se tomaron muestras del centro y de los extremos del durmiente, las que fueron analizadas.

Se pudo encontrar que los productos de hidratación internos poseían altos niveles de contenido de sulfato. De forma similar, elevados niveles de sulfato y potasio fueron observados en los productos de hidratación externos (figura II-28 y II-29).

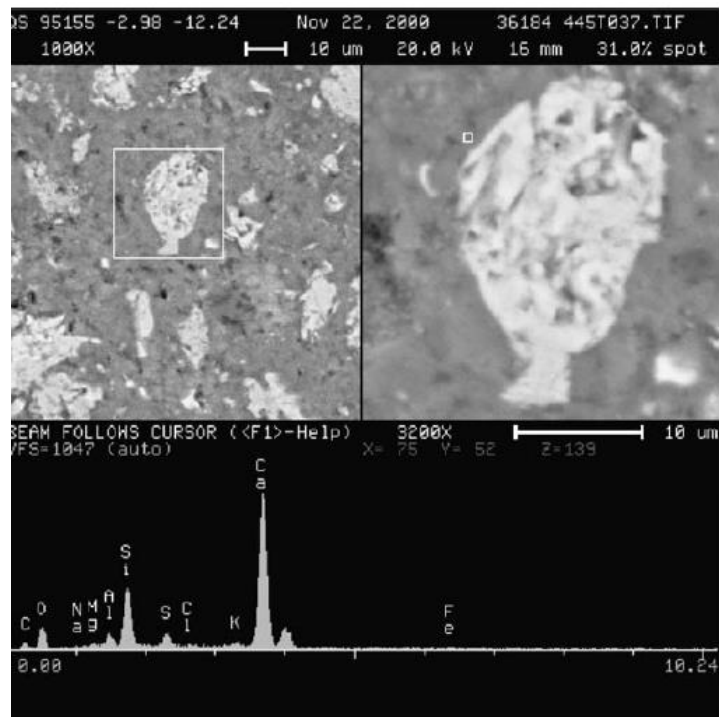


Figura II-28. Producto de hidratación interno con altos niveles de sulfato. Estos durmientes no fueron expuestos a las condiciones de servicio (Sahu & Thaulow, 2004).

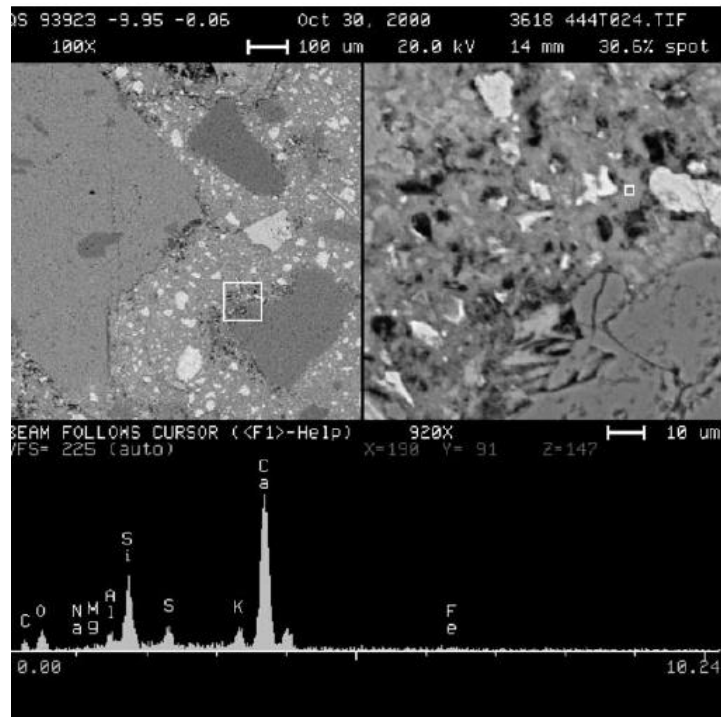


Figura II-29. Productos de hidratación externos con alto contenido de sulfato y potasio. Estos durmientes no fueron expuestos a las condiciones de servicio (Sahu & Thaulow, 2004).

De acuerdo a los antecedentes evaluados, Sahu et al concluyó lo siguiente:

- La serie de durmientes agrietados han sido dañados por la formación de etringita tardía, a una temperatura de curado menor a los 70°C, que es la condición necesaria para la aparición de DEF según varios autores.
- El alto contenido de material cementicio en el hormigón, cemento con un alta superficie específica, alto contenido de álcalis, alto contenido de sulfato, alto contenido de óxido de magnesio y alta reactividad del C_4AF provocaron que el fenómeno DEF se pudiese producir bajo los 60°C durante el proceso de curado.
- El durmiente que no está agrietado, desarrollará formación de etringita tardía en el futuro en el caso de ser expuesto a la humedad.

(Sahu & Thaulow, 2004)

II.3.10 Detección del fenómeno

En terreno, el fenómeno expansivo por formación de etringita tardía puede ser detectado por la aparición de agrietamiento multidireccional en la superficie del hormigón. Estas grietas forman una malla en donde la distancia entre grietas vecinas es de 10 a 30 cm, las que producen un deterioro de las propiedades mecánicas y disminuyen la durabilidad del material.

En los trabajos experimentales desarrollados hasta el momento, se suele confeccionar probetas prismáticas de hormigón o mortero, las cuales son sometidas a curados a altas temperaturas, para posteriormente ser almacenadas en condiciones de alta humedad. Estas son las condiciones necesarias pero no suficientes para que el fenómeno ocurra. Durante el periodo de almacenamiento, se evalúa el comportamiento expansivo de las probetas en el tiempo.

La mayoría de estos trabajos experimentales tardan un par de años en determinar la susceptibilidad de los hormigones frente al DEF. Sin embargo, en 1992 Ross Duggan desarrolló una metodología que permite determinar de forma acelerada el potencial expansivo producto de la formación de etringita tardía, obteniéndose resultados a los 30 días después de confeccionado el hormigón (Grabowski, Czarnecki, Gillot, Duggan, & Scott, 1992).

Otra metodología que permite determinar la susceptibilidad de un hormigón al fenómeno DEF, de acuerdo a la dosificación que se emplea y las temperaturas que serán alcanzadas dentro del elemento de hormigón durante el fraguado, es el propuesto por el LCPC, llamado LPC Test Method n°66: Reactivity of a concrete mix design with respect to the delayed ettringite formation – Performance Test (LCPC, 2007).

Las 2 metodologías mencionadas anteriormente son detalladas a continuación.

II.3.10.1 Método Duggan

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

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

Una vez finalizado el tratamiento de curado acelerado de las probetas, se procede a extraer a cada una de ellas testigos cilíndricos de 50 ± 5 mm de largo y un diámetro de 22 mm. Estos núcleos son posteriormente sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, el que comienza con 3 días de

almacenamiento bajo agua a una temperatura de 21°C, seguido de 2 ciclos de secado y humedecimiento (1 ciclo corresponde a 1 día en horno seco y luego 1 día bajo agua), para finalizar con 3 días de secado como se muestra en la figura II-30.

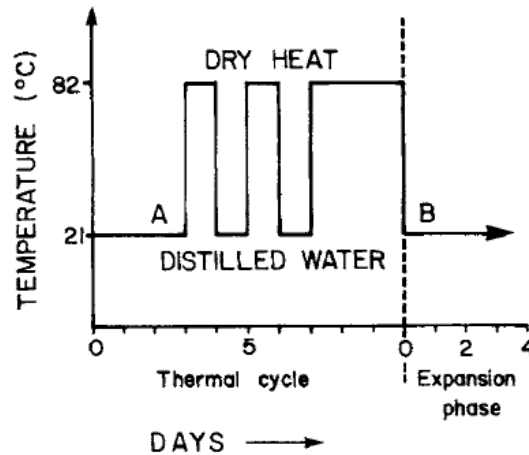


Figura II-30. Ciclos de humedecimiento Secado (Grabowski, Czarnecki, Gillot, Duggan, & Scott, 1992).

Terminado los ciclos de humedecimiento y secado, las probetas son almacenadas bajo agua para tomar las mediciones de expansión. La metodología original considera como día 0 al primer día luego de los 10 días de los ciclos de humedecimiento y secado. La medición en este día es considerada como el largo inicial para calcular la expansión de las probetas.

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

(Grabowski, Czarnecki, Gillot, Duggan, & Scott, 1992)

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

- La formación de etringita retardada (DEF) es la causa principal de la expansión de morteros u hormigones sometidos al Ensayo Duggan.
- El cemento, con las reacciones de los componentes calcio aluminosos con los sulfatos procedentes de la adición de yeso constituye el principal responsable de la expansión por este fenómeno.
- Los severos ciclos de humedecimiento y secado provoca la aparición de microgrietas, las cuales permiten una aceleración del fenómeno a causa del debilitamiento de la microestructura, lo que facilita la entrada de agua y el aumento de los potenciales espacios para la nucleación de la etringita.

- La cantidad de etringita presente y la frecuencia de microfisuración son proporcionales a las expansiones finales medidas en las probetas de hormigón.
- El contenido de SO_3 y K_2O , y la relación molar $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ son valores determinantes en las expansiones obtenidas mediante la metodología del Ensayo Duggan.

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

(Montecinos Cuadros, 2012)

II.3.10.2 LPC Test Method n°66

El LPC Test Method n°66: Reactivity of a concrete mix design with respect to the delayed ettringite formation – Performance testing, fue desarrollado por la French Technical Association of the Hydraulic Binder Industry (ATILH), el Concrete Industry Study and Research Centre (CERIB) y el LCPC.

Este ensayo fue validado usando hormigones cuyos comportamientos in situ eran conocidos, y dentro de los cuales se había presenciado la aparición del fenómeno por formación de etringita tardía. La reproducibilidad del ensayo también fue evaluada, obteniéndose el mismo resultado para probetas hermanas acerca de la no reactividad o potencial reactividad de los hormigones evaluados en diferentes laboratorios. Debido a lo anterior, podemos decir que este es un método bastante confiable para determinar si un hormigón es susceptible a DEF.

El ensayo utiliza probetas de hormigón, que pueden ser coladas en el laboratorio en moldes prismáticos de 70x70x282 mm (figura II-31) o en

cilindros de 110 mm de diámetro y 220 mm de largo. Para cada hormigón se deben probar 3 probetas de las mismas características.

Posterior a la confección del hormigón, se intenta simular el curado que se tendría en terreno en una cámara con control de temperatura que mantiene a las probetas en una condición de humedad cercana a la saturación. Para conocer las temperaturas que se obtendrían en terreno se recomienda realizar un cálculo numérico, o también se puede hormigonar un elemento con las dimensiones necesarias para simular la condición de masivo, y medir las temperaturas que se desarrollan con el uso de termocuplas.

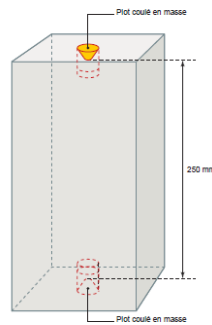


Figura II-31. Probeta prismática con sus respectivos topos o referencias de medición (LCPC, 2009).

Luego las probetas se someten a ciclos de humedecimiento secado (figura II-32), los que consisten en:

- 7 días de secado a 38°C y una humedad relativa menor al 30%.
- 7 días bajo agua a 20°C.
- 7 días de secado a 38°C y una humedad relativa menor al 30%.
- 7 días bajo agua a 20°C.

Finalmente las probetas son colocadas en agua, y se controlan sus longitudes regularmente.

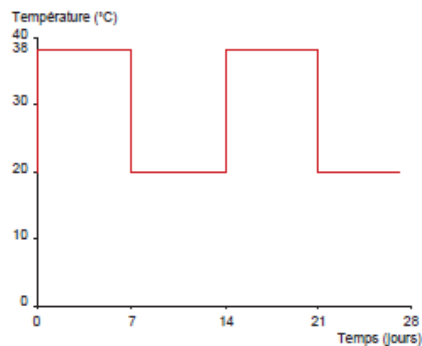


Figura II-32. Ciclos de Humedecimiento-Secado (LCPC, 2009).

La dosificación y el curado son considerados adecuados (el hormigón no es susceptible a DEF) cuando uno de los 2 criterios siguientes se cumple:

- Criterio 1
 - El promedio de la deformación longitudinal de 3 probetas es menor que 0,04% y no existen valores individuales que excedan los 0,06% al final de 12 meses de seguimiento.
 - La variación mensual en promedio de la deformación longitudinal para 3 probetas es menor a 0,004% a partir del tercer mes.

- Criterio 2
 - Si las probetas tienen una expansión longitudinal entre 0,04% y 0,07% a los doce meses, el periodo de medición debe ser extendido hasta los 15 meses.
 - La variación mensual en promedio de la deformación longitudinal para 3 probetas a partir de los 12 meses es menor que 0,004% y la variación acumulada entre el doceavo mes y el quinceavo mes permanece bajo el 0,006%.

Para confirmar la causa de la expansión, este método recomienda realizar una microscopia de barrido electrónico siempre y cuando expansiones significativas del hormigón hayan sido detectadas.

CAPÍTULO III : ESTUDIO EXPERIMENTAL

III.1 INTRODUCCIÓN

El planteamiento de la investigación contempla estudiar, a través de un hormigón típico para obras masivas (fundaciones, represas, estructuras industriales, etc.) el potencial efecto expansivo de los distintos materiales cementicios bajo condiciones de ensayo acelerado, y conocer el eventual efecto inhibitor de dichas reacciones expansivas asociado a la incorporación de puzolana natural. Para ello, se confeccionan series de probetas que provienen de distintas amasadas, las cuales se diferencian en la cantidad de puzolana natural y SO_3 que poseen los materiales cementicios empleados. Las probetas pertenecientes a cada dosificación se dividen en 4 grupos. Cada grupo es sometido a un tratamiento distinto. Estos tratamientos se muestran la figura III-1.

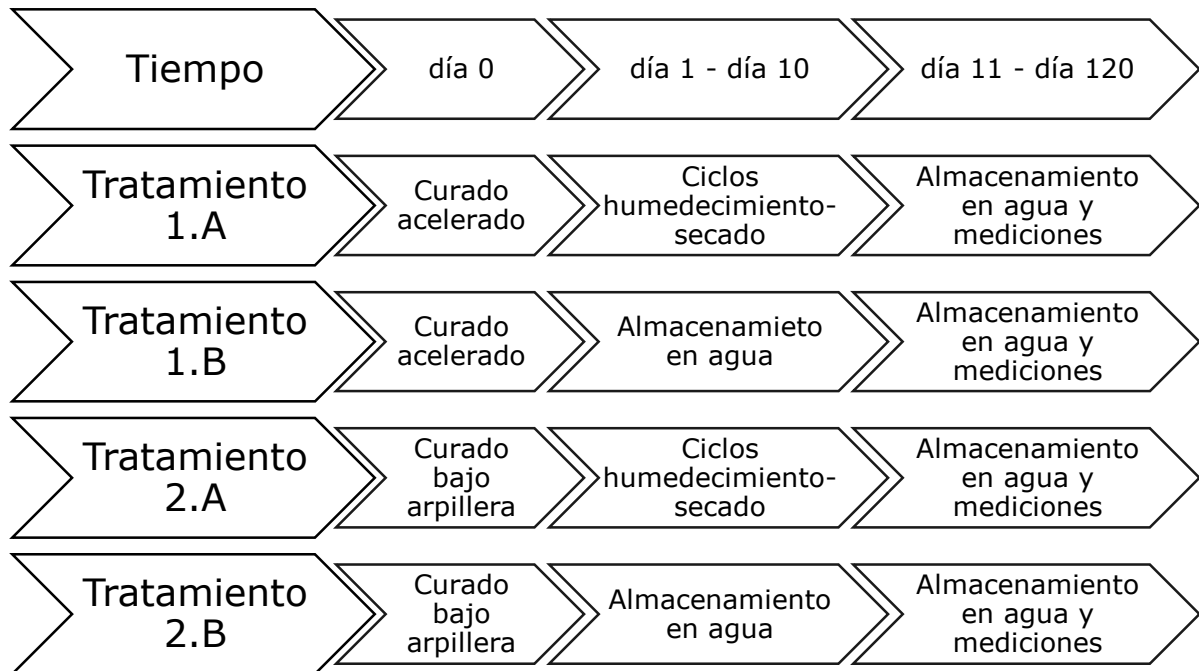


Figura III-1. Esquema de los tratamientos a las que son sometidas las probetas que utilizan cada uno de los materiales cementicios empleados en el estudio.

Los tratamientos 1.A y 1.B tienen curado acelerado, que consiste en elevar la temperatura del hormigón sobre los 80°C durante las primeras horas posteriores a la confección, con el propósito de llevar a la etringita a un rango de temperaturas en el cual la etringita ya formada se descompone, y la potencial etringita no se forma, dando las condiciones para que el fenómeno

DEF se desarrolle durante el posterior almacenamiento bajo agua. Como se ha mencionado anteriormente, el fenómeno DEF evoluciona lentamente, por lo que para acelerar la aparición de expansiones producto de la formación de etringita tardía, se aplican los ciclos de humedecimiento secado en el tratamiento 1.A, los cuales tienen el fin de microfisurar la estructura de hormigón, para que el agua pueda ingresar a la probeta más fácilmente, y para que la respuesta del hormigón a las tensiones de la pasta producto de la formación de etringita, sea más débil y las expansiones de las probetas se desarrollen más rápidamente. El tratamiento 1.B muestra el normal avance del fenómeno.

El tratamiento 2.A pretende mostrar el efecto de los ciclos humedecimiento secado, en un hormigón que no debiese tener problemas por formación de etringita tardía, ya que fue curado a temperaturas normales. Además, al comparar las expansiones de las probetas que han sido sometidas al tratamiento 1.A y 2.A se puede notar el efecto que tiene el curado acelerado para una misma dosificación. El tratamiento 2.B, muestra el comportamiento expansivo en el tiempo de un hormigón que es curado a temperaturas normales, y al cual no se le ha aplicado ningún método para debilitar la estructura de la probeta.

Al comparar las expansiones obtenidas en el tratamiento 1.A para todas las dosificaciones, es posible notar el efecto de la incorporación de puzolana como reemplazo de cemento, en el comportamiento expansivo del hormigón por la formación de etringita tardía.

Además se debe considerar que, el tamaño de las probetas que se utilizan en los estudios, el libre acceso que tiene el agua durante el periodo de almacenamiento, y la ausencia de restricciones geométricas a la expansión, son las condiciones más favorables (con respecto a las condiciones reales en terreno) para que el fenómeno DEF se desarrolle. Debido a lo anterior, las expansiones obtenidas en el laboratorio y la velocidad con que éstas se desarrollan, son mayores a las que se obtendrían en terreno utilizando el mismo hormigón, y el mismo curado. Las expansiones y agrietamiento para un hormigón en terreno, ocurren de una forma mucho más lenta. (Taylor, Famy, & Scrivener, 2001)

Notar que el tratamiento 1.A está basado en la metodología propuesta por Duggan (Grabowski, Czarnecki, Gillot, Duggan, & Scott, 1992), pero con algunas variaciones que intentan mejorar el método de ensayo.

III.2 DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

III.2.1 Caracterización de los Materiales

A continuación se mencionan y caracterizan todos los materiales empleados durante el estudio experimental a realizar.

III.2.1.1 Cemento

Los sacos de cemento empleados en la confección de los hormigones, clasifican como cemento clase portland grado alta resistencia, según la NCh148

En las tablas III-1, III-2 y III-3 se muestran las propiedades físicas y químicas de este material cementicio, evaluadas según las normas chilenas de ensayo correspondientes.

Tabla III-1. Propiedades físicas cemento portland puro.

Propiedad	Norma	Cemento Portland Puro
Fraguado Inicial (minutos)	NCh152	100
Fraguado Final (minutos)	NCh152	150
Superficie Específica Blaine (cm^2/g)	NCh159	4.100
Peso Específico (g/ml)	NCh154	3,12

Tabla III-2. Propiedades químicas cemento portland puro.

Propiedad	Norma	Cemento Portland Puro
Pérdida por Calcinación (%)	NCh147	1,5
Residuo Insoluble (%)	NCh147	1,0
Contenido de SO_3 (%)	NCh147	2,8
Contenido de MgO (%)	NCh147	2,0

Tabla III-3. Óxidos principales cemento portland puro.

Composición de Óxidos	Norma	Cemento Portland Puro
SiO_2 (%)	NCh147	21,00
Al_2O_3 (%)	NCh147	5,11
CaO (%)	NCh147	63,60
Fe_2O_3 (%)	NCh147	2,86
SO_3 (%)	NCh147	2,80
MgO (%)	NCh147	1,95
Na_2O (%)	ASTM C114	0,51
K_2O (%)	ASTM C114	0,40

III.2.1.2 Puzolana Pudahuel

La puzolana a emplear proviene del yacimiento explotado por Melón localizado en Pudahuel. Este material cementicio suplementario es sometido a molienda en un molino de bolas, hasta llegar a un nivel de finura equivalente a la del cemento portland que se utiliza. En las tablas III-4 y III-5 se presentan las propiedades físicas y químicas de esta adición.

Tabla III-4. 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 III-5. Composición química puzolana Pudahuel.

Composición de Óxidos	Norma	Puzolana Pudahuel
SiO_2 (%)	NCh147	69,57
Al_2O_3 (%)	NCh147	13,10
CaO (%)	NCh147	2,74
Fe_2O_3 (%)	NCh147	1,69

Adicionalmente se realiza el ensayo de actividad puzolánica según la norma chilena de puzolanas NCh161, mostrándose los resultados en la tabla III-6.

Tabla III-6. 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 $42 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ establecido por la norma, por lo que es apta para su uso como adición en el cemento.

III.2.1.3 Yeso

El yeso a emplear proviene del yacimiento explotado por Melón. Este material es sometido a molienda en un molino de bolas, hasta llegar al nivel de finura que se muestra en la tabla III-7.

Tabla III-7. Propiedades Físicas Yeso.

Propiedad	Norma	Yeso
Superficie Específica Blaine (cm ² /g)	NCh159	8.400
Peso Específico (g/ml)	NCh154	2,57

III.2.1.4 Áridos

Los áridos a emplear corresponden a una gravilla y una arena gruesa provenientes de Agua Santa. En las siguientes tablas se muestran las propiedades de los agregados evaluadas según las normas chilenas de ensayo.

Se considera que para la confección de los hormigones se utiliza un árido combinado que se forma a partir de un 40% de gravilla y un 60% de arena. Las curvas granulométricas para la gravilla, arena y el árido combinado de acuerdo a la NCh165, se muestran en la tabla III-8 y figura III-2. Las propiedades físicas de la gravilla y de la arena son detalladas en las tablas III-9 y III-10.

Tabla III-8. Granulometría de los Áridos.

Tamiz (") ASTM	Tamiz (mm)	% Que Pasa		
		Gravilla	Arena	Árido Combinado
2"	50	-	-	-
1 1/2"	37,5	-	-	-
1"	25	100	-	100
3/4"	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

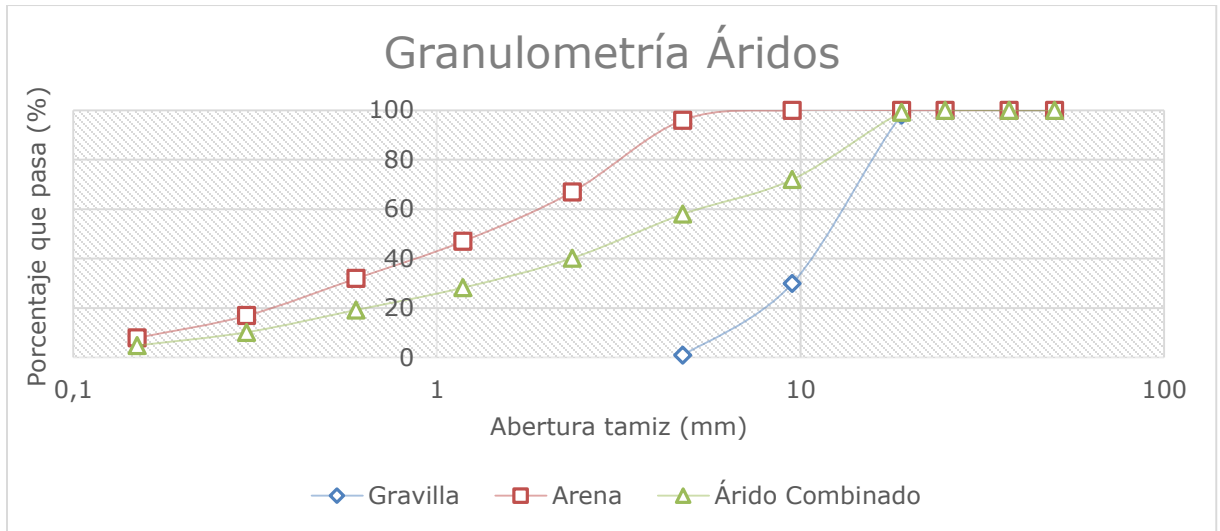


Figura III-2. Granulometría de los áridos.

Tabla III-9. Propiedades Físicas de los Áridos

Propiedad	Norma	Gravilla
Tamaño máx. 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 III-10. Propiedades Físicas de los Áridos

Propiedad	Norma	Arena
Tamaño máx. 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

III.2.1.5 Agua de amasado

El agua a ocupar en la confección de los hormigones es agua potable a temperatura controlada de laboratorio ($20 \pm 3^\circ\text{C}$).

III.2.2 Material Cementicio

El material cementicio es la mezcla de cemento Portland puro, puzolana natural y yeso. Durante la experiencia se evalúan 6 materiales cementicios, los cuales se diferencian en el porcentaje de adición de puzolana y los porcentajes de SO_3 (tabla III-11). La notación utilizada para designar los materiales cementicios es la siguiente:

Clase del material cementicio³_Contenido de SO₃_Contenido de Puzolana.

Para obtener estos materiales cementicios se deben mezclar el cemento Portland, puzolana y yeso en las proporciones que se muestran en la tabla III-12 y figura III-3. El yeso corrector se incorpora con el fin de obtener los niveles de SO₃ deseados. Las proporciones son determinadas considerando el contenido de SO₃ del cemento portland (2,8%) y el contenido de SO₃ del yeso (46,5%⁴).

Tabla III-11. Materiales cementicios confeccionados para su estudio.

Material cementicio	Clase del material cementicio	SO ₃ (%)	Puzolana (%)
P_2,8_0	Portland	2,8	0
P_3,5_0	Portland	3,5	0
PP_2,8_15	Portland Puzolánico	2,8	15
PP_3,5_15	Portland Puzolánico	3,5	15
PP_2,8_30	Portland Puzolánico	2,8	30
PP_3,5_30	Portland Puzolánico	3,5	30

Tabla III-12. Proporciones utilizadas en la confección de los materiales cementicios

Material Cementicio	Cemento Portland Puro (%)	Yeso (%)	Puzolana (%)
P_2,8_0	100,00	0,00	0,00
P_3,5_0	98,40	1,60	0,00
PP_2,8_15	84,04	0,96	15,00
PP_3,5_15	82,44	2,56	15,00
PP_2,8_30	68,08	1,92	30,00
PP_3,5_30	66,48	3,52	30,00

³ La norma NCh148 define la clase de los materiales cementicios de acuerdo a su composición.

⁴ La obtención del contenido de SO₃ del yeso se realiza considerando su fórmula química CaSO₄2H₂O.

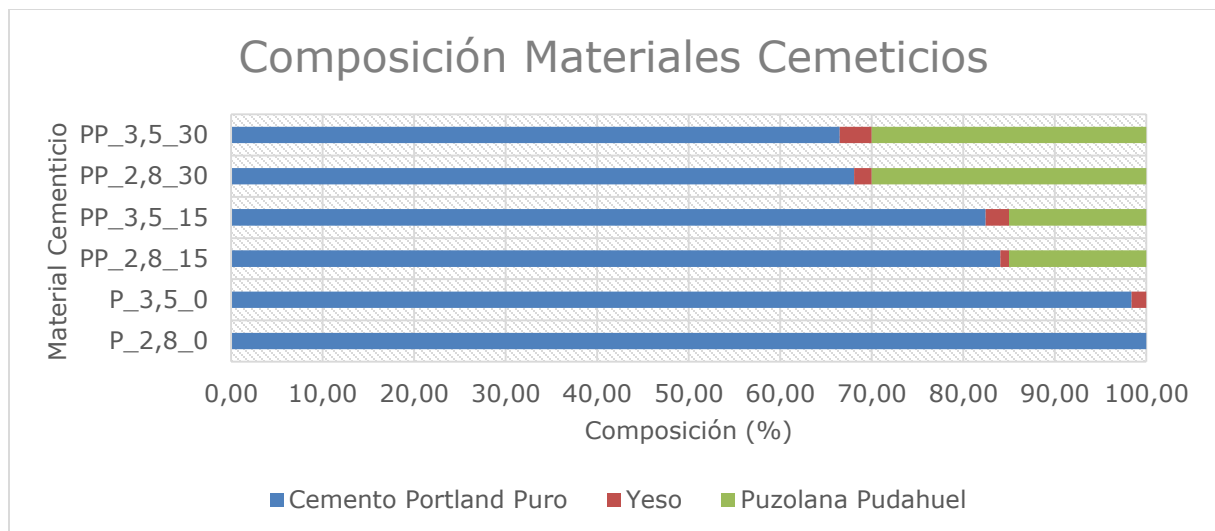


Figura III-3. Proporciones utilizadas en la confección de los materiales cementicios

III.2.3 Materialización y acondicionamiento de molde y probetas

El molde consiste en 2 largueros y 2 costados de acero, una base de madera, 4 fijadores de acero y 2 barras de hilo con tuercas en sus extremos. Los costados de acero van insertos en los largueros, unidos a presión utilizando una barra de hilo con tuercas que aprietan la parte exterior de los largueros uno contra el otro. Estas piezas se unen a la base con fijadores hechos de pletinas de acero. El larguero posee una serie de orificios en donde se insertan los topes que posteriormente quedan dentro del hormigón moldeado.

El loseta de hormigón que se obtiene posteriormente al desmolde, es cortado para formar 5 probetas prismáticas de 273 mm de largo, con un sección transversal de 80 x 80 mm. Estas probetas están dotadas de topes en sus extremos, los cuales sirven para posicionarlas dentro del aparato medidor de la longitud. Los topes se construyen a partir de una barra de hilo de 6 mm de diámetro, tienen una longitud total de 30 mm, de los cuales 20 mm van dentro de la probeta y 10 mm quedan en el exterior de esta.

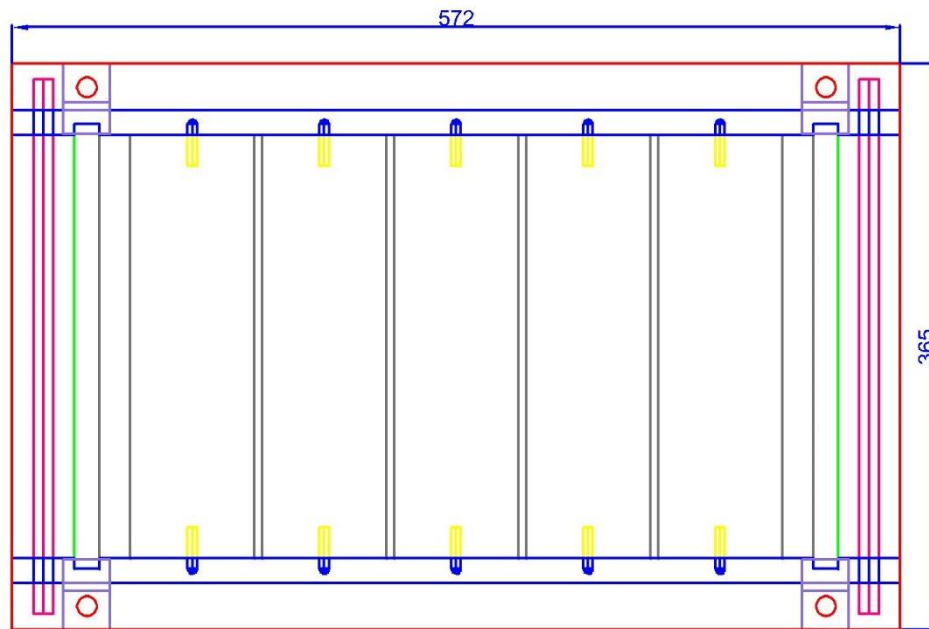


Figura III-4. Vista en planta del diseño del molde.



Figura III-5. Vista isométrica molde de la loseta de hormigón.



Figura III-6- Vista lateral molde de la loseta de hormigón.



Figura III-7. Vista superior molde de la loseta de hormigón.

Antes de llenar el molde con hormigón, se coloca silicona en las juntas entre los largueros, costados y base de madera, con el fin de evitar pérdidas de lechada. Posteriormente se cubre la parte interior con líquido desmoldante, y se procede a insertar los topes en los orificios del larguero diseñados para esto. Luego se mide la distancia libre (d_i) para cada probeta, que corresponde a la longitud desde la parte interior de los 2 topes que quedaran dentro de una probeta prismática.

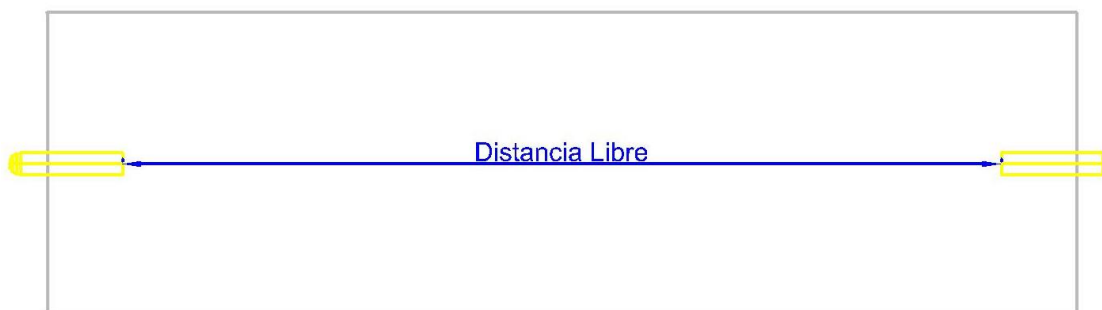


Figura III-8. Distancia libre entre toques de la probeta (235 mm).

III.2.4 Dosificación del hormigón

La dosificación elegida se muestra en la tabla III-13, y mantiene las proporciones de las mezclas utilizadas en estudios realizados con los mismos fines (determinar el potencial expansivo por la formación de etringita tardía) (Grabowski, Czarnecki, Gillot, Duggan, & Scott, 1992) (Nguyen, Leklou, Aubert, & Mounanga, 2013). La dosificación tiene una alta dosis de material cementicio, y por ello la cantidad de pasta es cercana al 40% en volumen.

Tabla III-13. Dosificación tipo.

Dosificación	
Material Cementicio (kg/m ³)	461
Gravilla (kg/m ³)	659
Arena (kg/m ³)	988
Agua (kg/m ³)	221
Relación A/MC	0,48

Con cada material cementicio en estudio se confecciona un hormigón de prueba de acuerdo a la dosificación mostrada anteriormente.

III.2.5 Confección de los hormigones

La confección de los hormigones se realiza según la norma NCh1018. Posteriormente se determina la docilidad mediante el método del asentamiento del cono de Abrams (NCh1019), se determina el contenido de aire (NCh2184) y la densidad aparente del hormigón fresco (NCh1564).

Los hormigones de prueba se designan con el mismo nombre del material cementicio que es utilizado en su confección.

III.2.6 Llenado de Moldes

Luego de la preparación de cada mezcla, se llenan los moldes cúbicos de resina de 15 cm de arista para ensayos de compresión (NCh1017) y 2 moldes de loseta que se utilizan en el ensayo de expansividad.

Los 2 moldes de la loseta son vibrados durante 45 s en la mesa vibradora, para posteriormente platachar la superficie para obtener una mejor terminación.



Figura III-9. Molde relleno de hormigón antes del vibrado.



Figura III-10. Platachado posterior al vibrado de la loseta.

III.2.7 Curado Inicial

Posterior a la confección de las losetas de hormigón, éstas se dejan curando en el laboratorio bajo una arpillera húmeda. Luego de 2 horas se toma una loseta y se cura de forma acelerada, mientras que la otra loseta continúa con su curado inicial bajo arpillera húmeda.

El curado acelerado consiste en colocar la loseta dentro de un horno seco, elevar la temperatura desde los 21°C (Temperatura ambiente de laboratorio) hasta los 85°C en un periodo de 2 horas, para luego mantener esta temperatura por un lapso de 6 horas. Posteriormente se apaga el horno y se deja enfriar la loseta dentro de éste.



Figura III-11. Loseta cubierto de una lámina de plástico.

Cabe mencionar que antes de comenzar el proceso de curado acelerado, se acondiciona la loseta colocándole un plástico en la superficie que minimiza las posibles pérdidas de agua (figura III-11).

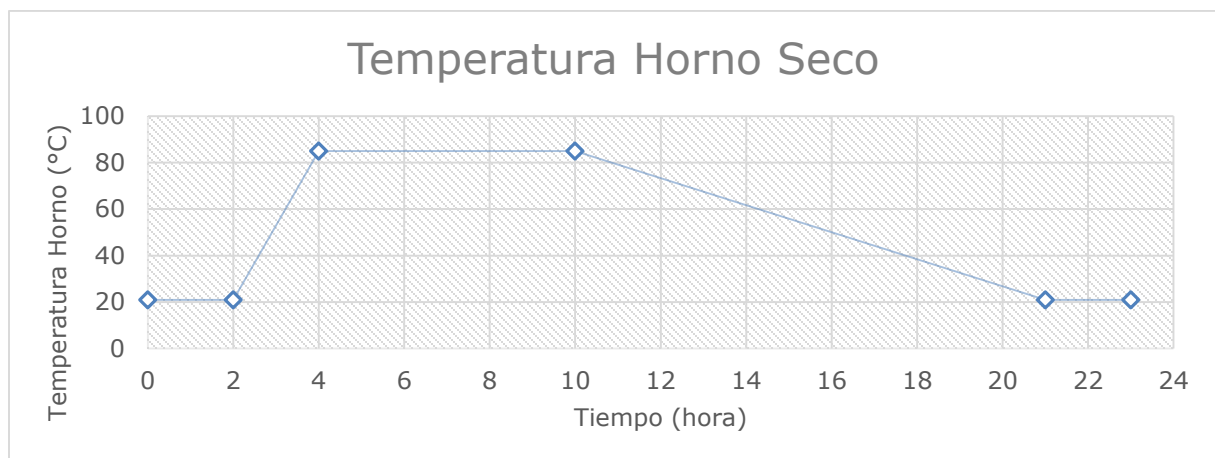


Figura III-12. Evolución de la temperatura durante el curado acelerado.

El curado acelerado tiene el objetivo de elevar la temperatura dentro de la masa de hormigón, llevando a la etringita al rango de temperaturas en la cual este compuesto de hidratación no es estable y se descompone.



Figura III-13. Horno seco en el cual se lleva a cabo el curado acelerado.

III.2.8 Aserrado de la Loseta

Al día siguiente de la confección de cada hormigón, se procede a desmoldar los 2 pastelones para posteriormente ser aserrados, dando origen a 10 probetas prismáticas con topes de acero inoxidable en sus extremos. Notar que 5 de estas probetas provienen de la loseta curada de forma acelerada, y las 5 restantes de la loseta curada bajo arpillera húmeda.



Figura III-14. Loseta curada de forma acelerada antes de ser desmoldada.



Figura III-15. Losetas después de ser desmoldadas. La loseta de la parte superior de la imagen fue curada aceleradamente.



Figura III-16. Aserrado de la loseta que se realiza a las 24 h después de la confección del hormigón.



Figura III-17. Probeta obtenida del aserrado de la loseta.

III.2.9 Medición inicial de las probetas

Luego del proceso de aserrado se mide cada una de las probetas. Esta medición corresponde a la lectura inicial (L_0).

III.2.10 Ciclos Humedecimiento Secado (C.H.S.)

3 de cada 5 probetas provenientes de una misma loseta son sometidas a ciclos humedecimiento secado. Estos ciclos consisten en:

- 3 días bajo el agua en una piscina a 21°C.
- 1 día en horno seco a 82°C.
- 1 día bajo el agua en una piscina a 21°C.
- 1 día en horno seco a 82°C.
- 1 días bajo el agua en una piscina a 21°C.
- 3 días en horno seco a 82°C.

La finalidad de los ciclos es que, producto de los cambios de longitud debido a las variaciones de temperatura de la probeta, ésta se microfisure, facilitando y acelerando las expansiones en caso de producirse DEF.

Las 2 probetas restantes de cada loseta, se mantienen dentro de una piscina mientras se realizan los ciclos humedecimiento secado.

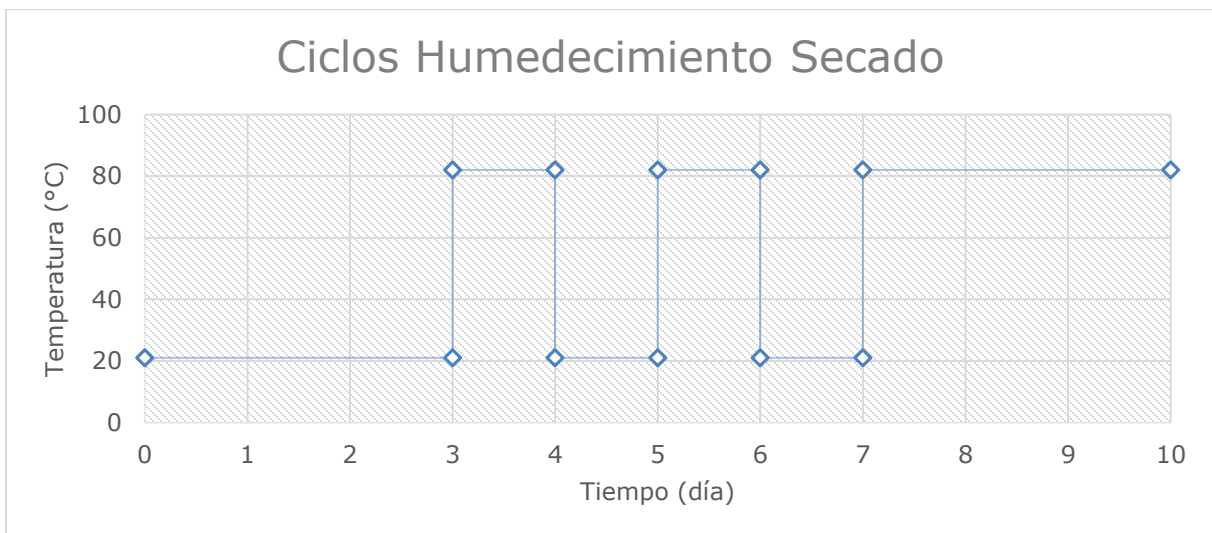


Figura III-18. Ciclos humedecimiento secado.



Figura III-19. Probetas siendo retiradas del horno.



Figura III-20. Probetas después del secado en horno durante 1 día.



Figura III-21. Probetas después del humedecimiento durante 1 día.

III.2.11 Almacenamiento y medición de las expansiones

Luego de los tratamientos mencionados anteriormente, se procede a almacenar las probetas bajo agua a una temperatura de 21°C. Durante este periodo se continúa con la medición de las probetas.

La medición de las probetas se realiza utilizando un comparador de mediciones, que nos permite obtener la diferencia que existe entre el largo de una probeta con el largo de una barra patrón, la cual no sufre variaciones significativas de longitud en el tiempo.

La medición se realiza periódicamente, y se calcula el porcentaje de expansión como la diferencia entre la lectura obtenida (L_x) con la lectura inicial (L_0), dividida la distancia libre de cada probeta (d_l).

$$\%Expansión_x = \frac{L_x - L_0}{d_l} \times 100$$



Figura III-22. Medición de probeta.

III.2.12 Resistencia a compresión

Las probetas cúbicas provenientes de los hormigones de prueba, son ensayadas a compresión a las edades de 7, 28 y 56 días, de acuerdo a la norma NCh1037.

III.2.13 Microscopía de barrido electrónico (SEM)

Se toma una muestra de una de las probetas que presentó mayores expansiones longitudinales, para ser examinada por medio de microscopía de barrido electrónico (SEM). La muestra se obtiene cortando una sección transversal de espesor 4 mm en la zona central de la probeta, posteriormente se vuelve a cortar hasta llegar a una muestra de aproximadamente 20x20

mm² con un espesor de 4 mm. Esta muestra es pulida en un proceso estándar de lijado para darle la terminación final.



Figura III-23. Pulido de las muestras.



Figura III-24. Muestra terminada.

El análisis de la muestra se realiza en el laboratorio SEM del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Previo a su ingreso al microscopio, se efectúa metalizado mediante una delgada capa de carbono a través del método de vaporización.



Figura III-25. Laboratorio SEM Depto. Geología U de Chile.

III.2.14 Resumen

En la figura III-26 se muestra de forma esquematizada, el método empleado para evaluar el potencial expansivo de las probetas provenientes de los hormigones de prueba confeccionados con cada uno de los seis materiales cementicios en estudio. Se puede apreciar que el método de ensayo implica 4 tratamientos que se efectúan de forma paralela, los cuales tienen diferentes objetivos que se detallan a continuación.

III.2.14.1 Tratamiento 1.A: Curado Acelerado / Ciclos Humedecimiento Secado (Duggan Modificado)

En este tratamiento, el hormigón confeccionado es curado de forma acelerada, induciendo altas temperaturas en el hormigón a edades tempranas, con el objeto de transformar la etringita en monosulfato incorporado en los compuestos hidratados C-S-H y otros. Posteriormente se aplican ciclos de humedecimiento secado, con el fin de facilitar el microfisuramiento al interior de las probetas, y de esta forma se active el fenómeno expansivo DEF (figura III-27).

Este tratamiento es similar al especificado en el método Duggan en lo correspondiente al curado acelerado que se aplica, pero se diferencia de este en los ciclos humedecimiento secado, ya que Duggan utiliza testigos obtenidos de las probetas para los efectos de medir la respuesta expansiva. En el presente método de ensayo, la probeta completa es sometida a los ciclos de humedecimiento secado, porque se consideró que el testigo es poco representativo del hormigón por su pequeño tamaño en comparación al tamaño máximo de árido que se tiene en la dosificación. Debido a la modificación anterior, ya no son aplicables los límites propuestos en el método Duggan indicativos de un comportamiento expansivo por formación de etringita tardía.

Por otra parte, el tratamiento 1.A (Dugan modificado) es similar al LPC Test Method n°66, ya que en ambas metodologías se utiliza una probeta prismática de hormigón de dimensiones semejantes para la toma de mediciones, además que ambos métodos incluyen ciclos de humedecimiento secado, que buscan dañar la microestructura con el fin de acelerar la evolución expansiva producto del DEF. Los ciclos aplicados por el LPC n°66 son más prolongados, pero con una variación de temperaturas menor, por lo que se estima que, el daño inducido en la probeta es menor en comparación al que obtiene de la aplicación de más ciclos y de cambios más severos de temperatura, como es el caso de los ciclos humedecimiento secado de Duggan, por lo que el desarrollo de las expansiones es más lento y las expansiones finales son menores en el caso del LPC n°66, dado un mismo curado inicial y tipo de hormigón. Considerando la influencia de los ciclos de humedecimiento secado, es posible suponer que, al adoptar el criterio propuesto por el LPC Test Method n°66 (0,040%) para determinar la susceptibilidad de un hormigón al desarrollo de la formación de etringita tardía para el tratamiento 1.A, sería una condición conservadora. De todas formas sería conveniente hacer una verificación de esta hipótesis a través de ensayos experimentales.

III.2.14.2 Tratamiento 1.B: Curado Acelerado

Este tratamiento simula el normal avance del fenómeno DEF en el hormigón, ya que se busca activar la transformación de la etringita en monosulfato disperso a través de las altas temperaturas provocadas por el curado acelerado, pero no se efectúan los ciclos de humedecimiento secado, sino se mantienen las probetas en el régimen de curado húmedo bajo agua (figura III-28).

III.2.14.3 Tratamiento 2.A: Curado Húmedo / Ciclos Humedecimiento Secado

En este tratamiento las probetas de hormigón reciben el tratamiento de curado húmedo seguido de los ciclos humedecimiento secado, con el fin de evaluar el efecto que éste tiene sobre ellas cuando no se ha activado el fenómeno DEF, ya que la loseta es curada bajo arpillera húmeda, por lo que no se produce la temperatura requerida para activar la transformación de la etringita (figura III-29).

III.2.14.4 Tratamiento 2.B: Curado Húmedo

Este tratamiento se realiza para tener una referencia de cómo es la evolución en término de expansiones, de un hormigón que no ha sido sometido a un curado acelerado, y al cual no se le ha realizado un proceso de debilitamiento de la estructura inducido por ciclos de humedecimiento secado (figura III-30).

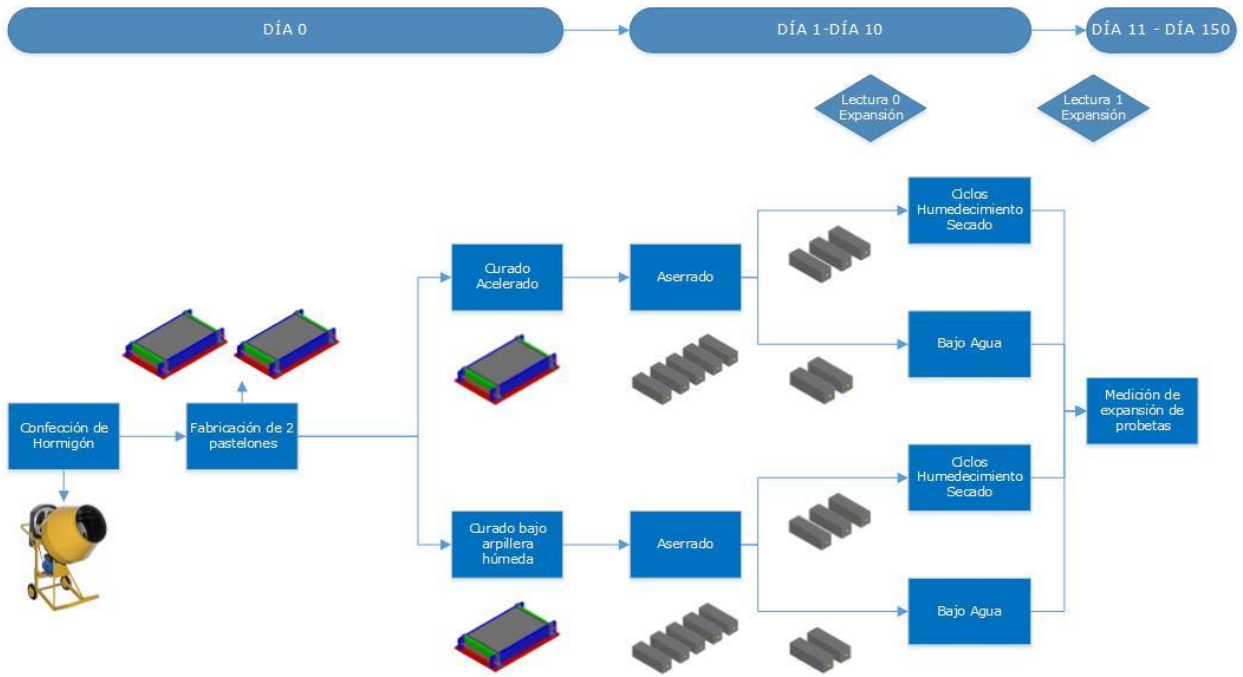


Figura III-26. Esquema del método de ensayo.

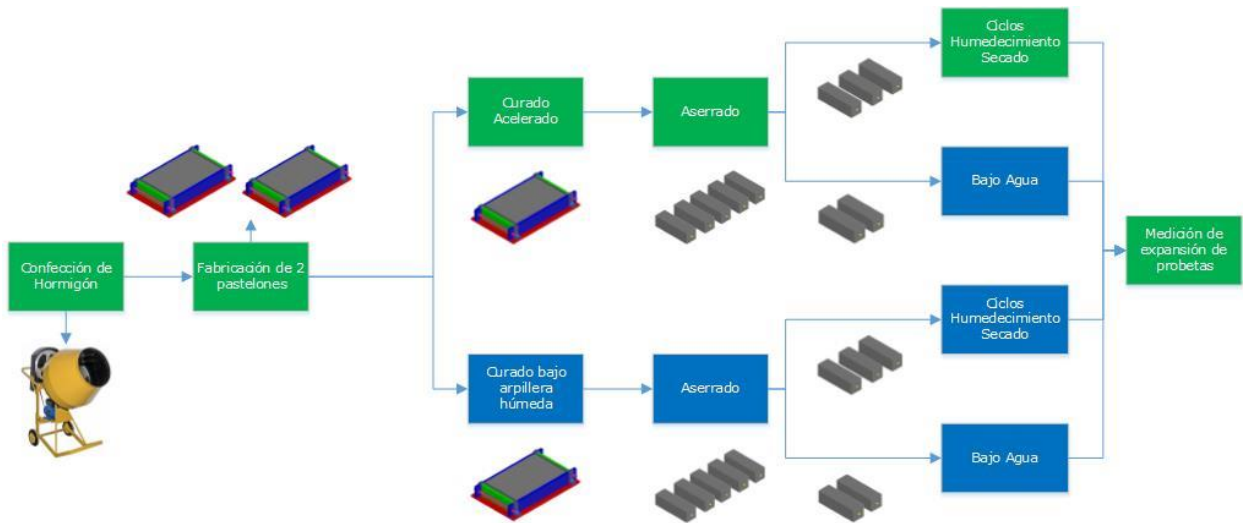


Figura III-27. Tratamiento 1.A: Curado Acelerado / Ciclos Humedecimiento Secado.

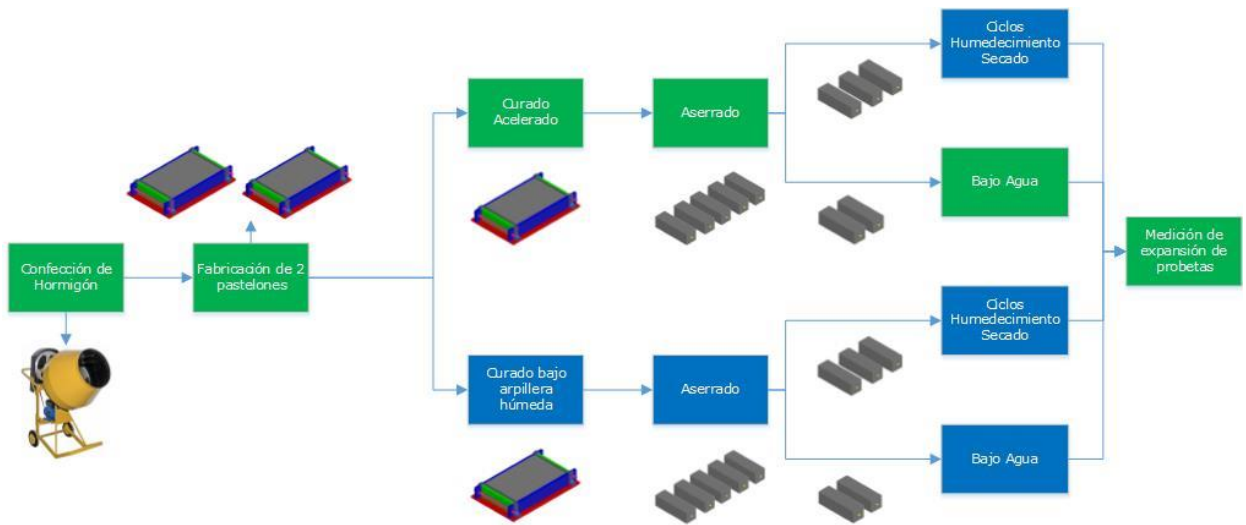


Figura III-28. Tratamiento 1.B: Curado Acelerado.

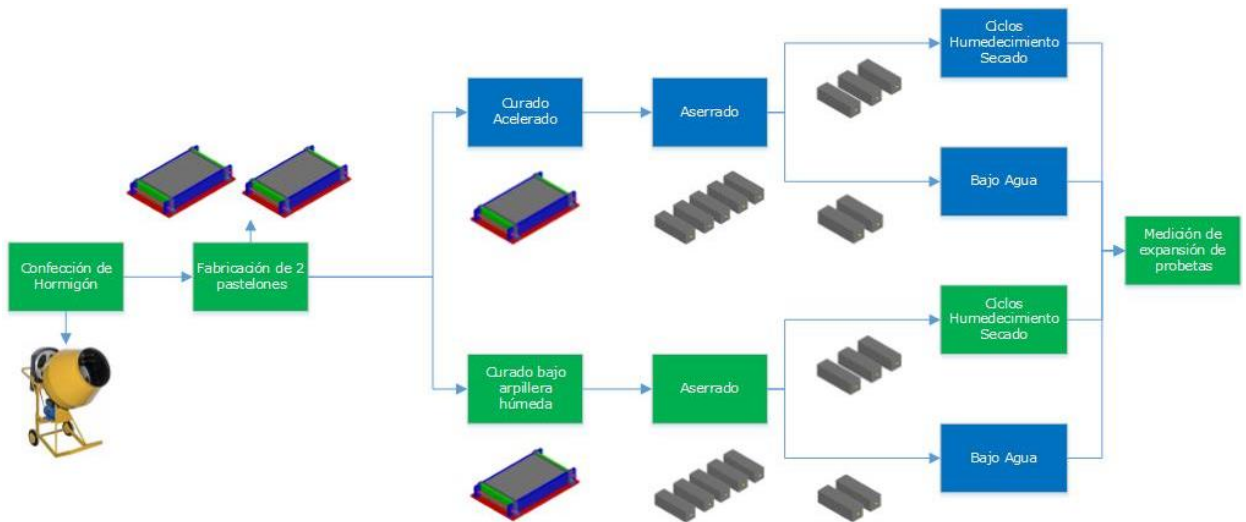


Figura III-29. Tratamiento 2.A: Curado Húmedo / Ciclos Humedecimiento Secado.

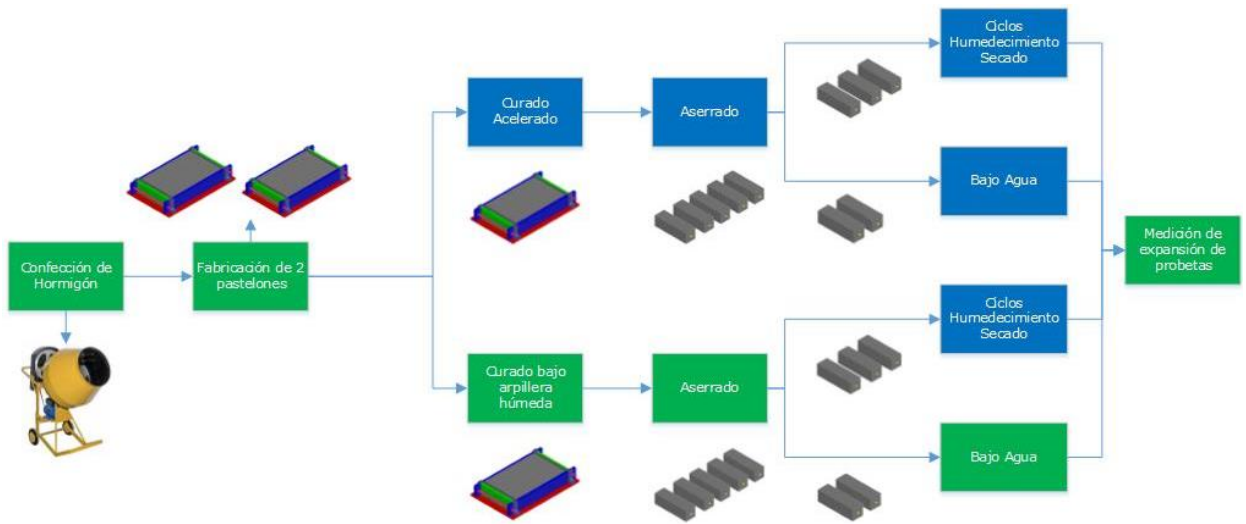


Figura III-30. Tratamiento 2.B: Curado Húmedo.

III.3 RESULTADOS

III.3.1 Propiedades de los hormigones confeccionados

III.3.1.1 Propiedades en estado fresco

En las siguientes tablas se muestran las propiedades en estado fresco, como la densidad del hormigón fresco, asentamiento de cono, y el rendimiento de la amasada para los 6 hormigones de prueba confeccionados.

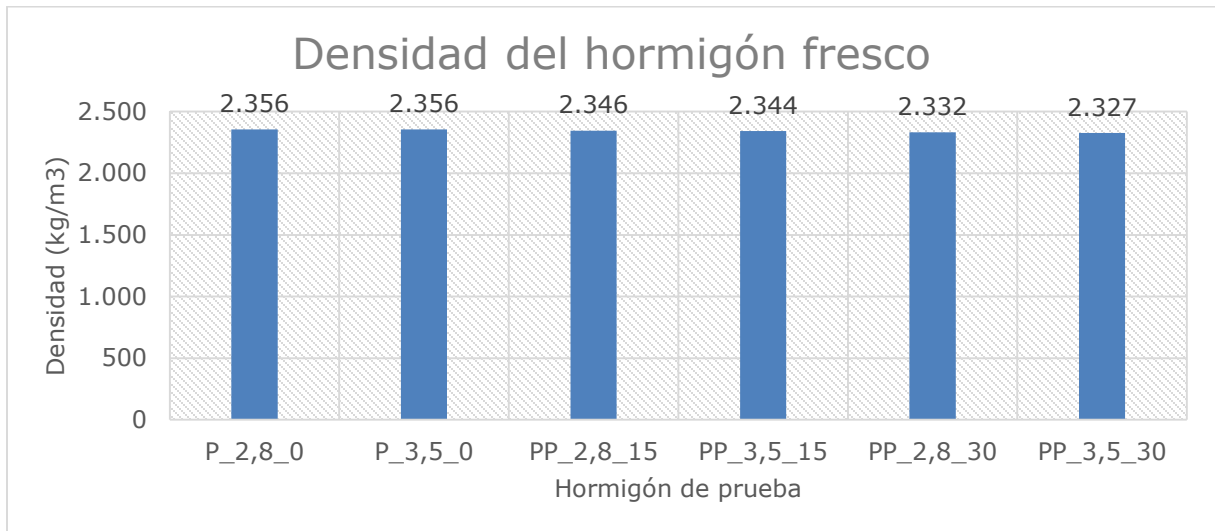


Figura III-31. Densidad fresca de los hormigones confeccionados.

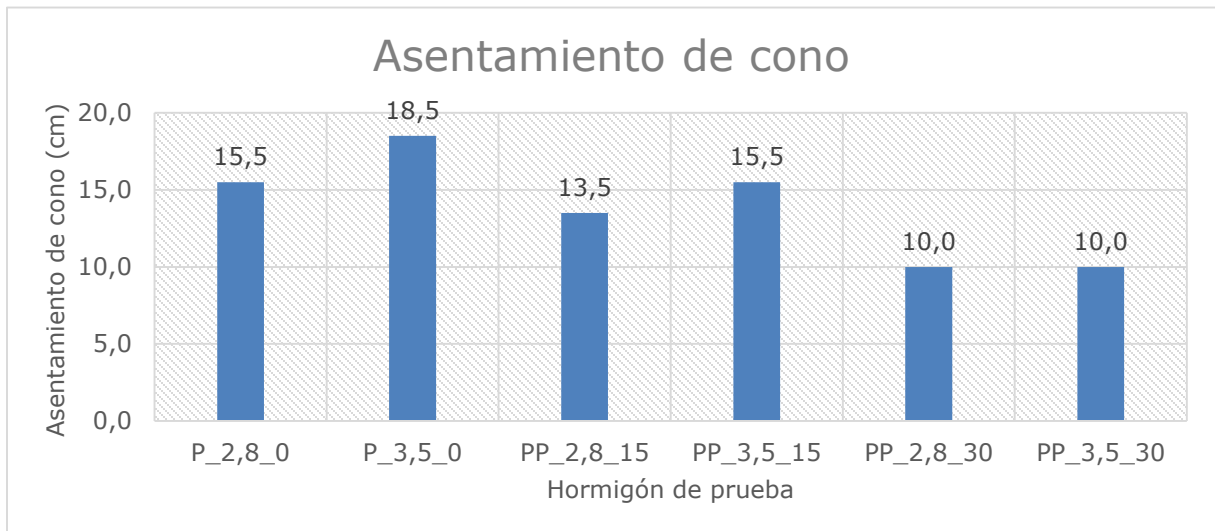


Figura III-32. Asentamiento de cono de los hormigones confeccionados.

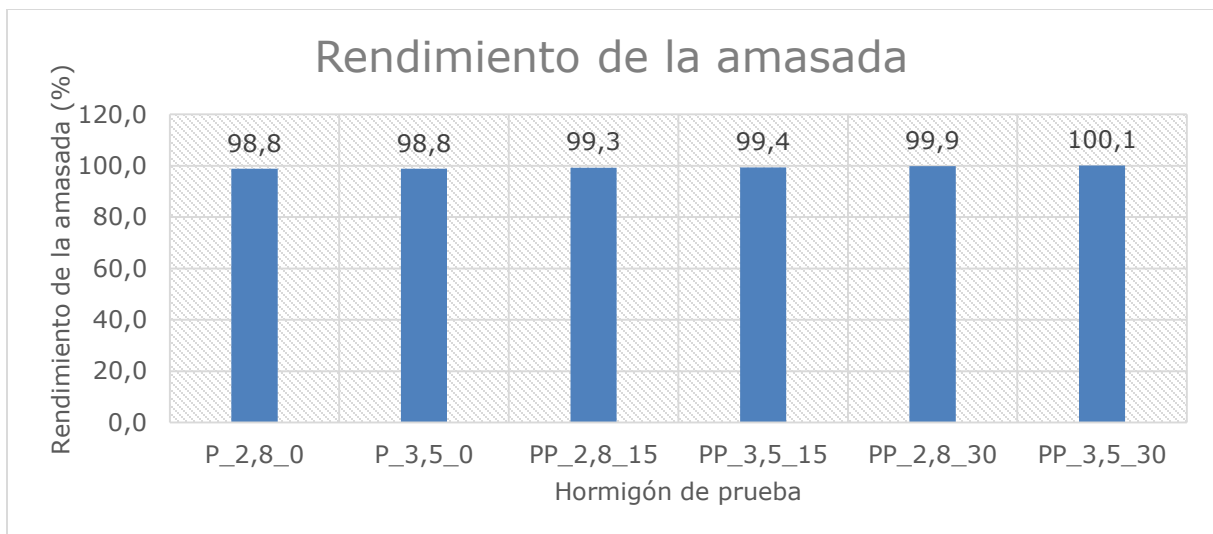


Figura III-33. Rendimiento de la amasada para los hormigones confeccionados.

III.3.1.2 Propiedades en estado endurecido

A continuación se muestra los resultados de ensayo de resistencia a compresión en probetas cúbicas de 20 cm de arista para los 6 hormigones de prueba confeccionados. Las edades de ensayo fueron 7, 28 y 56 días desde su confección.

Tabla III-14. Resistencia a compresión de hormigones en estudio a diferentes edades.

Resistencia cúbica a compresión	R7 (MPa)	R28 (MPa)	R56 (MPa)
P_2,8_0	41,2	53,0	54,9
P_3,5_0	41,2	52,6	56,1
PP_2,8_15	34,2	44,3	48,0
PP_3,5_15	33,9	44,4	49,5
PP_2,8_30	22,7	35,3	39,4
PP_3,5_30	25,6	34,3	40,2

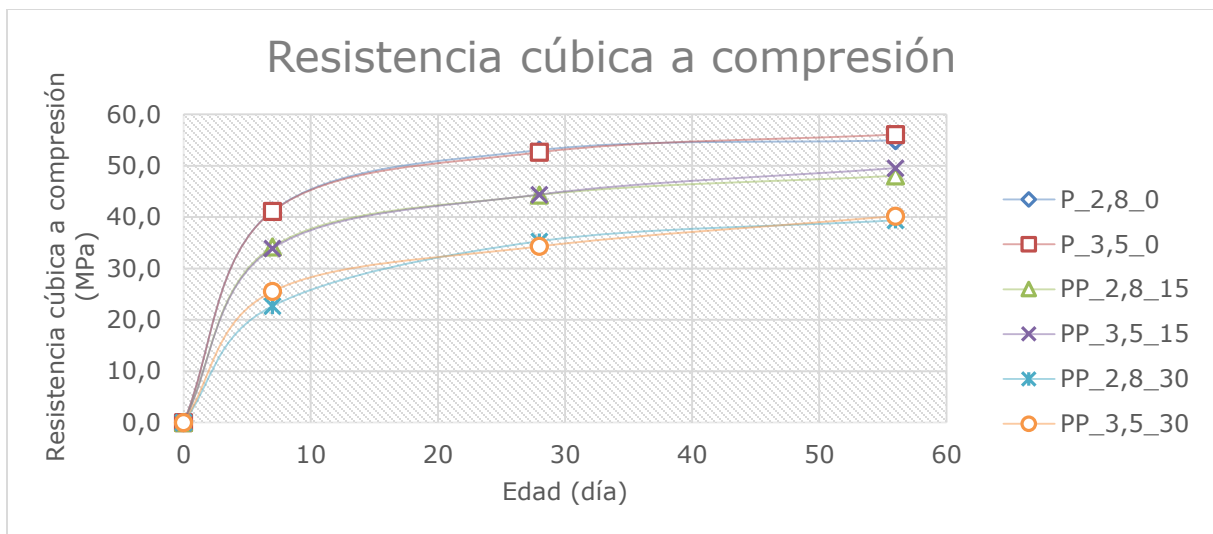


Figura III-34. Evolución resistencia a compresión para los hormigones en estudio.

III.3.2 Comportamiento de los hormigones en estudio en el ensayo Duggan modificado

Como se menciona anteriormente, con cada uno de los 6 materiales cementicios en estudio se confecciona un hormigón de prueba, con el cual se elaboran series de probetas que son sometidas a diferentes tratamientos, que permiten calificar la vulnerabilidad de los distintos cementos en estudio a la activación del fenómeno DEF. Las expansiones promedio correspondientes a cada uno de los tratamientos según el hormigón de prueba se muestran en las tablas III-15 a III-20 y figuras III-35 a III-40.

Tabla III-15. Expansión probetas hormigón P_2,8_0.

Tiempo (día)	Expansión Hormigón P_2,8_0 (%)			
	Tratamiento 1.A.	Tratamiento 1.B.	Tratamiento 2.A.	Tratamiento 2.B.
4	0,000	0,000	0,000	0,000
11	-0,017	0,006	-0,019	0,006
18	-0,001	0,005	-0,009	0,006
21	0,005	0,005	-0,008	0,006
26	0,009	0,004	-0,005	0,005
29	0,011	0,004	-0,004	0,006
33	0,015	0,004	-0,002	0,005
40	0,016	0,003	0,001	0,005
53	0,021	0,006	0,006	0,006
64	0,026	0,005	0,010	0,006
75	0,030	0,004	0,011	0,004
85	0,037	0,003	0,012	0,002
117	0,059	0,006	0,011	0,005

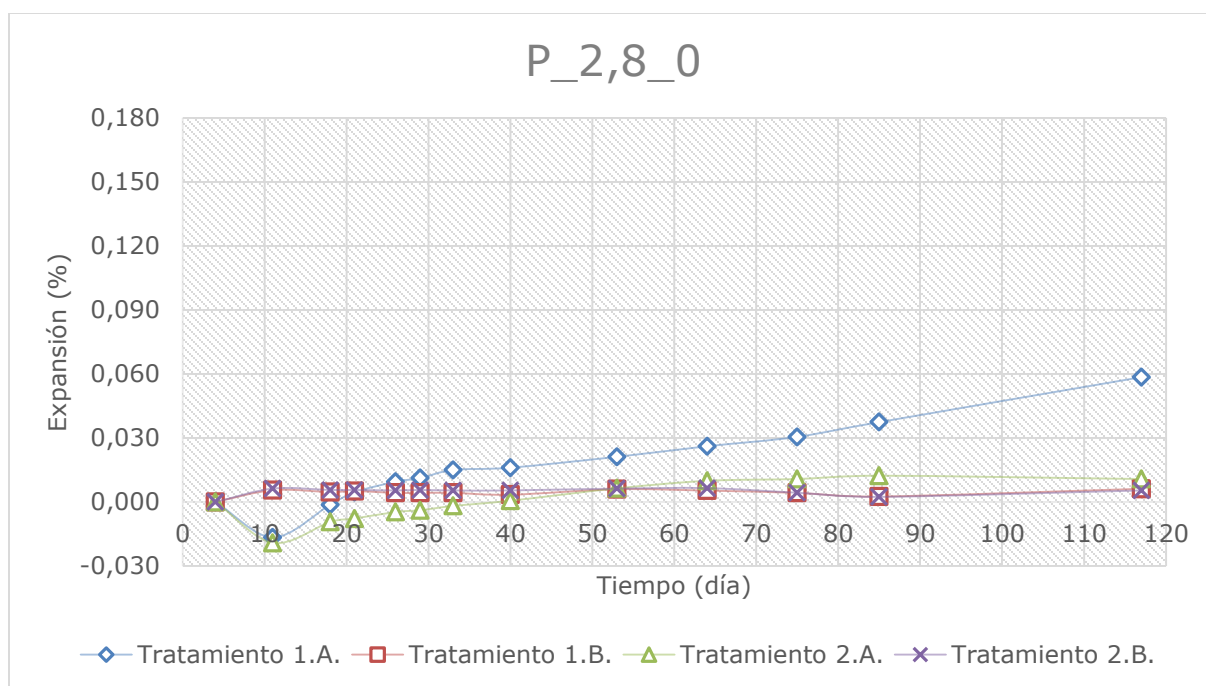


Figura III-35. Expansiones promedio probetas P_2,8_0.

Tabla III-16. Expansión probetas hormigón P_3,5_0.

Tiempo (día)	Expansión Hormigón P_3,5_0 (%)			
	Tratamiento 1.A.	Tratamiento 1.B.	Tratamiento 2.A.	Tratamiento 2.B.
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

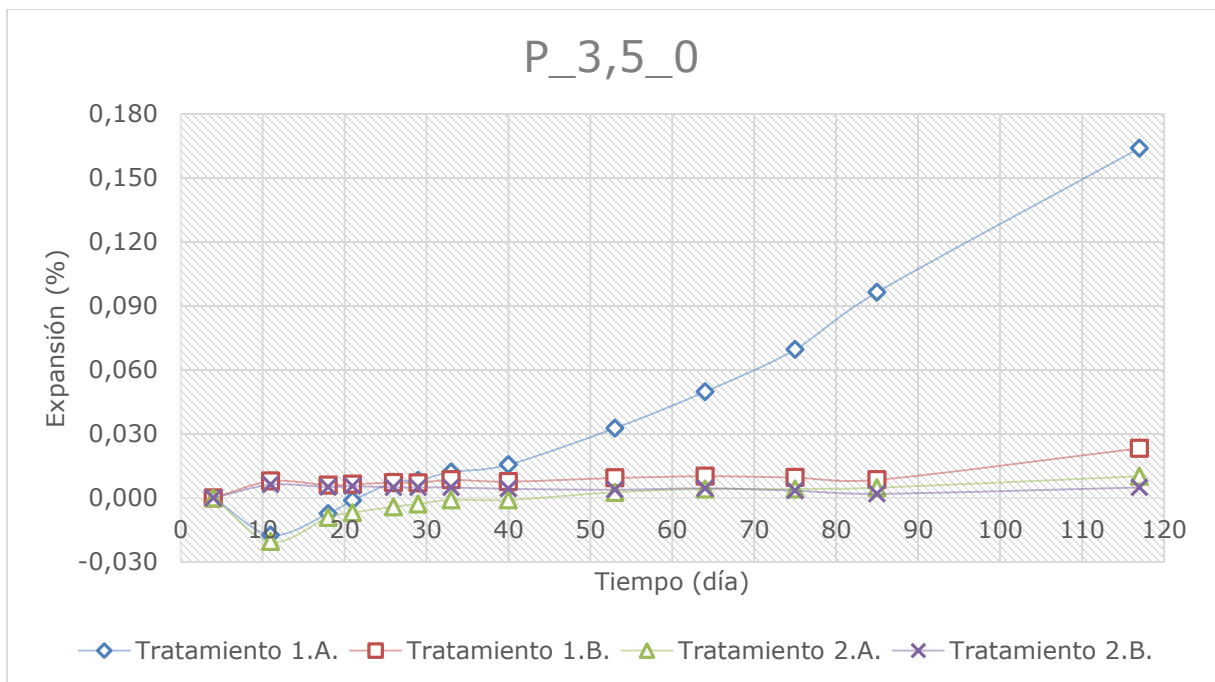


Figura III-36. Expansiones promedio probetas P_3,5_0.

Tabla III-17. Expansión probetas hormigón PP_2,8_15.

Tiempo (día)	Expansión Hormigón PP_2,8_15 (%)			
	Tratamiento 1.A.	Tratamiento 1.B.	Tratamiento 2.A.	Tratamiento 2.B.
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

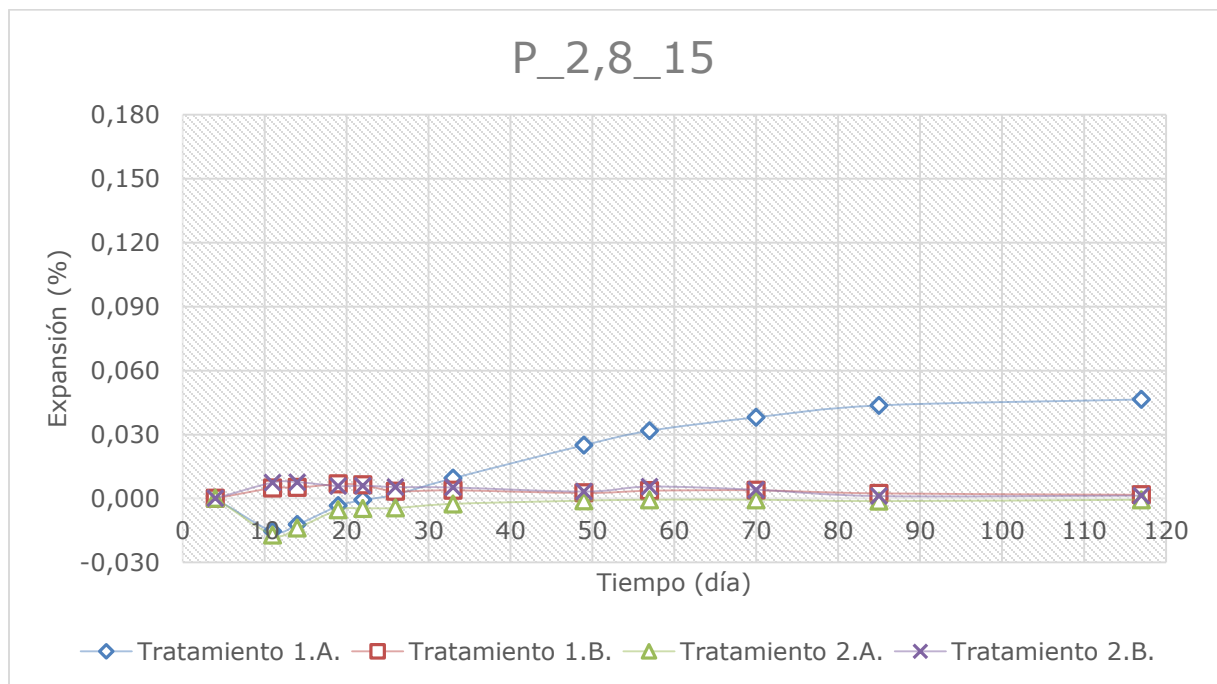


Figura III-37. Expansiones promedio probetas P_2,8_15.

Tabla III-18. Expansión probetas hormigón PP_3,5_15.

Tiempo (día)	Expansión Hormigón PP_3,5_15 (%)			
	Tratamiento 1.A.	Tratamiento 1.B.	Tratamiento 2.A.	Tratamiento 2.B.
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

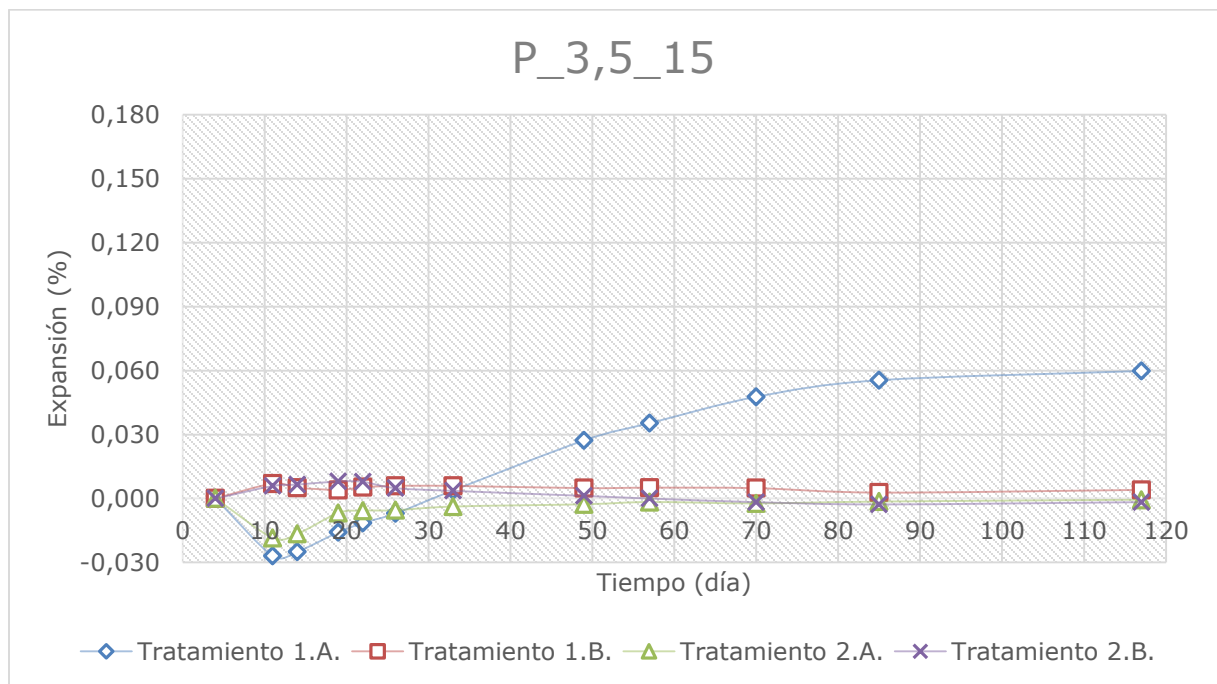


Figura III-38. Expansiones promedio probetas P_3,5_15.

Tabla III-19. Expansión probetas hormigón PP_2,8_30.

Tiempo (día)	Expansión Hormigón PP_2,8_30 (%)			
	Tratamiento 1.A.	Tratamiento 1.B.	Tratamiento 2.A.	Tratamiento 2.B.
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

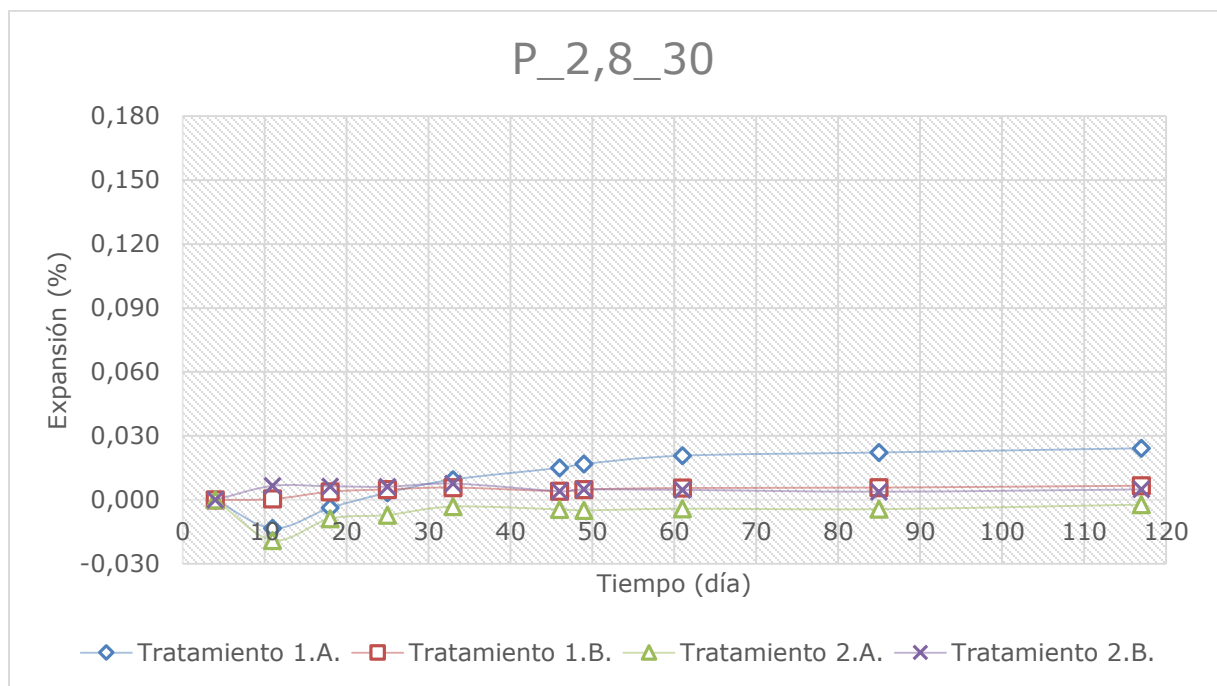


Figura III-39. Expansiones promedio probetas P_2,8_30.

Tabla III-20. Expansión probetas hormigón PP_3,5_30.

Tiempo (día)	Expansión Hormigón PP_3,5_30 (%)			
	Tratamiento 1.A.	Tratamiento 1.B.	Tratamiento 2.A.	Tratamiento 2.B.
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

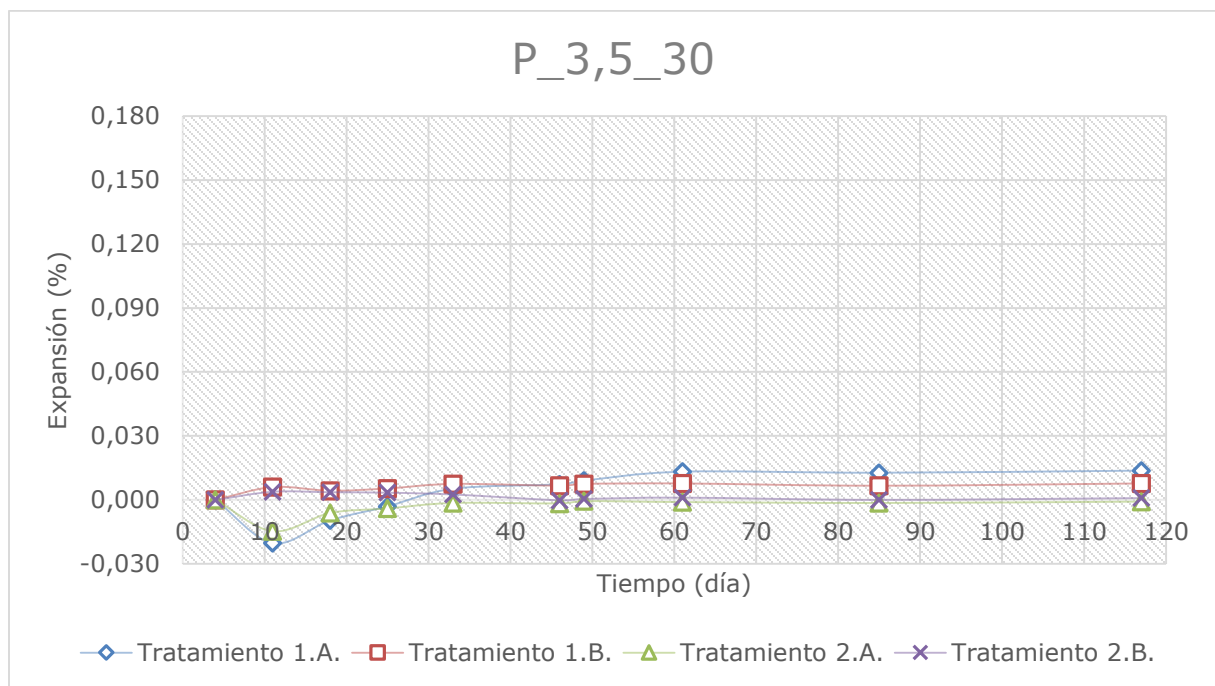


Figura III-40. Expansiones promedio probetas P_3,5_30.

CAPÍTULO IV : ANÁLISIS DE RESULTADOS

IV.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS

IV.1.1 Propiedades físicas

A partir de los pesos específicos del cemento portland puro, el yeso corrector y de la puzolana natural, además de las proporciones en que éstos son utilizados, es posible determinar el peso específico para los 6 materiales cementicios en estudio (Tabla IV-1). Al aumentar la dosis de reemplazo de puzolana por cemento portland, disminuye el peso específico del material ya que la puzolana tiene un peso específico menor que el peso específico del cemento. De la misma forma, dado un nivel de reemplazo de puzolana, al aumentar el contenido de SO_3 a través de la adición de yeso, se disminuye el peso específico, ya que el yeso reemplaza parte del cemento portland puro. La variación del peso específico del material cementicio al variar la cantidad de SO_3 es pequeña, ya que las cantidades adicionales de yeso incorporadas también lo son.

La superficie específica en gran medida determina la velocidad con que se desarrollan las reacciones de hidratación del cemento, y por lo tanto, la ganancia de resistencia temprana. Con respecto al fenómeno DEF, la importancia de la finura radica en que influye directamente en la generación de calor por la hidratación, que en el caso de hormigones masivos, al no poderse liberar rápidamente, aumenta las temperaturas dentro del hormigón con los problemas que esto trae consigo. De acuerdo al planteamiento experimental de este trabajo, donde se utilizan pastelones de hormigón de espesores de 10 cm, que por su geometría permiten liberar el calor de reacción tan rápido como es generado, y considerando que la fuente de calor utilizada para elevar la temperatura de curado inicial dentro del hormigón es externa (horno), la finura del material cementicio no sería relevante.

Tabla IV-1. Peso Específico y Superficie Específica de los materiales cementicios en estudio.

Material Cementicio	Peso Específico (g/ml)	Superficie específica (cm ² /g)
P_2,8_0	3,12	4.100
P_3,5_0	3,11	4.169
PP_2,8_15	3,01	4.194
PP_3,5_15	3,00	4.263
PP_2,8_30	2,89	4.288
PP_3,5_30	2,88	4.356

El valor de esta propiedad para los materiales cementicios empleados, se determina usando las superficies específicas de los materiales individuales que intervienen en cada tipo de cemento, y las proporciones en que son utilizados. Las superficies específicas son similares, encontrándose en el rango de los 4100 cm²/g hasta los 4356 cm²/g (Tabla IV-1).

IV.1.2 Composición química de los cementos en estudio

A continuación se muestran los óxidos principales de los materiales cementicios en estudio, que se calculan a partir de la composición química de los materiales constituyentes y las proporciones en que son empleados (tabla IV-2 y figura IV-1). Como no se conoce la composición mineralógica del cemento Portland puro utilizado, se estima las cantidades de C₃S, C₂S, C₃A y C₄AF a través de las ecuaciones de Bogue (tabla IV-3 y figura IV-2). En el cálculo de los compuestos mineralógicos de los materiales cementicios adicionados con puzolana, notar que sólo se consideran los óxidos pertenecientes a la fracción de cemento Portland que posee ese material

Tabla IV-2. Óxidos principales de los materiales cementicios.

Material Cementicio	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)
P_2,8_0	21,00	5,11	63,60	2,86	2,80
P_3,5_0	20,66	5,03	63,10	2,81	3,50
PP_2,8_15	28,08	6,26	54,17	2,66	2,80
PP_3,5_15	27,75	6,18	53,68	2,61	3,50
PP_2,8_30	35,17	7,41	44,75	2,45	2,80
PP_3,5_30	34,83	7,33	44,25	2,41	3,50

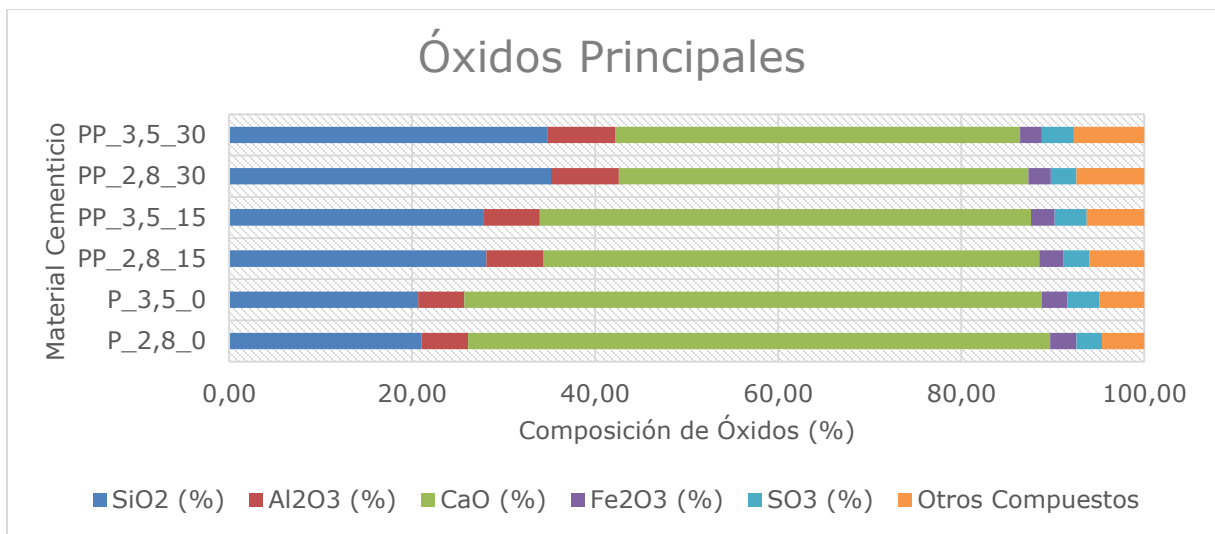


Figura IV-1. Óxidos principales de los materiales cementicios.

Tabla IV-3. Composición mineralógica de los materiales cementicios.

Material Cementicio	C3S (%)	C2S (%)	C3A (%)	C4AF (%)
P_2,8_0	52,84	20,64	8,71	8,69
P_3,5_0	52,00	20,31	8,57	8,56
PP_2,8_15	44,41	17,34	7,32	7,31
PP_3,5_15	43,56	17,01	7,18	7,17
PP_2,8_30	35,97	14,05	5,93	5,92
PP_3,5_30	35,13	13,72	5,79	5,78

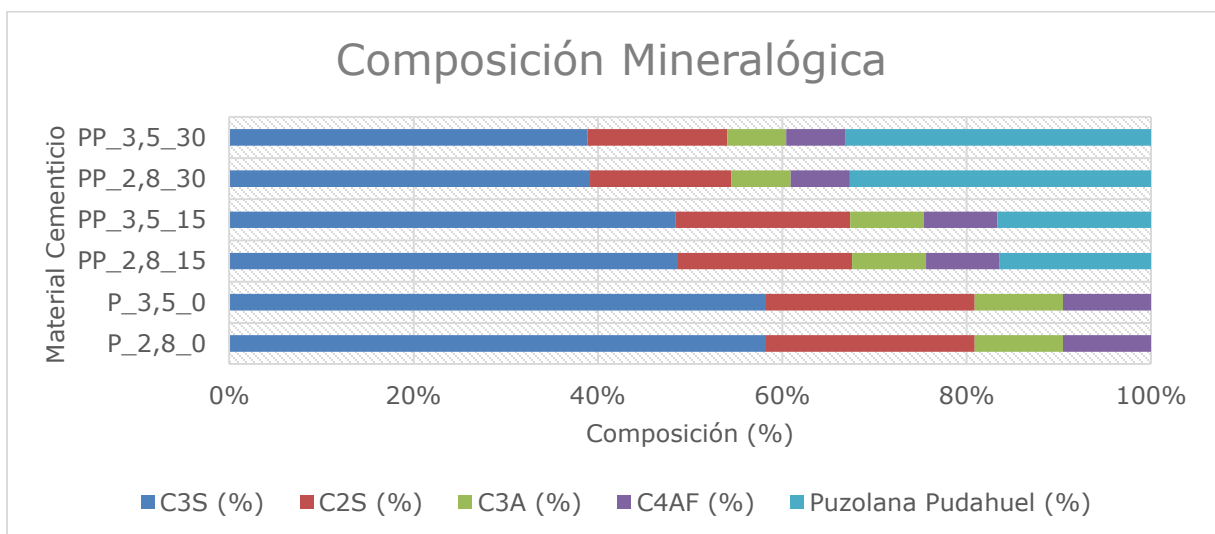


Figura IV-2. Composición mineralógica de los materiales cementicios.

IV.2 PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES

IV.2.1 Propiedades en estado fresco

Con respecto a la densidad del hormigón en estado fresco (figura IV-3), se puede apreciar que al aumentar el porcentaje de reemplazo de puzolana por cemento en el material cementicio, se disminuye la densidad ya que la puzolana tiene una densidad de 2.400 kg/m^3 que es menor que la densidad del cemento de 3.120 kg/m^3 , por lo que al reemplazar cierta cantidad de cemento por puzolana, se está colocando la misma masa de material, pero con un volumen mayor, entonces la disminución de la densidad se debe al aumento de volumen que tiene el material cementicio al tener cierto nivel de adición de material cementicio suplementario. Es por esta misma razón, que al aumentar el porcentaje de SO_3 , que se logra con la incorporación de una cantidad de yeso, se disminuye la densidad del hormigón en estado fresco al mismo nivel de reemplazo de puzolana, ya que el yeso tiene una densidad de 2.570 kg/m^3 , que es menor que la densidad del cemento.

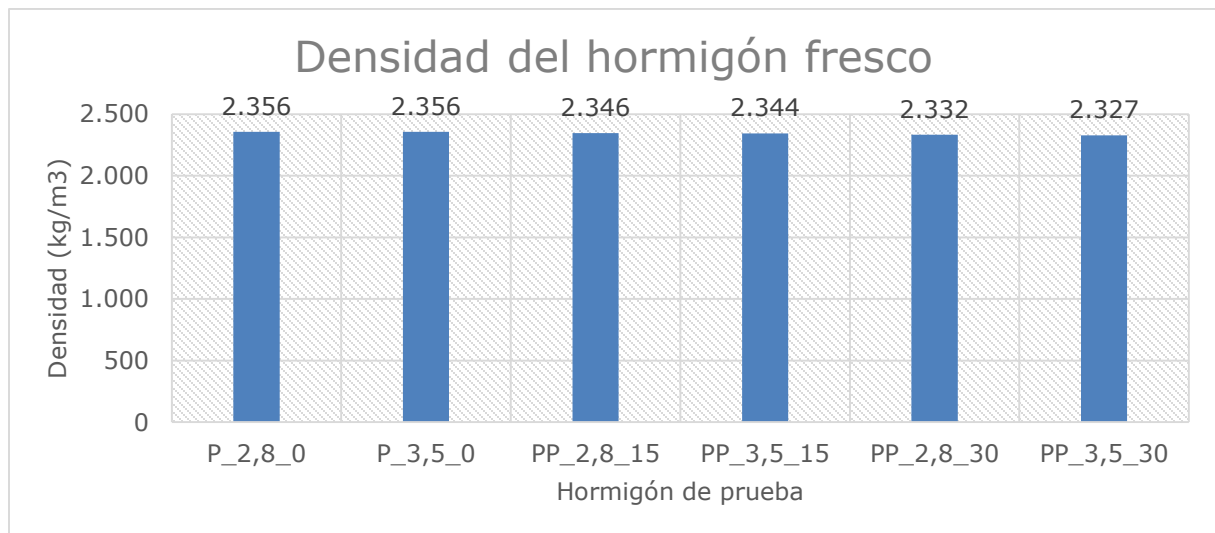


Figura IV-3. Densidad en estado fresco de los hormigones confeccionados.

En cuanto al asentamiento de cono (figura IV-4), se puede apreciar que al aumentar el nivel de reemplazo de puzolana se disminuye el asentamiento de cono, ya que la puzolana es más fina que el cemento que reemplaza (finura de la puzolana: $4.450 \text{ cm}^2/\text{g}$, finura del cemento: $4.100 \text{ cm}^2/\text{g}$), entonces se aumenta la cantidad de granos finos de la mezcla disminuyendo la fluidez y aumentando la consistencia.

Dado un nivel de reemplazo de puzolana, es posible notar que al incorporar más yeso se aumenta el asentamiento de cono, ya que el yeso retarda

inicialmente las reacciones de hidratación del cemento, haciéndolo menos consistente y más fluido. Además, se aprecia que este efecto es menor, a mayor nivel de reemplazo de puzolana por cemento portland, ya que el efecto de la incorporación de puzolana prevalece sobre el efecto de aumentar la cantidad de yeso.

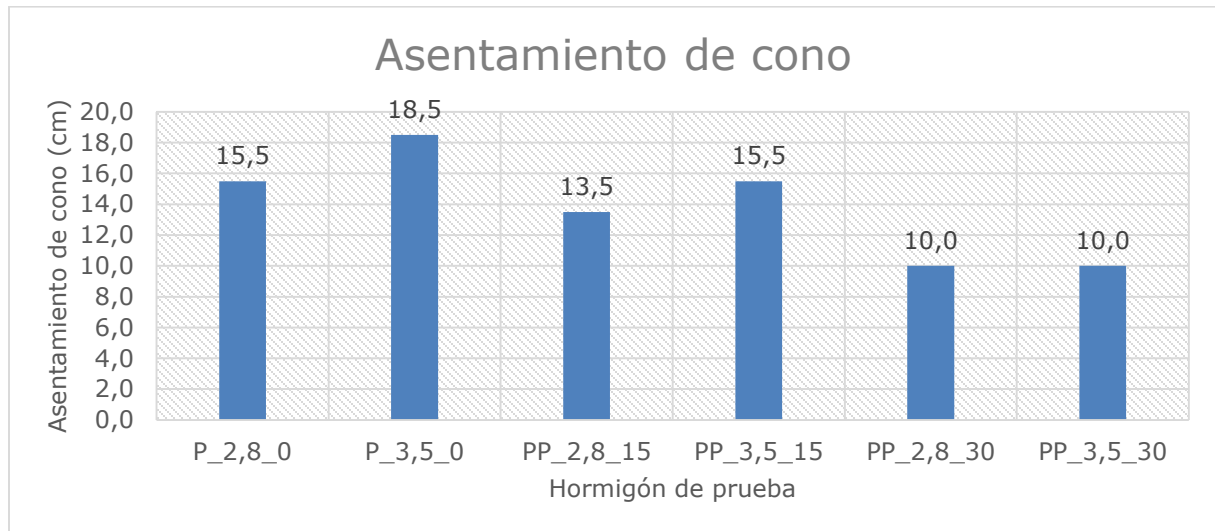


Figura IV-4. Asentamiento de cono de los hormigones confeccionados.

El rendimiento de la amasada (figura IV-5) está directamente relacionado con la densidad del hormigón en estado fresco, ya que esta propiedad relaciona el volumen real con el volumen teórico de hormigón producido de una colada. El volumen real se obtiene del cociente entre la masa de los materiales incorporados a la betonera y de la densidad real de la mezcla. Como se menciona anteriormente, la densidad en estado fresco disminuye al aumentar el nivel de reemplazo de puzolana por cemento, entonces se aumenta el volumen real de hormigón producido y el rendimiento.

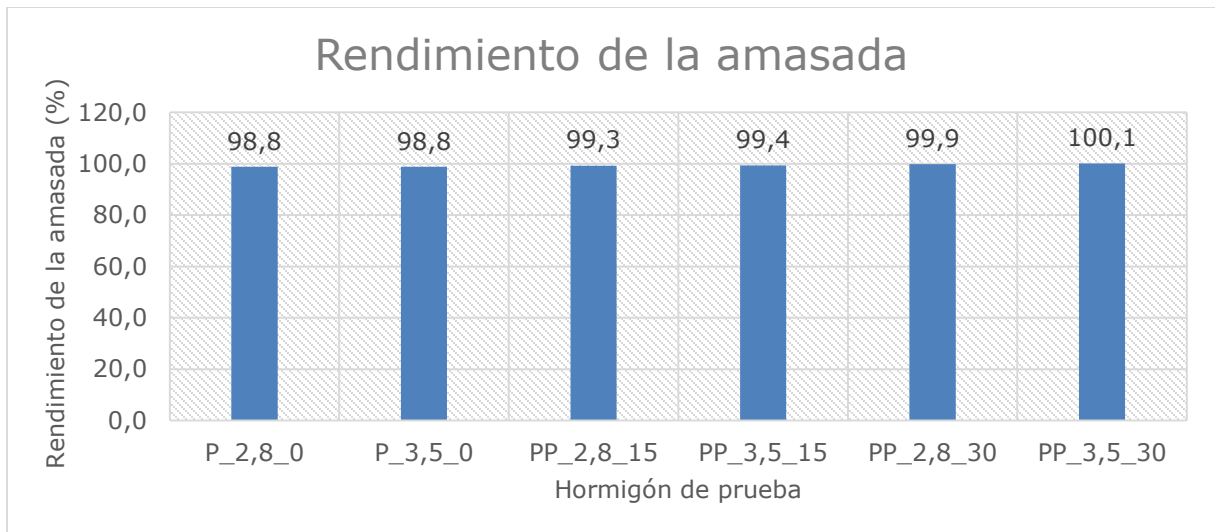


Figura IV-5. Rendimiento de la amasada para los hormigones confeccionados.

IV.2.2 Propiedades en estado endurecido

Al aumentar el reemplazo de cemento Portland por puzolana, se disminuye la resistencia a compresión del hormigón a los 7, 28 y 56 días (figura IV-6). Es conocido el efecto beneficioso de la incorporación de la puzolana en cuanto a la mejora de la resistencia y aumento de la durabilidad del hormigón a edades mayores a los 28 días, pero debido a la naturaleza de las reacciones puzolánicas que toman más tiempo en su desarrollo, durante el periodo de evaluación (hasta los 56 días) no es posible apreciar la mejora en su comportamiento de resistencia mecánica.

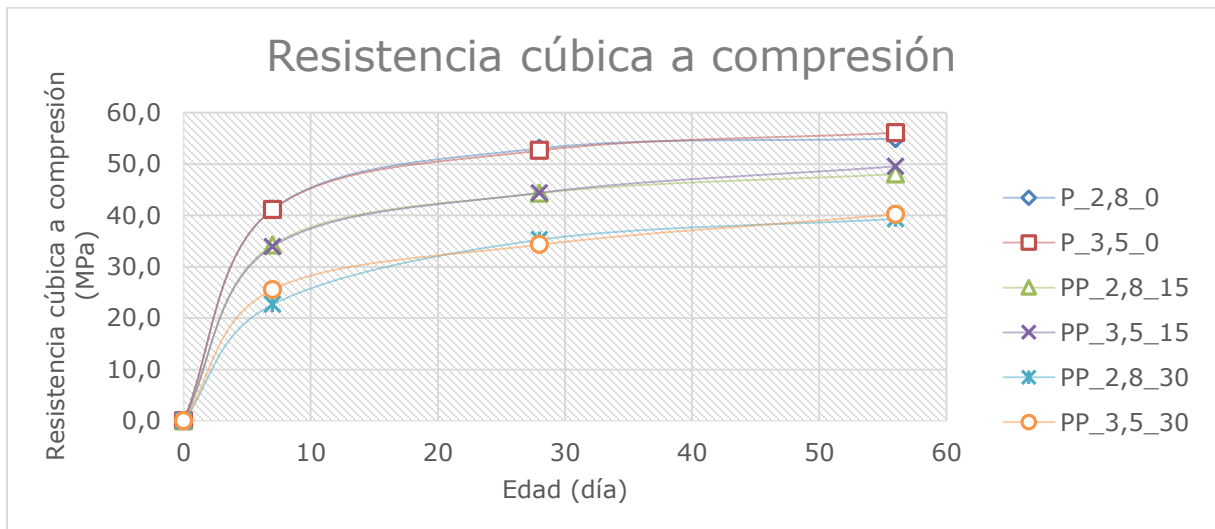


Figura IV-6. Evolución resistencia cúbica a compresión para los hormigones en estudio.

IV.3 COMPORTAMIENTO DE LOS DISTINTOS HORMIGONES ESTUDIADOS EN EL ENSAYO DE EXPANSIÓN

IV.3.1 Hormigón P_2,8_0

El material cementicio empleado en este hormigón de prueba, corresponde a un cemento portland puro con un 2,8% de SO_3 . Las expansiones registradas para los 4 tratamientos que se consideran dentro del planteamiento experimental, se grafican en la figura IV-7.

Los ciclos humedecimiento secado que incluyen los tratamientos 1.A y 2.A producen una retracción en las probetas de 0,0167% y 0,0192% respectivamente, que se pueden apreciar en el día 11 posterior a la confección. Esta retracción se debe a la pérdida de agua por parte de la probeta durante el tiempo que se encuentra en horno a 83°C. Posterior a los ciclos, las probetas son almacenadas bajo agua, comenzándose a expandir producto de la recuperación de agua. En el día 18 se desacoplan las curvas 1.A y 2.A, y es en este momento en que las expansiones de las probetas pertenecientes al tratamiento 1.A son atribuibles al curado acelerado que diferencian al tratamiento 1.A del 2.A. Las probetas del tratamiento 2.A continúan expandiéndose pero a una tasa significativamente menor hasta alcanzar una expansión cercana al 0,0100%. Las probetas del tratamiento 1.A aumentan su velocidad de expansión con el pasar de los días, hasta llegar a una expansión de 0,06% durante el periodo de evaluación de 4 meses.

Las probetas sometidas al tratamiento 1.B y 2.B presentan un comportamiento expansivo similar durante todo el periodo de observación, no apreciándose el efecto del curado acelerado que tienen las probetas pertenecientes al tratamiento 1.B. Las expansiones de los tratamientos 1.B y 2.B no superan 0,01% a 117 días.

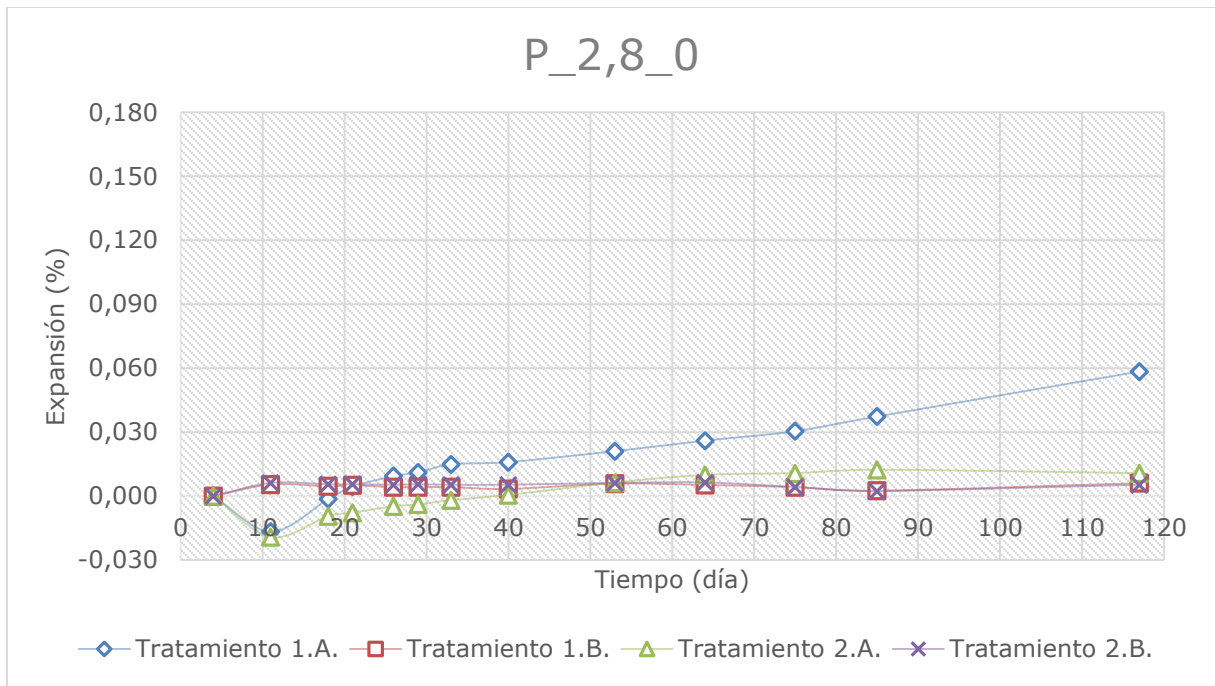


Figura IV-7. Expansiones promedio probetas hormigón P_2,8_0

IV.3.2 Hormigón P_3,5_0

El material cementicio empleado en este hormigón de prueba, corresponde a un cemento portland puro con un 3,5% de SO_3 . Las expansiones registradas para los 4 tratamientos se grafican en la figura IV-8.

Los ciclos humedecimiento-secado del tratamiento 1.A y 2.A dejan a las probetas con una retracción de 0,0175% y 0,0205% respectivamente, que se puede apreciar en el día 11 posterior a la confección. Desde el día 11 hasta el día 18 las probetas se expanden principalmente por la absorción de agua. En el día 18 se desacoplan las curvas, y se comienza a apreciar el efecto del curado acelerado en las probetas pertenecientes al tratamiento 1.A llegando a una expansión de 0,16% a los 117 días. Las probetas que fueron sometidas al tratamiento 2.A siguen expandiéndose a una menor tasa hasta llegar a una expansión de estabilización de 0,01%.

Las probetas sometidas al tratamiento 1.B y 2.B se comportan de forma similar hasta los 85 días. La curva de expansión del tratamiento 1.B aumenta su pendiente a partir del día 85.

Las probetas del tratamiento 2.A y 2.B a partir del día 53 presentan expansiones similares cercanas al 0,01%.

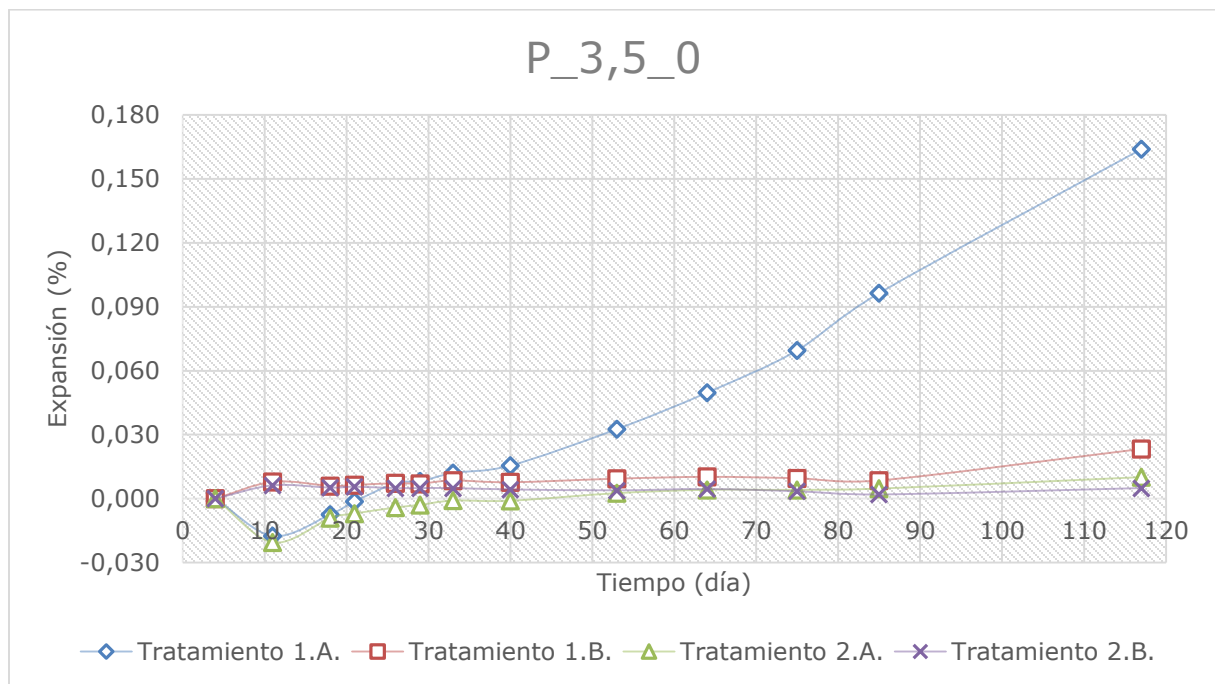


Figura IV-8. Expansiones promedio probetas puzolana: 0% SO_3 : 3,5%.

IV.3.3 Hormigón PP_2,8_15

El material cementicio empleado en este hormigón de prueba, corresponde a un cemento portland puzolánico con 15% de adición, que posee un 2,8% de SO_3 . Las expansiones registradas para los 4 tratamientos se grafican en la figura IV-9.

Las probetas pertenecientes al tratamiento 1.A y 2.A presentan una retracción en el día 11 producto de los ciclos humedecimiento secado. Desde el día 11 hasta el día 19 se expanden por el agua que absorben durante su almacenamiento bajo agua. A partir del día 19 las curvas 1.A y 2.A se desacoplan, la curva 2.A continua expandiéndose a una menor tasa hasta llegar a su longitud inicial, en cambio las probetas del tratamiento 1.a se expande a una tasa constante hasta los 49 días. Desde los 49 días en adelante comienza a disminuir la pendiente de la curva hasta llegar a una expansión de 0,05%.

Las probetas del tratamiento 1.B y 2.B tienen un comportamiento expansivo similar durante todo el periodo de evaluación, por lo que no es posible apreciar el efecto del curado acelerado en estas probetas. A partir del día 70 las expansiones para el tratamiento 1.B, 2.A y 2.B son similares.

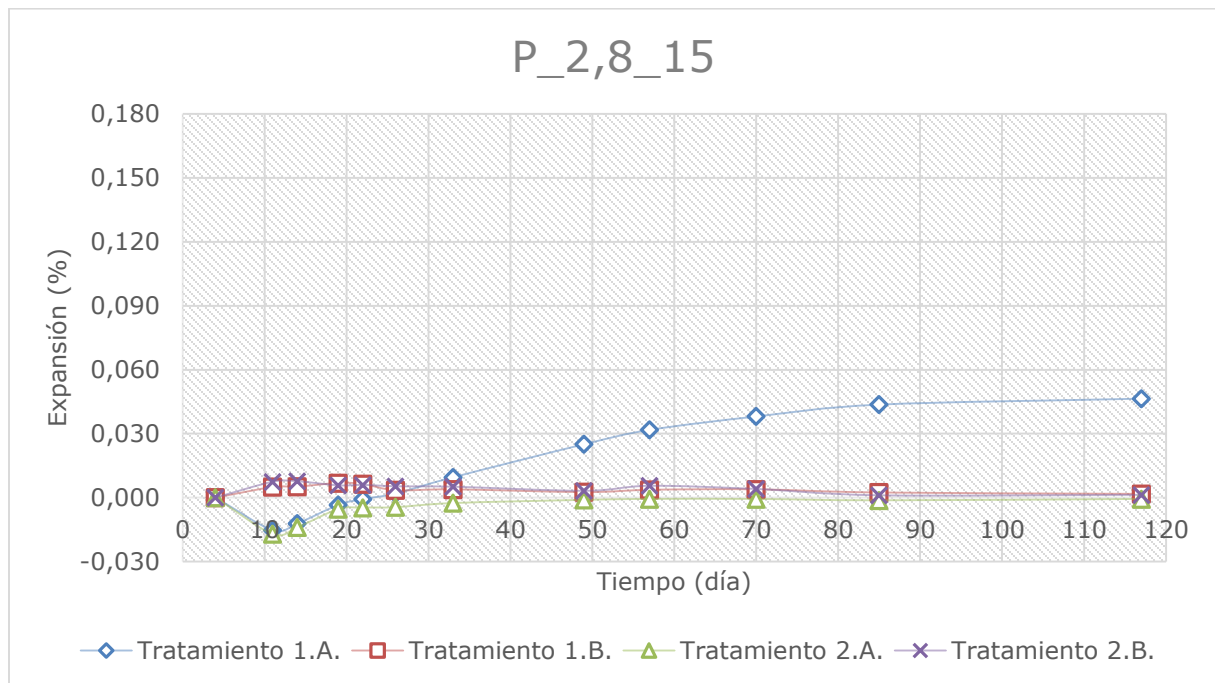


Figura IV-9. Expansiones promedio probetas puzolana: 15% SO_3 : 2,8%.

IV.3.4 Hormigón PP_3,5_15

El material cementicio empleado en este hormigón de prueba, corresponde a un cemento portland puzolánico con 15% de adición, que posee un 3,5% de SO_3 . Las expansiones registradas para los 4 tratamientos se grafican en la figura IV-10.

Las probetas que fueron sometidas al tratamiento 1.A y 2.A, que incluyen ciclos de humedecimiento secado, quedaron con una retracción al final de los ciclos por la pérdida de agua. Las retracciones de las probetas son de 0,0270% y 0,0185% respectivamente. Cuando estas probetas fueron colocadas bajo agua comienzan a expandirse principalmente por el agua que absorben. La absorción de agua controla las expansiones desde el día 11 hasta el día 19. Desde el día 19 en adelante las curvas se desacoplan, mostrando el efecto que tiene el curado acelerado en las probetas pertenecientes al tratamiento 1.a. Desde el día 19 hasta el día 57 mantiene una tasa de expansión constante, la que va disminuyendo desde el día 57 hasta el día 117 hasta llegar a una expansión de 0,598%. Desde el día 19 hasta el día 117 las probetas del tratamiento 2.A se continúan expandiendo a una tasa menor hasta una expansión de estabilización cercana al 0,00%.

Los tratamientos 1.B y 2.B no muestran diferencias significativas durante el periodo de estudio.

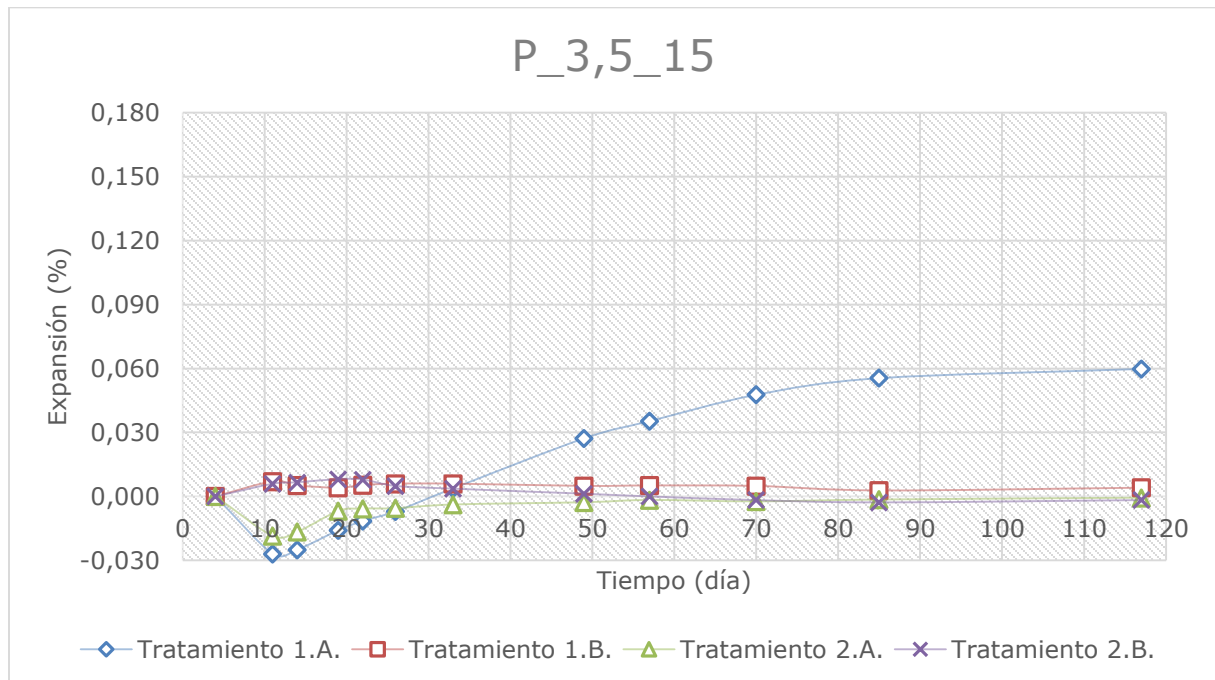


Figura IV-10. Expansiones promedio probetas puzolana: 15% SO_3 : 3,5%.

IV.3.5 Hormigón PP_2,8_30

El material cementicio empleado en este hormigón de prueba, corresponde a un cemento portland puzolánico con 30% de adición, que posee un 2,8% de SO_3 . Las expansiones registradas para los 4 tratamientos se grafican en la figura IV-11.

Las expansiones de las probetas que fueron sometidas al tratamiento 1.B y 2.B no muestran diferencias significativas durante el periodo de observación, llegando a expansiones cercanas al 0,0070%.

Las probetas sometidas al tratamiento 1.A y 2.A quedan con una retracción de 0,0133% y 0,0190% posterior a los ciclos de humedecimiento-secado. Luego, estas probetas se expanden de forma similar producto de la absorción de agua, hasta el día 18, en que estas 2 curvas se desacoplan. La curva del tratamiento 2.A se continúa expandiendo lentamente hasta llegar a una expansión de -0,0023%. La curva del tratamiento 1.A continúa expandiéndose a una tasa constante hasta el día 33. Desde el día 33 hasta el día 60 disminuye la tasa de expansión hasta llegar a una expansión de 0,0242%.

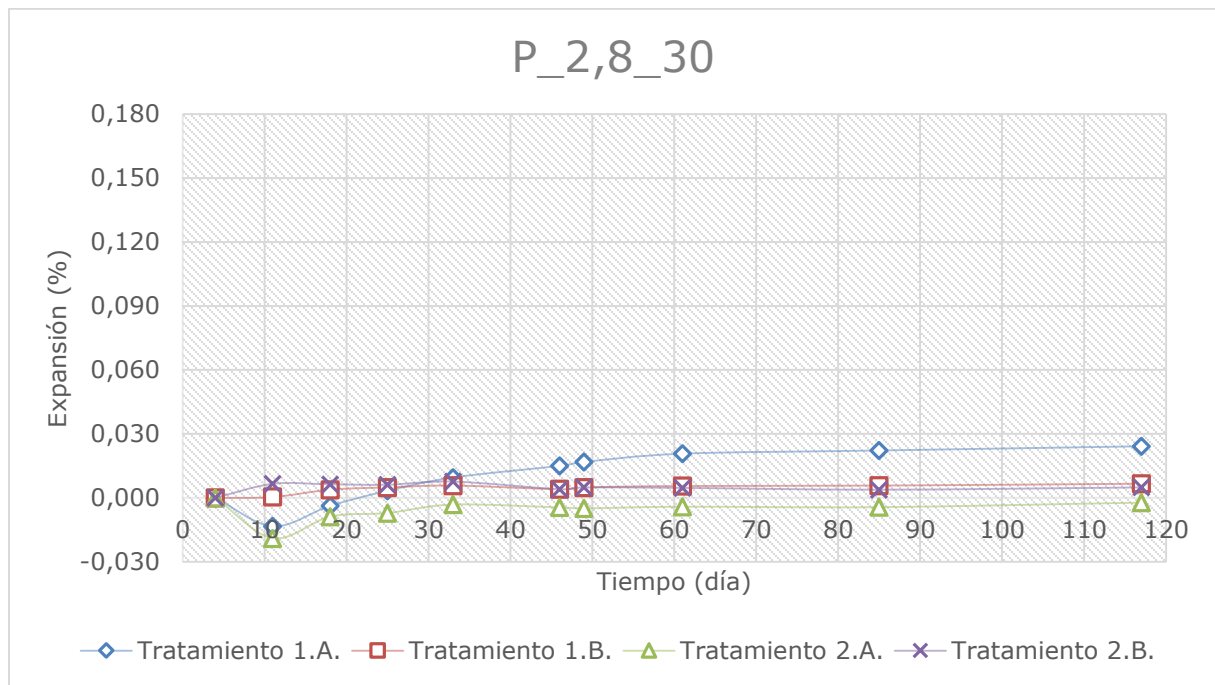


Figura IV-11. Expansiones promedio probetas puzolana: 30% SO_3 : 2,8%.

IV.3.6 Hormigón PP_3,5_30

El material cementicio empleado en este hormigón de prueba, corresponde a un cemento portland puzolánico con 30% de adición, que posee un 3,5% de SO_3 . Las expansiones registradas para los 4 tratamientos se grafican en la figura IV-12.

Las probetas sometidas a los tratamientos 1.A y 2.A quedan con una retracción al término de los ciclos (día 11 de la curva de expansión del tratamiento 1.A y 2.A). Luego la expansión de estas probetas es controlada por la absorción de agua hasta el día 25, luego las curvas de expansión se desacoplan. Las probetas del tratamiento 2.A se siguen expandiendo a una tasa inferior hasta alcanzar una expansión de 0,00%. Las probetas del tratamiento 1.A se continúan expandiendo a una tasa constante hasta el día 33. Desde el día 33 en adelante disminuye su tasa de expansión hasta llegar a una expansión máxima de 0,0127%.

Las curvas de expansión de los tratamientos 1.B y 2.B tienen un comportamiento similar hasta el día 25. Desde el día 25 las probetas del tratamiento 1.B continúan expandiéndose hasta el día 49 sin superar el 0,0100% de expansión. Con respecto a las probetas del tratamiento 2.B, dejan de expandirse y quedan con un tamaño similar al original.

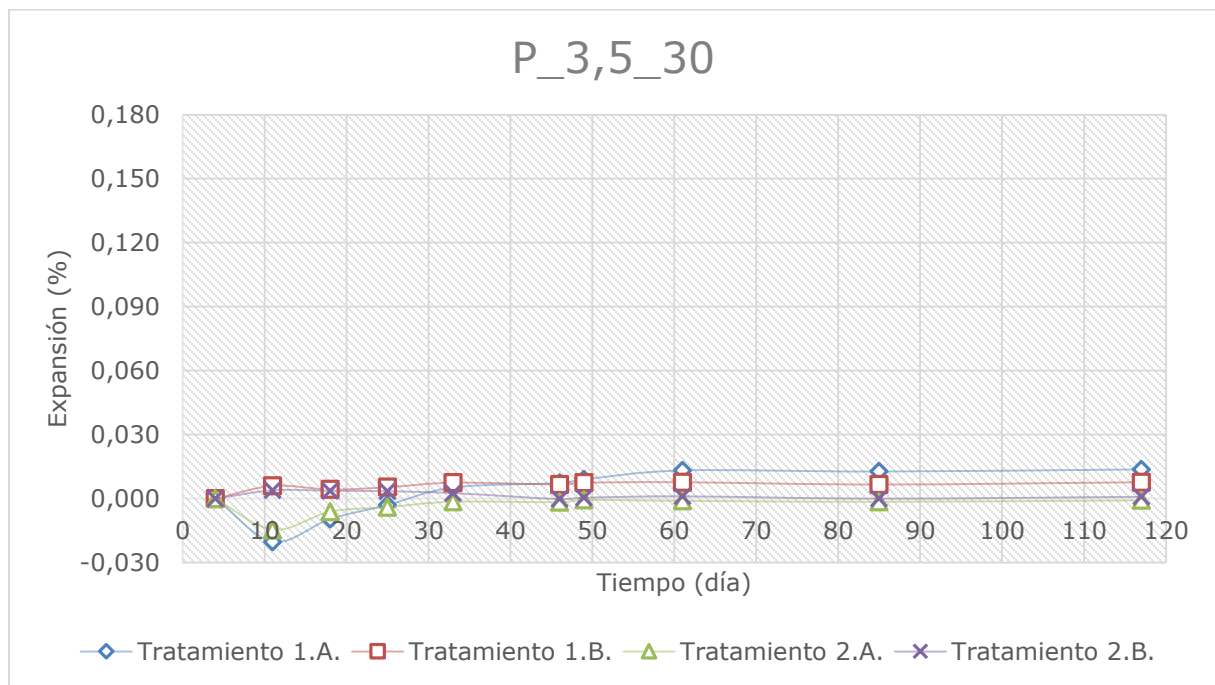


Figura IV-12. Expansiones promedio probetas puzolana: 30% SO_3 : 3,5%.

IV.4 COMPARACIÓN EXPANSIONES OBTENIDAS TRATAMIENTO 1.A

IV.4.1 Observaciones generales

El tratamiento 1.A considera un curado acelerado durante las primeras horas posteriores a la confección, que eleva la temperatura sobre los 80°C dentro del hormigón, desencadenando una serie de procesos físico químicos que dan origen al fenómeno DEF. Posteriormente son aplicados los ciclos de humedecimiento secado, que tienen la finalidad de debilitar la estructura de la probeta a través de una serie de microfisuras provocadas por los sucesivos cambios de temperatura, que facilitan la entrada de agua y por lo tanto la formación de la etringita tardía se produce de una manera más rápida.

IV.4.2 Expansiones al término del ensayo

Las expansiones de las probetas que fueron sometidas a este tratamiento, para todos los hormigones de prueba confeccionados durante la experiencia, son mostradas en la figura IV-13. Se puede apreciar que el comportamiento expansivo es similar hasta el día 40, momento en que se separan las curvas. Las probetas que poseen una adición de 30% de puzolana dejan de expandirse, las que poseen una adición de 15% de puzolana y 0% de puzolana con un 2,8% de SO_3 se continúan expandiendo, pero a una menor tasa en comparación a las expansiones presentadas por las probetas que poseen portland puro con un 3,5% de SO_3 . La expansión límite (0,04%) recomendada por el LCPC es incorporada en el gráfico.

Es claro el efecto que tiene la incorporación de puzolana en cuanto a expansiones de las probetas, ya que al ser mayor la dosis de reemplazo, se presentan expansiones menores. Para las probetas con 15% y 30% de puzolana no se puede apreciar el efecto de variar el contenido de SO_3 , en cambio para las probetas que poseen portland puro es notorio el cambio entre usar un 2,8% y un 3,5% de SO_3 , ya que las que tienen una mayor cantidad de SO_3 tienen una expansión mayor que las que tienen el contenido menor, durante el periodo de evaluación (117 días).

Las probetas que usan un material cementicio con un 30% de adición de puzolana respetan el límite recomendado por la LCPC para los ensayos de reactividad del hormigón por formación de etringita tardía.

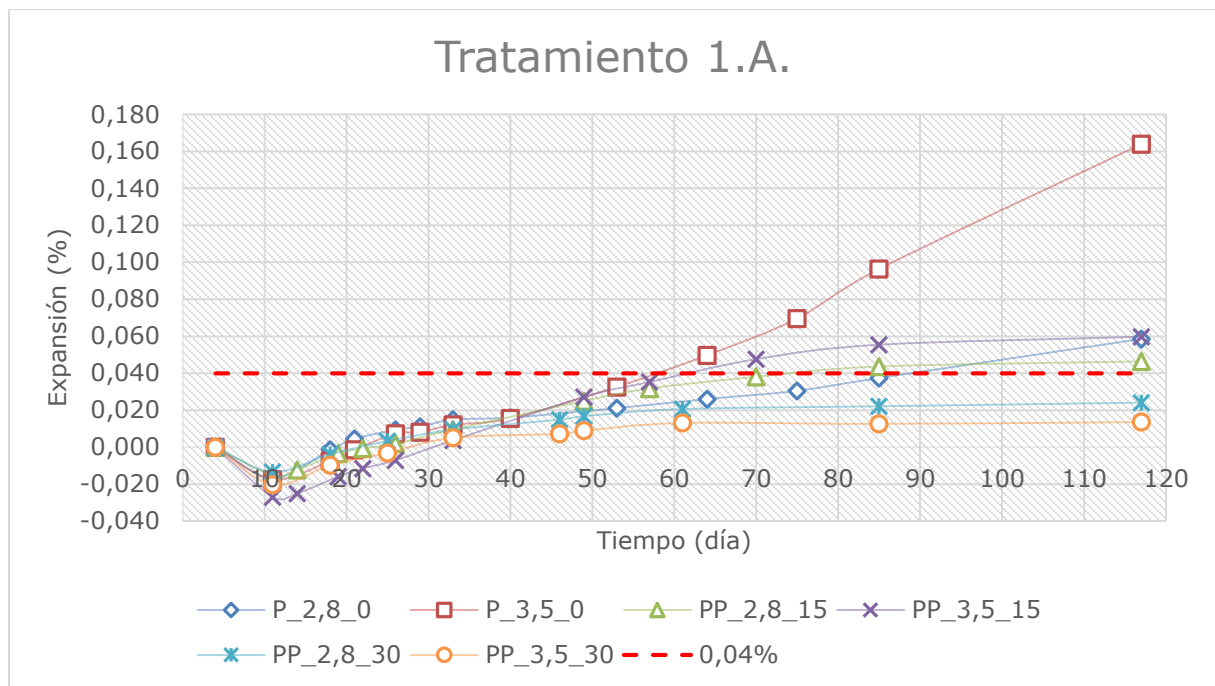


Figura IV-13. Comparación de curvas de comportamiento en el ensayo Duggan modificado (Tratamiento 1.A) para los hormigones estudiados.

En la tabla IV-4, figura IV-14 y IV-15, se muestra la expansión al término del periodo de ensayo (4 meses) y la tasa de expansión en ese momento. De acuerdo a la tasa de expansión, es posible apreciar que las probetas pertenecientes a los hormigones P_2,8_0 y P_3,5_0 tienen potencial para continuar expandiéndose, en cambio el resto de los hormigones en estudio ya han alcanzado valores cercanos a su expansión máxima.

Tabla IV-4. Expansiones y tasa de expansión al término del periodo de estudio para el tratamiento 1.A (Duggan Modificado).

Material Cementicio	Expansión al término del periodo de estudio (%)	Tasa de expansión al término del periodo de estudio (%/día)
P_2,8_0	0,059	0,00066
P_3,5_0	0,164	0,00211
PP_2,8_15	0,046	0,00009
PP_3,5_15	0,060	0,00014
PP_2,8_30	0,024	0,00006
PP_3,5_30	0,014	0,00003

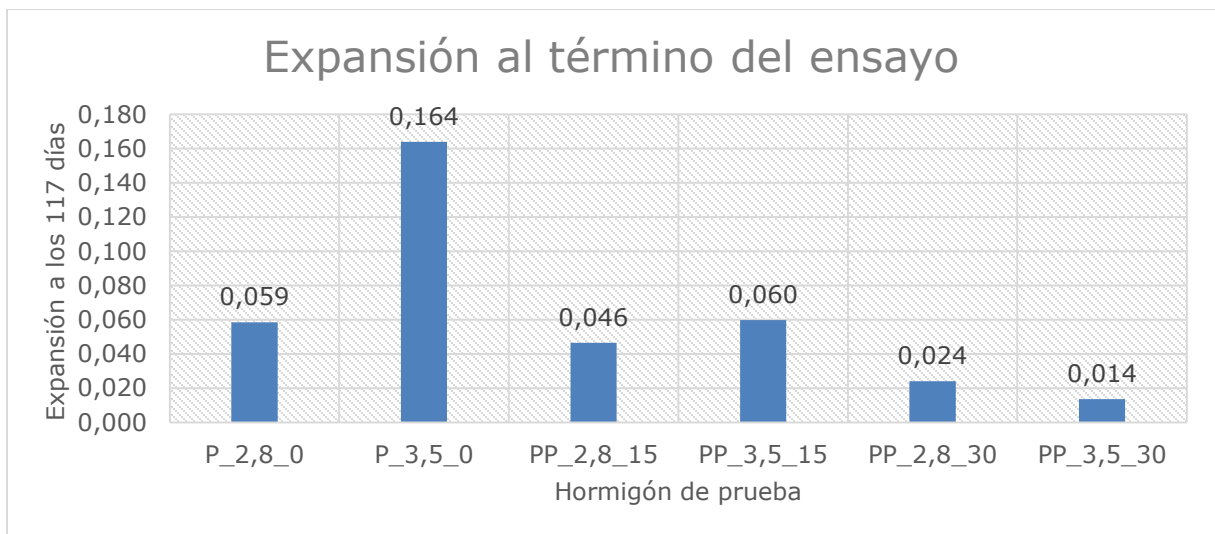


Figura IV-14. Expansiones al término del periodo de estudio para el tratamiento 1.A (Duggan Modificado).

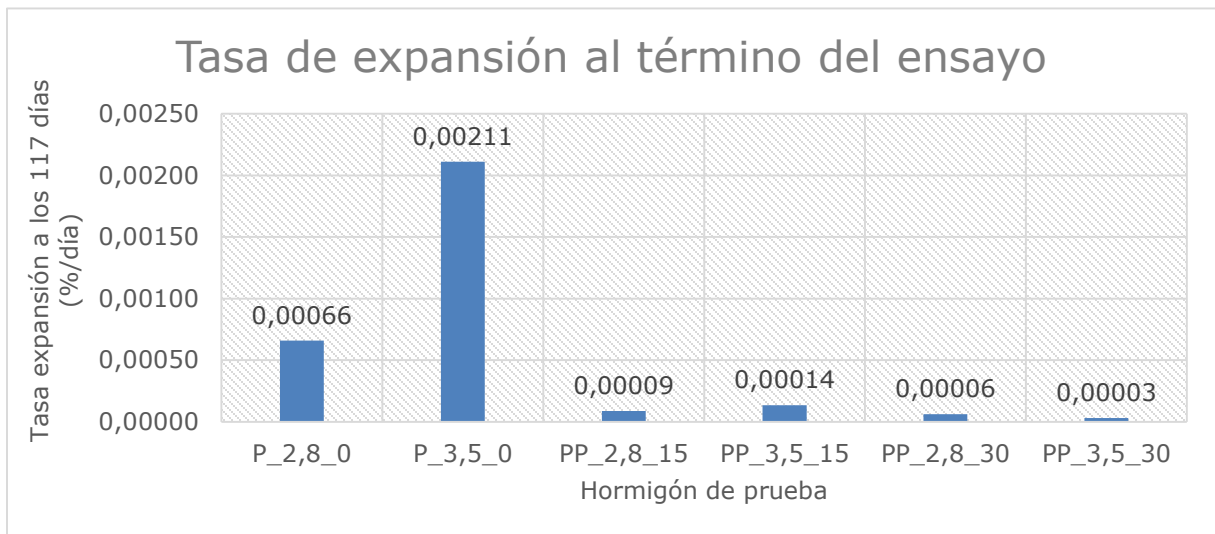


Figura IV-15. Tasa de expansión al término del periodo de estudio para el tratamiento 1.A (Duggan Modificado).

De acuerdo a la figura IV-16, donde se muestra la expansión al término del ensayo respecto al contenido de puzolana del material cementicio empleado en la confección del hormigón de prueba, es posible notar que al utilizar un material cementicio con un 20% o más de puzolana, con un contenido de SO_3 en el rango de 2,8 a 3,5%, no se supera el límite propuesto por el LCPC de 0,040%.

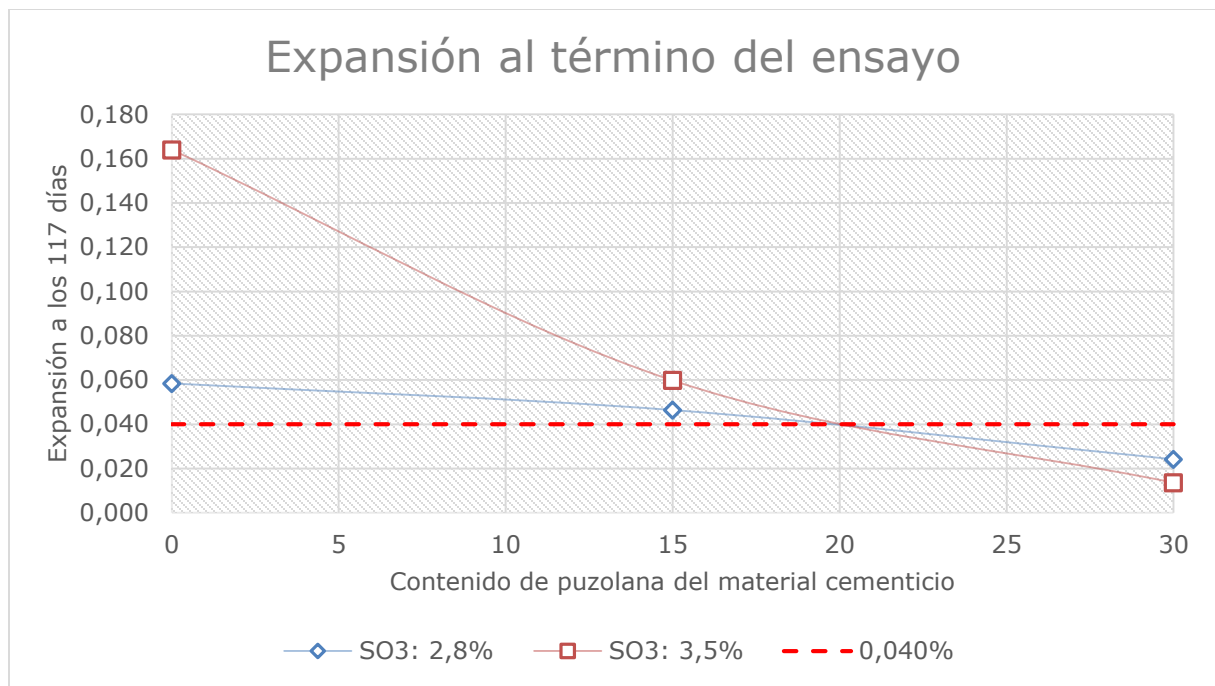


Figura IV-16. Expansión al término del ensayo de acuerdo al contenido de puzolana del material cementicio empleado en el hormigón de prueba.

IV.4.3 Hormigón P_3,5_0

Debido a las expansiones presentadas por las probetas pertenecientes al hormigón P_3,5_0, se procede a realizar una microscopia de barrido electrónica para confirmar que la formación de etringita ha podido ser el agente causante de las expansiones observadas en el hormigón.

IV.4.3.1 Microscopía de barrido electrónico (SEM)

Se toma una muestra a la probeta que presenta mayores expansiones y se le realiza una microscopía de barrido electrónico. Se inicia la búsqueda de indicios de formación de etringita tardía en la interfaz pasta agregado, pero como es de esperar debido a la juventud de las probetas, no es posible encontrar etringita secundaria que se forme a partir de la etringita tardía en estos lugares. Durante la exploración de la muestra llama la atención varios lugares de la pasta en donde parece que una fuerza expansiva "abrió" y dejó una serie de grietas de tamaño microscópico que tienen un origen común. Al hacer una espectroscopia en las cercanías del lugar se aprecia que existen productos con altos contenidos de sulfato, los que corresponden a sulfoaluminatos de calcio que durante su formación producen fuerzas expansivas que la pasta de cemento no es capaz de soportar, por lo que se agrieta.

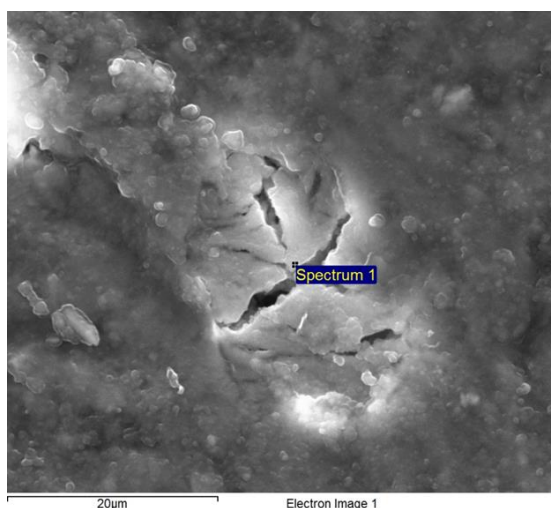


Figura IV-17. Imagen de SEM a muestra perteneciente al hormigón P_3,5_0 con curado acelerado y ciclos humedecimiento secado.

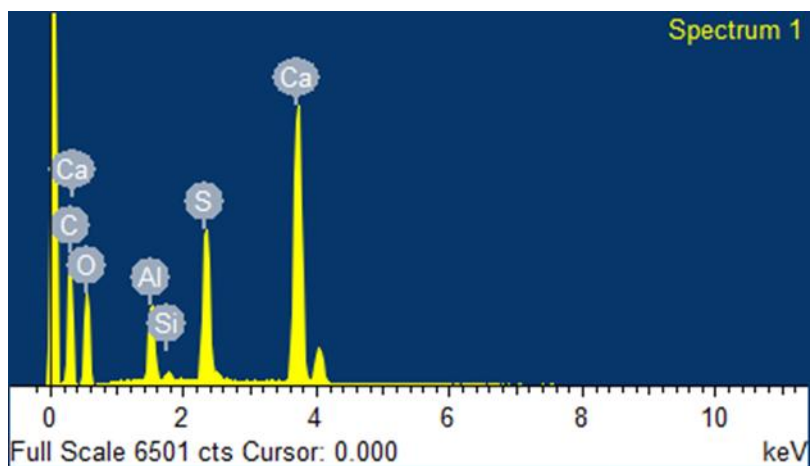


Figura IV-18. Espectroscopia del área señalada en la figura IV-16.

Tabla IV-5. Composición del área señalada en la figura IV-16.

Elemento	Porcentaje en peso (%)
C	35.91
O	34.76
Al	2.99
Si	0.34
S	6.97
Ca	19.03
Total	100.00

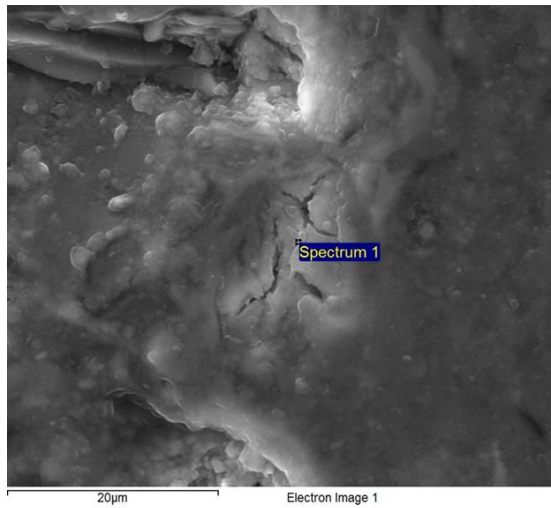


Figura IV-19. Imagen de SEM a muestra perteneciente al hormigón P_3,5_0 con curado acelerado y ciclos humedecimiento secado.

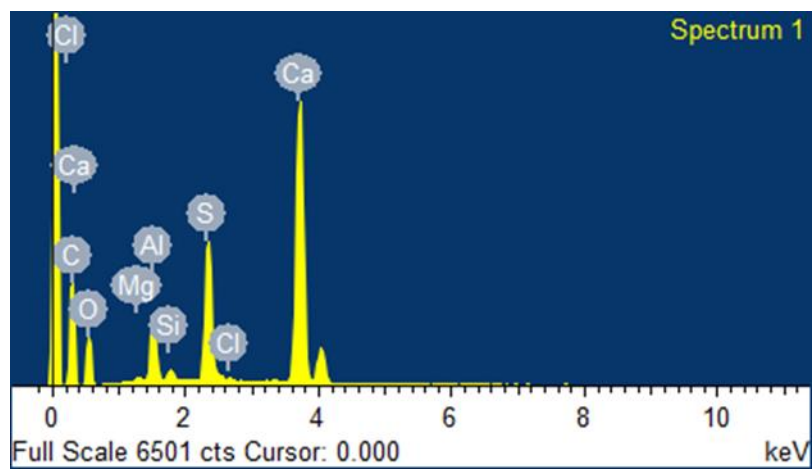


Figura IV-20. Espectroscopia del área señalada en la figura IV-18.

Tabla IV-6. Composición del área señalada en la figura IV-18.

Elemento	Porcentaje en peso (%)
C	41.60
O	25.11
Mg	0.19
Al	3.02
Si	0.48
S	7.24
Cl	0.24
Ca	22.12
Total	100.00

IV.4.4 Hormigón PP_2,8_30 y Hormigón PP_3,5_30

Los materiales cementicios PP_2,8_30 y PP_3,5_30 tienen una adición de puzolana al 30%. Las expansiones que presentan las probetas para los respectivos hormigones de prueba (hormigón PP_2,8_30 y PP_3,5_30) sometidas al tratamiento 1.A, no superan el 0,0250% de expansión durante el periodo de evaluación de 117 días, y alcanzan su expansión máxima a los 49 días aproximadamente.

El tratamiento 1.A es similar al LPC Test Method n°66: Reactivity of a concrete mix design with respect to the delayed ettringite formation – Performance testing, por lo que tiene sentido aplicar los criterios que este método entrega, y que se basan en la experiencia que se ha obtenido en terreno con respecto a la formación de etringita tardía. De acuerdo a estos criterios y el comportamiento expansivo típico de las probetas utilizadas para evaluar la susceptibilidad a DEF (que tienen forma de S), es posible indicar que al usar un material cementicio con un 30% de reemplazo de puzolana por portland puro, el hormigón no es susceptible a la formación de etringita tardía durante su etapa de servicio.

CAPÍTULO V : CONCLUSIONES

Una de las condiciones necesarias para que el fenómeno DEF ocurra, es que se someta al hormigón recién confeccionado, directa o indirectamente, a condiciones de curado a temperaturas superiores a 70°C. Dado esto, es importante identificar en un determinado proyecto, los hormigones en donde se pueden presentar las condiciones para que estas temperaturas se produzcan, ya sea por la geometría, diseño de la mezcla o proceso constructivo, para tomar todas las medidas necesarias para disminuir el riesgo de que este fenómeno se desarrolle y se afecte en algún grado la durabilidad de la estructura. Elegir una mezcla adecuada, en donde se utilice la menor dosis de cemento posible que asegure la resistencia, y que se ocupe un cemento con bajo calor de hidratación es lo ideal. Los programas constructivos cada vez más comprimidos, la ganancia temprana de resistencia para reutilizar moldajes rápidamente, no se deben realizar a expensas de la durabilidad. Lo deseable es desarrollar un plan de control térmico, donde todas las partes involucradas acuerden las medidas a tomar y los resultados esperados.

La otra condición necesaria pero no suficiente, es la presencia de humedad intermitente o permanente durante la etapa de servicio de la estructura. Con respecto a este punto no son muchas las consideraciones que se puedan tomar, ya que hasta con la humedad presente en el aire puede que sea suficiente para que la formación de etringita tardía se produzca. Incluso se han registrado casos en donde la humedad relativa del aire es baja y de todas formas se ha generado el fenómeno DEF.

Cuando las 2 condiciones mencionadas anteriormente están presentes, lo que resta para que el DEF ocurra es que el material cementicio que se esté utilizando sea susceptible. En el presente estudio se utiliza una metodología que nos permite realizar un análisis comparativo de 6 materiales cementicios, que se diferencian en la cantidad de puzolana que utilizan y las cantidades de SO_3 , bajo condiciones de ensayo acelerado. De acuerdo a los resultados de estos ensayos se puede concluir lo siguiente:

- Al utilizar un material cementicio con 30% de reemplazo de cemento por puzolana natural de alta finura, que posea una cantidad de SO_3 dentro del rango de 2,8% a 3,5%, es posible disminuir significativamente (60-90% respecto a los cementos portland puros) las expansiones por formación de etringita tardía. Las probetas que utilizaron este material cementicio se mantuvieron por debajo de las expansiones sugeridas por el LCPC, como indicadoras de potenciales problemas por formación de etringita tardía durante la etapa de servicio de los hormigones colocados en terreno. Además, a este nivel de reemplazo de puzolana, no es

posible notar el efecto al variar el contenido de SO_3 en el material cementicio.

- Al utilizar un material cementicio con un 15% de puzolana, se disminuyen las expansiones en comparación con el cemento portland puro, pero se superan los límites recomendados por el LCPC. Además, a este nivel de reemplazo de cemento por puzolana, el efecto del cambio del contenido de SO_3 respecto a las expansiones presentadas es bajo, expandiéndose más las probetas que poseen un mayor contenido de SO_3 .
- Los materiales cementicios que corresponden a cementos portland puro, especialmente el que tiene un contenido de SO_3 de 3,5% presentaron expansiones considerables, atribuibles al fenómeno DEF mediante una microscopia de barrido electrónico. En este caso, la variación del contenido de SO_3 tiene un efecto considerable.

CAPÍTULO VI : BIBLIOGRAFÍA

- Cement.org. (2015). *Mass Concrete*. Obtenido de <http://www.cement.org/think-harder-concrete-/buildings-structures/design-aids/mass-concrete>
- Cement.org. (2015). *Mass Concrete*. Obtenido de <http://www.cement.org/for-concrete-books-learning/concrete-technology/concrete-design-production/mass-concrete>
- Diamond, S., & Ong, S. (1994). Combined effects of alkali-silica reaction and secondary ettringite deposition in steam cured mortars. *In Cement Technology, American Ceramic Society*, 79-90.
- Divet, L., & Randriambololona, R. (1998). Delayed ettringite formation: the effect of temperature and basicity on the interaction of sulfate and C-S-H phase. *Cement and Concrete Research*, 28(3), 357-363.
- Fernández, C. (2009). Hormigones Masivos. Temas Relevantes para el Constructor. Presentación Seminario de Hormigones Masivos. ICH. 21 y 22 de Julio 2009.
- Ghorab, H. Y., Heinz, D., Ludwig, U., Meskendahl, T., & Wolter, A. (1981). On the stability of calcium aluminate sulphate hydrates in pure systems and in cements, Proc. Int. Congr. Chem. Cem., 7th, Paris 1980. 4, 496-503. Paris: Editions Septima.
- Grabowski, E., Czarnecki, B., Gillot, J. E., Duggan, C. R., & Scott, J. F. (1992). Rapid Test of Concrete Expansivity Due to Internal Sulfate Attack. *ACI Materials Journal*, 89(5), 469-480.
- Heinz, D., & Ludwig, U. (1986). Mechanism of subsequent ettringite formation in mortars and concretes after heat treatment, Proc. Int. Congr. Chem. Cem., 8th, Rio de Janeiro. 5, 186-194. Río de Janeiro: Abla Gráfica e Editora Ltda.
- Heinz, D., & Ludwig, U. (1987). Mechanism of secondary ettringite formation in mortars and concretes subjected to heat treatment, J. M. Scanlon, Concr. Durability, Katharine and Bryant Mather Int. Conf., SP 100, American Concrete Institute. 2, 2059-2071.
- 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.
- 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*.
- 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.
- Nguyen, V.-H., Leklou, N., Aubert, J.-E., & Mounanga, P. (2013). The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of heat cured mortars. *Construction and Building Materials*, 48 , 479-484.
- Sahu, S., & Thaulow, N. (2004). Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties. *Cement And Concrete Research*, 34(9), 1675-1681.
- Taylor, H., Famy, C., & Scrivener, K. (2001). Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 683-693.
- Thomas, M., Folliard, K., Drimalas, T., & Ramlochan, T. (2008). Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 38(6) , 841-847.
- Yang, R., Lawrence, C., Lynsdale, C., & Sharp, J. (1999). Delayed ettringite formation in heat-cured Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 29 (1), 17-25.