



**Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESIS DE MÁSTER

Máster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

**CARACTERIZACIÓN DE ADICIONES DE CAO PARA
DESARROLLAR HORMIGONES DE RETRACCIÓN
COMPENSADA**

Autora

Catalina Madrid Zuluaga

Tutores

**Ignacio Segura Pérez
Sergio Pialarissi Cavalaro**

Departamento

Ingeniería de la construcción

Fecha

Febrero 2014

Resumen

Uno de los principales problemas que presentan los pavimentos de hormigón, especialmente en grandes superficies, es la fisuración debido a la retracción por secado. Existen diferentes soluciones para tratar de reducir o evitar la fisuración por retracción en el hormigón; mediante el uso de juntas, colocación de mallas, utilización de hormigón pretensado, hormigón con fibras, u hormigón de retracción compensada. Este es uno de los sistemas más efectivos, aunque es de los menos estudiados y utilizados. Este hormigón se logra mediante la adición de aditivos expansivos, que generan una expansión del material durante los primeros días, la cual contrarresta las tensiones internas, evitando o reduciendo la fisuración.

Para desarrollar este tipo de hormigones, es importante determinar inicialmente el tipo de adición a utilizar, identificando los puntos a favor y en contra de cada una de las posibilidades existentes. El objetivo de este proyecto es caracterizar la cinética de reacción de diferentes aditivos basados en CaO, dentro de una mezcla de cemento, y así determinar cuál es más idóneo para ser usado como aditivo compensador de retracción en hormigones. Para esto se ha decidido trabajar inicialmente con pastas, basados en la correlación que existe entre los resultados que pueden obtenerse en estas y los resultados en el hormigón. La campaña experimental se ha dividido en dos etapas, una de investigación y puesta a punto de los métodos de ensayo a utilizar, y una etapa de experimentación como tal, en la que se han realizado ensayos de calorimetría y expansión para cinco los tipos de cal proporcionadas por la empresa Caldes de Pachs S.A, en los que se ha estudiado la influencia de la relación a/c y del contenido de cal, en la cinética de reacción de las calces.

Durante el desarrollo del proyecto se ha logrado optimizar con éxito las técnicas de medición de temperatura y de expansión. Mediante estos ensayos se ha obtenido resultados consistentes con las hipótesis iniciales, y se ha logrado corroborar la estrecha relación que existe entre la velocidad de reacción y la temperatura máxima alcanzada durante el proceso de hidratación. Estos resultados son acordes con el comportamiento esperado, ya que la temperatura es uno de los parámetros que más influencia tienen en el desarrollo de resistencias del hormigón: adicionalmente se encuentra que las mezclas que alcanzan mayor temperatura, en tiempos más cortos, presentan mayor expansión.

Adicionalmente se ha estudiado la influencia que tiene el tipo de cal, el contenido de la misma y la relación a/c en la expansión de la muestra. A partir de aquí se deberá acotar el estudio eliminando las mezclas extremas, y determinar que contenido de cal compensa realmente la retracción dentro del hormigón. Una elevada expansión puede alcanzar a fisurar el material. Y una muy baja podría no producir el efecto compensador esperado. El uso de hormigón expansivo con retracción compensada podría presentarse como una buena solución para la ejecución de pavimentos, disminuyendo de forma muy considerable la cantidad de juntas y, por consiguiente, las patologías derivadas de éstas. Todo esto generará una reducción de costes en la etapa de ejecución y mantenimiento.

Abstract

One of the main problems that concrete pavements, especially in big surfaces, is cracking due to drying shrinkage. There are different solutions to try to reduce or avoid shrinkage cracking in concrete, using seals, mesh placement, use of prestressed concrete, fiber concrete, or concrete shrinkage-compensated. This is one of the most effective systems, although it is the least studied and used. This concrete was achieved by the addition of expansive additives, which generate an expansion of the material during the first few days, which counteracts the internal stresses, avoiding or reducing cracking.

To develop this type of concrete, it is important to initially determine the type of addition to use, identifying the pros and cons of each of the possibilities. The objective of this project is to characterize the reaction kinetics of different additives based on CaO, in a mixture of cement, and determine which one is more suitable to be used as additive of shrinkage compensating concrete. For this it has been decided to work initially pasta is based on the correlation between the results that may be obtained in these and results in concrete. The experimental program was divided into two stages, a research and development of test methods to be used, and a stage of experimentation as such, which have been tested and expansion calorimetry five types of limes provided by the company limes PACHS S.A., which have studied the influence of the ratio a/c and the lime content in the reaction kinetics of limes.

During the development of the project has successfully managed to optimize the measuring temperature and expansion. These tests obtained results consistent with the initial hypothesis, and has managed to corroborate the close relationship between the reaction rate and the maximum temperature reached during the hydration process. These results are consistent with the expected behavior, because the temperature is one of the parameters that most influence in the development of resistance of concrete: further found that mixtures reaching higher temperature in shorter times, presented in May further expansion.

Additionally we have studied the influence of the type of lime, the contents thereof and the ratio w/c in the expansion of the sample. From here you should limit the study eliminating extreme mixtures, and determine what really makes lime content in concrete shrinkage. A high expansion can reach to crack the material. And a very low could not afford the expected compensating effect. The use of expanding concrete with compensated shrinkage may occur as a good solution for the implementation of pavements, very significantly decreasing the number of joints and therefore the pathologies derived therefrom. This will generate a cost reduction in the stage of implementation and maintenance.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a los tutores, Ignacio segura y Sergio pialarissi, por su dedicación y apoyo para la realización de este trabajo, también agradezco al equipo del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló, adscrito al departamento de ingeniería de la construcción de la ETSICCPB, y en el laboratorio de materiales y control de calidad de la escuela politécnica superior de edificación de Barcelona (EPSEB). Por su colaboración constante durante el desarrollo de la campaña experimental. Agradecer también a Cristina y a Joan, por su apoyo y colaboración durante todas las etapas de este proceso.

Quiero agradecer de forma muy especial a todas las personas que han hecho parte de esta aventura, los cuales se han convertido en verdaderos amigos que quedaran en el corazón para siempre.

Le doy infinitas gracias a mi novio Agustín por haberme apoyado incluso cuando pensé que no era posible, él ha sido la mejor compañía en este camino. Finalmente darle gracias a las personas más importantes en mi vida, mi familia, sin ellos no habría podido llegar hasta aquí, mil gracias a ellos por haber creído siempre en mí.

Índice

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. introduccion	¡Error! Marcador no definido.
1.2. objetivos	¡Error! Marcador no definido.
1.3. esrtuctura del documento.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Introducción	5
2.2. El fenómeno de la retracción.....	6
2.2.1. Tipos de retracción.....	6
2.2.2. Factores que influyen en la retracción.....	8
2.3. HORMIGÓN CON RETRACCIÓN COMPENSADA	¡Error! Marcador no definido.
2.3.1. Cemento expansivo.....	14
2.3.2. Aditivos expansivos	14
2.3.3. Aditivos expansivos basados en cal.....	16
2.3.4. Factores que influyen en la expansión	18
2.4. METODOS DE MEDICIÓN DE LA EXPANSIÓN EN HORMIGON..	¡Error! Marcador no definido.
2.5. DISEÑO DE HORMIGÓN CON RETRACCIÓN COMPENSADA.....	¡Error! Marcador no definido.
2.6. APLICACIONES DEL HRC	¡Error! Marcador no definido.
2.7. DISCUSIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOS.....	25
3.1. INTRODUCCIÓN	¡Error! Marcador no definido.
3.2. METODOLOGIA.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.1. Materiales utilizados	26
3.2.2. Dosificaciones.....	26
3.3. FASE 1 AJUSTE DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.1. Medición de expansión de cales por medio del aparato de Lambe	27
3.3.2. Calorimetría.....	31
3.3.3. Medición de expansión mediante el uso de probetas prismáticas	35
3.4. FASE 2 CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4.1. Ensayo de calorimetría.....	37
3.4.2. Ensayo de expansión con probetas prismáticas	39

CAPITULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS.....	43
4.1. INTRODUCCIÓN	¡Error! Marcador no definido.
4.2. RESULTADOS DE ENSAYOS DE CALORIMETRIA.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.1. Curva típica de evolución de temperatura en pasta	44
4.2.2. Resultados para pastas con cales tipo 5/15	46
4.2.3. Resultados para mezclas con cales tipo F2000.....	54
4.2.4. Comparativo entre mezclas tipo 5/15 Y F2000	61
4.3. RESULTADOS ENSAYOS DE expansión.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1. Resultados para pastas con adición de cal tipo 5/15	63
4.3.2. Resultados para pastas con adición de cal tipo F2000	65
4.4. Conclusiones ESPECÍFICAS	68
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	71
5.1. CONCLUSIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
5.2. PERSPECTIVAS FUTURAS	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO 6. BIBLIOGRAFIA	74

Índice de figuras

Figura 2.1 Retracción del hormigón en función del agua de amasado	9
Figura 2.2 Influencia de la relación A/C y el contenido de árido en la retracción (Neville, 2011)	10
Figura 2.3 Relación entre la retracción y el tiempo para hormigones almacenados a diferentes humedades relativas (Neville, 2011).....	10
Figura 2.4 Influencia del contenido de cemento en la retracción	11
(Fernández Cánovas, 2007)	11
Figura 2.6 Comportamiento del hormigón con cemento expansivo (Kumar Metha & Monteiro, 2006)	13
Figura 2.8 expansión restringida y esfuerzo de compresión para hormigones con CaO o sulfoaluminatos.....	18
Figura 2.9 Molde para medida de expansión restringida (Alarcon, 2012).....	20
Figura 2.10 Estimación de la expansión mínima para sistemas basados en la formación de etringita. (Russell 1973)	21
Figura 2.11 Estimación de la expansión mínima para sistemas basados en la formación de cal hidratada. (Russell et al 2002).....	21
Figura 2.12 Cambio de longitud de los especímenes de hormigón reforzado con CaO o CSA como agente expansivo	22
Figura 3.1 Montaje basado en el aparato de lambe para medición de expansión.....	28
Figura 3.2 Comparativo de resultados para la cal tipo 5/15 blanca	29
Figura 3.3 Comparativo de resultados para la cal tipo F2000 blanca	29
Figura 3.4 Montaje 1 de ensayo de calorimetría	31
Figura 3.5 Resultados ensayo de calorimetría con secado al aire	32
Figura 3.6 Resultados ensayo de calorimetría secado en cámara climática.....	33
Figura 3.7 (a) Montaje 2 ensayo de calorimetría, (b) sistema adquisición de datos, (c) montaje cerrado	34
Figura 3.8 Resultados pruebas montaje 2 calorimetría.	35
Figura 3.9 Molde y pernos utilizados (b) conformación de probetas, (c) comparador de longitud análogo.....	36
Figura 3.10 Resultados ensayo de expansión en probetas prismáticas.....	36
Figura 3.11 Sistema de adquisición de datos	38
Figura 3.12 Mezcladora automática de morteros.....	39
Figura 3.13 comparador de longitud utilizado en el ensayo de expansión	40
Figura 3.14 Almacenamiento en cámara húmeda	41
Figura 4.1 Curva típica de evolución de temperatura para las pastas de cemento.....	44
Figura 4.2 Resultados de ensayo de calorimetría para muestra patrón	45
Figura 4.3 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.35 y % de cal variable.....	46
Figura 4.5 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.45 y % de cal variable.....	47
Figura 4.6 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.60 y % de cal variable.....	47
Figura 4.7 Tiempo necesario (t3) para alcanzar el pico de temperatura máximo (T3) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.....	48

Figura 4.8 Pico de temperatura máximo (T3) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.	49
Figura 4.9 Tiempo necesario (t1) para alcanzar el pico de temperatura inicial (T1) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.....	50
Figura 4.10 Pico de temperatura inicial (T1) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.....	51
Figura 4.11 Tiempo necesario (t2) para alcanzar el pico de temperatura (T2) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.....	52
Figura 4.12 Pico de temperatura (T2) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60	53
Figura 4.13 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.35 y % de cal variable.....	54
Figura 4.14 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.45 y % de cal tipo F2000 variable	55
Figura 4.15 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.60 y % de cal tipo F2000 variable	55
Figura 4.16 Tiempo necesario (t3) para alcanzar el pico de temperatura máximo (T23) para pastas con cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60	56
Figura 4.17 Pico de temperatura máximo (T3) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.	57
Figura 4.18 Tiempo necesario (t1) para alcanzar el pico de temperatura inicial (T1) para pastas con cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60	58
Figura 4.19 Pico de temperatura máximo (T1) para pastas con cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.	59
Figura 4.20 Tiempo necesario (t1) para alcanzar el pico de temperatura inicial (T1) para pastas con cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60	60
Figura 4.21 Pico de temperatura máximo (T1) cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.....	60
Figura 4.22 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo 5/15 y a/c 0.35	63
Figura 4.23 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo 5/15 y a/c 0.45	64
Figura 4.24 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo 5/15 y a/c 0.60	65
Figura 4.25 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo F2000 y a/c 0.35	66
Figura 4.26 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo F2000 y a/c 0.45	67
Figura 4.27 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo F2000 y a/c 0.60	68

Índice de tablas

Tabla 2.1 Tipo de aditivos expansivos.....	15
Tabla 3.1 Dosificación de pastas	27
Tabla 4.1 Resumen de tiempos requeridos para alcanzar cada uno de los picos de temperatura	45
Tabla 4.2 Resumen de máximos y mínimos cada uno de los picos de temperatura para cal tipo 5/15	61
Tabla 4.3 Resumen de máximos y mínimos cada uno de los picos de temperatura para cal tipo 5/15	62

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Las losas y pavimentos de hormigón son estructuras de uso generalmente industrial, los cuales poseen algunas características que los hacen especiales, pues deben resistir no solo las cargas por flexión, por tráfico, sino las especificaciones de uso. Adicionalmente deben soportar la contracción inicial debida al secado del hormigón, además de la contracción y expansión por efectos térmicos. Esto genera diferentes problemas como reducción de sus propiedades mecánicas, fisuración, alabeo, y desnivelación entre losas.

Estas estructuras deben ser durables y tener un equilibrio entre costos y funcionalidad, ya que son diseñadas para industrias que no se pueden detener para realizar mantenimientos periódicos, mover equipos especializados o altos volúmenes de mercancía. Actualmente el control de la fisuración en pavimentos se realiza mediante la construcción de juntas, las cuales obligan a que las tensiones desarrolladas durante la retracción fisuren el hormigón en esos sitios, permitiendo tener un control de estas fisuras en forma transversal y longitudinal. Estos cortes generan otro tipo de problemas en términos de durabilidad del elemento, al convertirse en zonas de posible infiltración de agua. Otro problema de especial atención en la construcción de juntas es la transferencia de cargas entre módulos, que se realiza mediante pasadores de acero y presentan una dificultad añadida al proceso constructivo, ya que deben estar correctamente alineados y centrados en el espesor de la placa.

En general, existen gran cantidad de variables que intervienen en la construcción de juntas que podrían disminuir su durabilidad y aumentar los costos, tanto de construcción como de mantenimiento. Debido a esto, se ha buscado implementar otros sistemas que permitan la reducción de la cantidad de juntas en los pavimentos.

El proceso de hidratación del óxido de calcio, produce hidróxidos de calcio en una reacción exotérmica que además es expansiva. En este proyecto se pretende caracterizar diferentes tipos de adiciones de cal, con el fin de evaluar su viabilidad técnica para ser usado en hormigones como aditivo compensador de retracción. Aunque ya existen algunos productos de este tipo en el mercado, el conocimiento de las repercusiones que tiene su uso es bajo, por lo que no es posible asegurar su correcto funcionamiento para lograr el efecto previsto. El óxido de calcio (CaO) no es otra cosa que caliza cocida a temperaturas mayores a 1000° C, produciendo cal viva, la cual a contacto con el agua reacciona de manera rápida y violenta. Por lo que al ponerla en una mezcla de hormigón, se tendrá gran parte de la reacción durante el mezclado, transporte y puesta en obra. La otra parte reaccionará cuando el material se encuentra en fase plástica.

Justamente en los diferentes tipos de cales estudiadas, el fabricante ha buscado retrasar la reacción, revistiendo las partículas para retardar la penetración del agua, aumentando la temperatura de cocción o mediante la reducción de la finura de los granos. Con este proyecto se pretende, estudiar el comportamiento de los diferentes tipos de cales dentro de una mezcla de cemento, para definir una concentración óptima, que permita lograr la compensación de la retracción en pisos industriales. Además de definir otros aspectos como el tiempo y tipo de curado, además de una relación a/c que permita el desarrollo total de las capacidades expansivas del material. Se pretende además evaluar todas las variables que intervienen en el proceso de hidratación de la cal y su influencia en el proceso de hidratación del cemento.

Estos estudios se han realizado en pastas de cemento, una vez conocido a fondo el comportamiento del material, y seleccionado el tipo y la concentración idónea de adición, se plantea como una línea futura la implementación de este material en muestras de hormigón y evaluar su comportamiento en escala real. El uso correcto de estas adiciones podría llegar a ser una gran alternativa, para la construcción de pisos industriales. Pues, al controlar la incidencia del fenómeno de retracción de pueden evitar gran cantidad de problemas de durabilidad futuros, lo que supone una reducción significativa de costos.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general que se persigue en esta tesis de master es estudiar el proceso de hidratación y expansión de diferentes tipos de cal dentro de una mezcla de cemento, las cuales presentan diferentes características en cuanto a sus propiedades físicas.

Para poder lograr este objetivo se contempla incidir en la dosificación de la mezcla mediante la modificación de variables, que son: la relación agua/cemento, el tipo de cal y su porcentaje, para poder estudiar su efecto sobre las pastas. Con la variación de estas variables se pretende determinar la influencia que estos tienen en el proceso de hidratación del cemento.

Para lograr el propósito de este trabajo se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Establecer una metodología idónea para estudiar el proceso de evolución de temperatura durante el proceso de hidratación de las pastas de cemento con adición de cal.
- Establecer una metodología idónea para estudiar el proceso de expansión de las pastas de cemento con adición de cal.
- Estudiar la evolución térmica durante las primeras 48 horas de las diferentes muestras mediante ensayos de calorimetría sobre los cinco tipos de cal proporcionadas, variando el contenido de adición y la relación a/c.
- Estudiar el porcentaje de expansión alcanzado debido a la adición de cal, mediante ensayos de expansión en probetas prismáticas sobre los cinco tipos de cal proporcionadas, variando el contenido de adición y la relación a/c.
- Evaluar la posible interacción entre los procesos de hidratación del CaO y el cemento.
- Analizar los resultados de los ensayos realizados según determinando la influencia que tiene la relación a/c y el contenido de cal.
- Verificar la relación que existe entre los diferentes ensayos realizados para determinar qué tipo de cal podría ser más idónea para ser utilizada como adición para compensar la retracción en el hormigón.

1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este trabajo se encuentra dividido en 6 capítulos, en los cuales se describe de forma ordenada en el tiempo, todo el proceso realizado con el fin de lograr una metodología que permita caracterizar las adiciones de CaO para desarrollar hormigones con retracción compensada. A continuación se hará una pequeña explicación de lo que se expone en cada uno de los capítulos.

En el capítulo 2, se realiza una breve introducción al tema, y se realiza una revisión general del fenómeno de retracción y de los principales factores que influyen en la aparición de esta. Seguidamente se exponen los principales aspectos del hormigón con retracción compensada, diferentes tipos de aditivos utilizados comúnmente para producirlo, los diferentes factores que influyen en el proceso expansivo, y los métodos utilizados para la medición de la expansión.

En el capítulo 3 se describe la campaña experimental que se pretende seguir para poder obtener la caracterización de las diferentes muestras, con el fin de lograr los objetivos propuestos, en él se muestran las características de los diferentes materiales componentes utilizados, las dosificaciones de la mezcla. Además se expone el procedimiento de puesta a punto, de cada uno de los ensayos mediante el cual se buscó una metodología óptima para lograr que los ensayos fueran repetibles. Y finalmente se presentan los ensayos que se adoptaron para la etapa de experimentación como tal y los equipos utilizados en cada uno de ellos.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos durante la campaña experimental y su análisis según el tipo de cal utilizado, y la influencia de la relación a/c y el contenido de cal de la mezcla. Se revisan las correlaciones que existen entre los diferentes parámetros evaluados a lo largo de la campaña experimental (temperatura alcanzada, tiempo de reacción y expansión).

Finalmente, el capítulo 5, agrupan las conclusiones que se han obtenido durante la realización de los ensayos. Y las conclusiones que se han podido extraer del análisis de resultados. Adicionalmente se tiene un capítulo de bibliografía de referencia donde se recogen las diferentes fuentes consultadas, tanto las que aparecen citadas explícitamente en este texto como las que han servido para mejorar y fundamentar la comprensión, de los diferentes aspectos que tienen que ver con el proyecto.

CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos, deben resistir no solo las cargas por flexión, por tráfico, y las especificaciones de uso. Adicionalmente deben soportar la contracción inicial debido al secado del hormigón, además de la contracción y expansión por efectos térmicos. Esto genera diferentes problemas como reducción de sus propiedades mecánicas, fisuración, alabeo, y desnivelación entre losas. Estos problemas se han tratado de diferentes formas; mediante el uso de hormigón pretensado, adición de fibras metálicas, construcción de juntas, y el uso de hormigones expansivos. (Garcia Alarcon, 2012)

La estrategia más utilizada actualmente para controlar la fisuración es la construcción de juntas. Este método, básicamente consiste en un corte de al menos un cuarto del espesor de la losa. Ya que mientras el hormigón endurece su comportamiento no corresponde al de un material frágil que se fisure con un corte de poca profundidad. Este corte obliga a que las tensiones desarrolladas durante la retracción fisuren el hormigón en esos sitios permitiendo tener un control de estas fisuras en forma transversal y longitudinal (ACI 360 R, 2010).

Estos cortes generan otro tipo de problemas en términos de durabilidad del elemento. Las juntas se convierten en zonas de posible infiltración de agua, lo cual podría producir, un efecto de bombeo, causando socavación de la base del pavimento, y produciendo una progresiva pérdida de apoyo. Adicionalmente dependiendo del uso del pavimento, podría producirse penetración de cloruros u otro agente agresivo dentro del hormigón.

Otro problema de especial atención en la construcción de juntas, es la transferencia de cargas entre módulos, la cual se realiza mediante pasadores de acero. Esta transferencia evita que se generen resaltes al pasar entre una losa y otra, además, disminuye los esfuerzos en la unión, evitando problemas como pérdida de sección o fractura cerca de las juntas. Estos dispositivos de transferencia de carga presentan gran dificultad en el proceso constructivo. Pues estos deben estar correctamente alineados y centrados en el espesor de la placa, pero en la práctica generalmente no se ejecutan correctamente.

En general, existen gran cantidad de variables que intervienen en la construcción de juntas que podrían disminuir su durabilidad y aumentar los costos, tanto de construcción como de mantenimiento. Debido a esto, se ha buscado implementar otros sistemas que permitan la reducción de la cantidad de juntas en los pavimentos. En este proyecto se ha estudiado el uso de CaO para producir hormigones con retracción compensada, lo cual podría llegar a ser una gran alternativa, para la construcción de pisos industriales.

En este capítulo se presenta una revisión general de los aspectos más importantes de los hormigones expansivos con retracción compensada, prestando especial atención a aquellos que se producen mediante el uso de aditivos expansivos y específicamente los aditivos basados en CaO.

2.2. EL FENÓMENO DE LA RETRACCIÓN

La retracción del hormigón está ligada a la pérdida del agua de amasado, traducida en una disminución de volumen o deformación del hormigón. Esta contracción se presenta durante el fraguado y primera época de endurecimiento del hormigón, especialmente si se produce una falta de agua en el mismo. Este fenómeno, sumado a la baja resistencia a la tracción del hormigón, es el principal responsable de la formación de fisuras de retracción. Las cuales se presentan en mayor medida en elementos de gran área, como losas de pavimento y pisos industriales.

2.2.1. Tipos de retracción

Dependiendo de la edad del hormigón, se tendrán diferentes tipos de retracción. A continuación se explica brevemente cada una de ellas.

Retracción plástica

Este tipo de retracción tiene lugar mientras el hormigón se encuentra en estado plástico, es decir, antes de finalizar el proceso de fraguado. En esta etapa el volumen de la pasta experimenta una contracción del orden de 1% respecto al volumen absoluto de cemento seco. Esta contracción ocurre dentro de las primeras ocho horas (Fernández Cánovas, 2007). Cuando el hormigón comienza a fraguar y, es expuesto a la atmosfera seca, la superficie en contacto con esta comienza inmediatamente a perder agua. Esta agua es eliminada en un proceso capilar, perdiéndose progresivamente la de los poros mayores por evaporación. En los

puntos en los que el agua permanece se desarrollan tensiones capilares, las cuales inducen tensiones de compresión en el hormigón. Como consecuencia se tiene, la retracción de este y por lo tanto una pérdida de volumen de la estructura.

Esta retracción actúa sobre la superficie expuesta del hormigón recién colocado provocando un secado rápido antes de que el material sea capaz de alcanzar valores de resistencia que puedan absorber las tensiones internas que se generan, creando la fisuración por retracción plástica. Esta fisuración suele venir asociada, por un lado, a unas condiciones ambientales extremas (altas temperaturas, bajas humedades y alta velocidad del viento) .Por otro lado puede estar asociada, a unas características específicas, tanto de la composición del hormigón, como de la disposición de la armadura (Mora, Aguado, & Gettu, 2003).

Una forma eficaz de prevenir la retracción plástica, es minimizar la tasa de evaporación de agua de la superficie del hormigón. Se recomienda que no se exceda una tasa de 1 kg/m² por hora. Se debe recordar que la evaporación se incrementa cuando la temperatura del hormigón es mucho mayor que la temperatura ambiente; bajo tales circunstancias, contracción plástica puede ocurrir incluso si la humedad relativa del aire es alta. Por esto es recomendable proteger el hormigón del sol y el viento inmediatamente después de ser vertido, y realizar un curado adecuado (Neville, 2011). La fisuración por retracción plástica se presenta generalmente en forma de muchas fisuras próximas que se cruzan, pero no llegan a alcanzar gran profundidad. Aparte de su efecto estético y contractual, las fisuras permiten la entrada de difusión de humedad y oxígeno capaces de corroer la armadura y a su vez promover la degradación estructural disminuyendo así, la vida de la misma.

Retracción Autógena

La retracción autógena es una disminución de volumen que experimenta el hormigón en una situación de no-intercambio de agua con el exterior. En sistemas sellados (sin aporte de agua exterior al sistema), los poros finos drenan agua desde los capilares de mayor tamaño, causando una reducción de la humedad relativa en el interior del material, que aumenta la actividad del agua de los poros produciendo una disminución del volumen aparente. Los valores típicos de retracción autógena, están alrededor de 40×10^{-6} con una edad de 1 mes, y de 100×10^{-6} luego de 5 años (Neville, 2011). Esta retracción se presenta principalmente en elementos poco porosos.

Retracción por secado

La retracción por secado, se define, como la disminución irreversible de volumen, que presenta el hormigón ya endurecido como consecuencia de la pérdida de agua, en la pasta de cemento por evaporación. Este cambio volumétrico es capaz de crear tensiones importantes en piezas con deformación impedida. Cuando estas tensiones son superiores a la resistencia a tracción del hormigón, se produce rotura por tracción (Fernández Cánovas, 2007). Estas fisuras pueden hacer su aparición antes y después del endurecimiento y siempre que el hormigón encuentre impedida su deformación. El peligro de fisuración es generalmente mayor, mientras

más rápidamente se desarrolle la retracción, y tanto menor, cuanto más prolongado sea el tiempo de que dispone el hormigón para fluir (Soler Ruiz, 2009).

El cambio de volumen experimentado, es inferior a la pérdida de volumen de agua evaporada. Al iniciarse el fenómeno, tiene lugar una pérdida de agua libre que apenas causa retracción. Si la evaporación continua, se inicia la pérdida de agua adsorbida por los geles. El cambio de volumen será igual a la pérdida de agua comprendida en la suma de las capas, de espesor de una molécula de agua que envuelve a todas las partículas. Como el espesor de esta molécula es aproximadamente 1% del tamaño de una partícula de gel, la contracción lineal de la pasta en completamente seca sería de 10.0000×10^{-6} (0,01m/m). Como nunca se llega al secado completo, los valores reales podrían alcanzar los 4.000×10^{-6} m/m. A falta de resultados experimentales, se recomienda tomar como valor de retracción del hormigón en masa 0.35 mm/m y del hormigón armado 0.25 mm/m (Fernández Cánovas, 2007)

Retracción por carbonatación

En el hormigón endurecido tiene lugar el fenómeno de carbonatación, debido a la acción del CO₂ del ambiente. Este reacciona en presencia de humedad con el Ca(OH)₂ formando carbonato cálcico. Este proceso provoca una retracción de carbonatación que, aunque no tan importante ni profunda como la de secado, se superpone a esta incrementándola. La retracción por carbonatación es debida a una disolución de los cristales de hidróxido cálcico o portlandita en las zonas comprimidas como consecuencia de la retracción por secado, y la precipitación de cristales de carbonato en las zonas libres de tensiones (Fernández Cánovas, 2007).

La carbonatación y por tanto la retracción debida a ella alcanza su valor máximo para una humedad relativa del 50 al 60%, siendo despreciable su valor para humedades próximas al 10 o al 10%, con una humedad del 50% un mortero a largo plazo puede llegar a retraerse 50% más que si no se hubiese producido la carbonatación. El efecto de la retracción por carbonatación puede hacerse más notorio en piezas sujetas a alteraciones de humedad y secado. Como por ejemplo las piezas situadas en zonas de oscilación de mareas, y salpicaduras de agua donde puede dar lugar a la fisuración superficial de los elementos (Fernández Cánovas, 2007).

2.2.2. Factores que influyen en la retracción.

Para la evaluación del valor de la retracción han de tenerse en cuenta las diversas variables que influyen en el fenómeno, en especial: el grado de humedad ambiente, el espesor o dimensión de la pieza, la composición del hormigón y el tiempo transcurrido desde la ejecución, que marca la duración del fenómeno. A continuación se presenta la influencia de los factores más importantes.

Relación a/c

A igualdad de dosis de cemento por m^3 , la retracción aumentara con la relación a/c; es decir, habrá mayor cantidad de agua de amasado, que no interviene en la hidratación del cemento, la cual deberá ser eliminada produciendo mayor retracción (García Madrid & Horstman Largacha, 1985). La cantidad de agua influye mucho en la retracción, ya que reduce el volumen de áridos introducidos en el hormigón, que son los que realmente frenan la retracción. En la figura 2.1 (Fernández Cánovas, 2007) se presenta como a partir de la cantidad de agua de una mezcla puede tenerse una idea del orden de magnitud de la retracción que se puede esperar

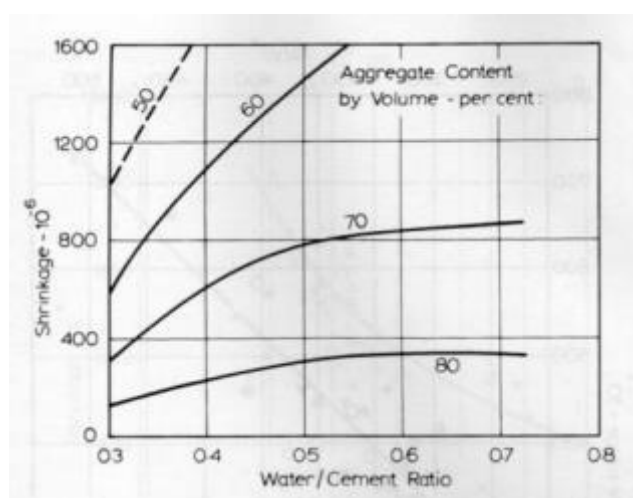


Figura 2.1 Retracción del hormigón en función del agua de amasado

Dosificación y tipo de áridos

La presencia de finos en el hormigón aumenta apreciablemente la retracción de este. El hormigón en condiciones normales, contiene entre el 50 y el 80% en volumen de áridos, si estos tienen menos capacidad que la pasta para contraerse, coaccionan la retracción de esta. El tamaño máximo del árido influyen en retracción, ya que a mayor volumen de árido menor volumen de pasta, lo que se traduce en menor retracción. (García Madrid & Horstman Largacha, 1985). La naturaleza de los áridos también es un factor influyente, por ejemplo, los hormigones con áridos ligeros presentan mayor retracción, pues el agregado tiene menor módulo de elasticidad por lo tanto es más deformable y ofrecerá menor resistencia a la retracción de la pasta. (Neville, 2011). La influencia del contenido de árido, combinada con la relación a/c se presenta en la figura 2.2. En esta se observa como para una misma relación a/c, la relación aumenta a medida que la cantidad de árido disminuye (Neville, 2011).

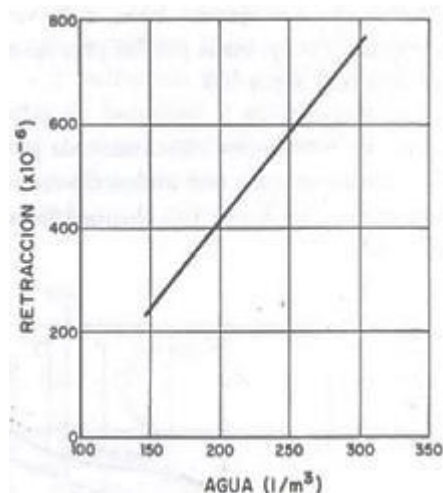


Figura 2.2 Influencia de la relación A/C y el contenido de árido en la retracción (Neville, 2011)

Humedad relativa

Al aumentar la humedad relativa del ambiente la retracción disminuye, ya que esta ayuda a mantener el agua retenida en los poros por más tiempo, evitando que se creen tensiones durante el endurecimiento. Pero se debe tener en cuenta, que en condiciones extremadamente húmedas puede producirse una expansión, por lo cual existirá una humedad en la cual se encuentra un equilibrio hídrico. (García Madrid & Horstman Largacha, 1985).

Los curados húmedos y prolongados son beneficiosos ya que dan lugar a una mayor hidratación del cemento con una gran formación de geles. Por tanto al tener menos partículas que coarten la retracción la pasta se hará más resistente con la edad y soportará mejor las Tensiones de retracción sin llegar a fisurarse. (Fernández Cánovas, 2007). En la figura 2.3, se observa como para una humedad creciente la retracción disminuye, y para una humedad de 100%, el hormigón no se retrae, si no que aumenta sus dimensiones.

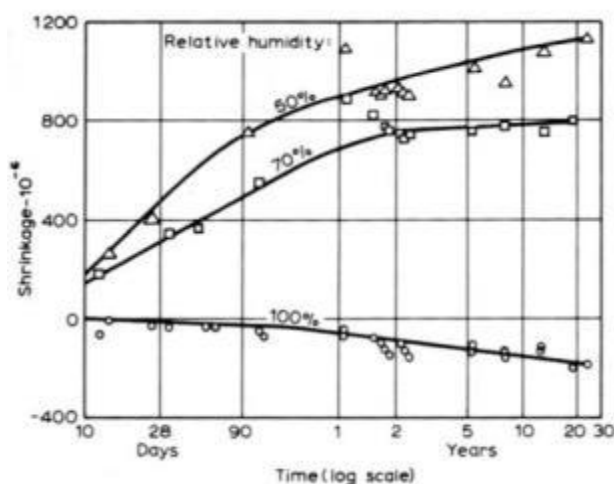


Figura 2.3 Relación entre la retracción y el tiempo para hormigones almacenados a diferentes humedades relativas (Neville, 2011).

Edad del hormigón

La pasta de cemento presentara en las primeras horas, mayor tendencia a la retracción, la cual es menor en el caso de curado y conservación en ambiente húmedo. Esta tendencia se verá disminuida a partir del momento en el que se completa la hidratación. (García Madrid & Horstman Largacha, 1985). Se ha visto que en las dos primeras semanas el hormigón retrae entre el 14 y el 34%, a los tres meses del 40 al 80% y al año del 65 al 80%. Estos valores fueron medidos sobre probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro fabricadas con hormigones con relaciones árido / cemento en te 4.25 y 6.75 y agua cemento entre 0.5 a 0.8 curados entre 28 y 90 días y conservados luego a 20°, con una humedad relativa de 50 a 70%. (Fernández Cánovas, 2007)

Tipo y contenido de cemento

Los cementos ricos en aluminato, presentaran una reacción más fuerte que aquellos que tienen bajo contenido de aluminato tricálcico. Además el grado de finura del cemento tendrá influencia en la retracción de la pasta. Cuanto más finamente molido se encuentre un cemento, mayor será el número de partículas que existan en el por unidad de peso. En consecuencia, mayor será también la retracción experimentada por la pasta pura de cemento.

Adicionalmente se ha observado que en las partículas de tamaño superior a 0.08 mm, que se hidratan lentamente, disminuyen la retracción haciendo un papel parecido al de los áridos (Fernández Cánovas, 2007). Las propiedades del cemento tienen una pequeña influencia en la retracción del hormigón, por lo que una alta retracción de la pasta de cemento puro, no necesariamente significa una alta retracción en el hormigón fabricado con el cemento dado. (Neville, 2011)

La cantidad de cemento también es un factor importante en la retracción. Como se puede observar en la figura 2.4, a mayor dosificación de cemento mayor es el valor de la retracción plástica. En esta figura se observan las retracciones para pasta de cemento, mortero, y cemento con diferentes contenidos de cemento, conservados a 20° C, 50% de humedad relativa y velocidad de viento de 3.6 km/h. (Fernández Cánovas, 2007)

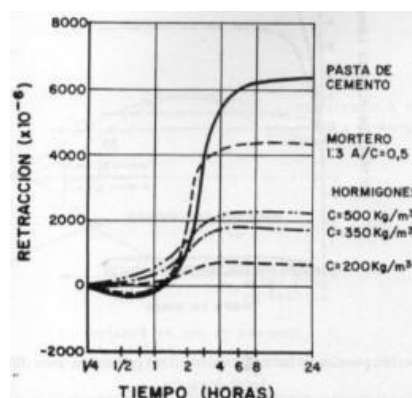


Figura 2.4 Influencia del contenido de cemento en la retracción
(Fernández Cánovas, 2007)

Tamaño y forma de la pieza

El valor de la retracción depende también del tamaño de las piezas. Las piezas grandes pierden agua más lentamente que las pequeñas, por lo que la retracción a una edad dada se reduce al aumentar el tamaño de la pieza. La retracción aumenta cuando disminuye el espesor del elemento, y aumenta el área de la superficie expuesta, ya que el efecto de desecación en relación con el volumen de la pieza es mayor. (García Madrid & Horstman Largacha, 1985). La retracción no hay que considerarla uniforme en todo el espesor de la pieza, ya que la pérdida de humedad se produce con mayor intensidad en la superficie que en el interior, por lo que se tiene una retracción diferencial. Estas diferencias en un mismo elemento pueden provocar una fuerte fisuración si la deformación elástica a tracción es inferior al valor de la deformación por retracción. En la figura 2.5 se presenta gráficamente un resumen de los diversos factores que pueden intervenir en la retracción del hormigón.

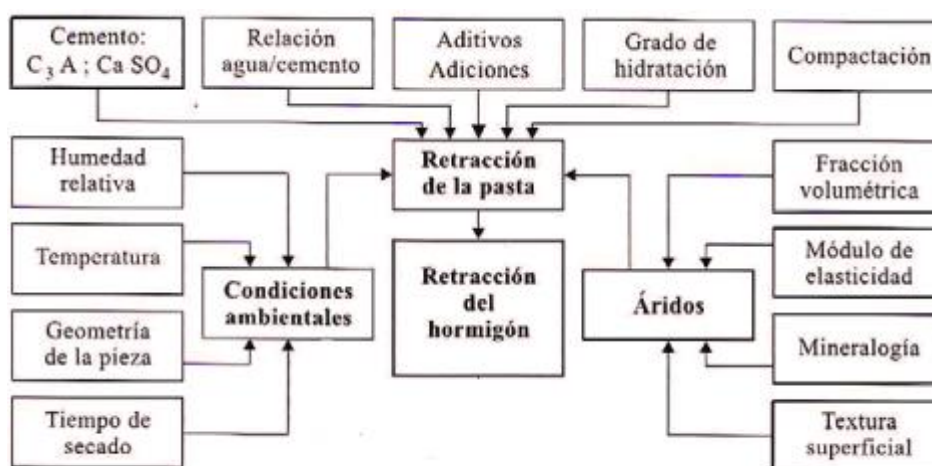


Figura 2.5 Variables que interactúan en la retracción del hormigón (Soler Ruiz, 2009)

2.3. HORMIGÓN CON RETRACCIÓN COMPENSADA

El actual diseño y construcción de estructuras, asume que el hormigón fisurará, y trata de mitigar el problema de diferentes maneras. En el caso de losas, limitando las dimensiones mediante juntas, para así inducir la formación de fisuras. También se han utilizado otras técnicas como reducción de la relación agua/cemento, utilizando en su caso fluidificantes para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, uso líquidos de curado, adiciones de fibras en el hormigón, o la utilización de hormigón con aditivos reductores de retracción (SRA),

Adicionalmente se ha trabajado en el desarrollo de hormigón con retracción compensada, el cual se estudiara más a fondo en esta tesina. El hormigón con retracción compensada, ha ofrecido una buena alternativa en término de costo beneficio, por eso esta alternativa ha encontrado una exitosa utilización en losas de piso, cielos, tanques de almacenamiento de agua, y digestores de aguas residuales. (Kumar Metha & Monteiro, 2006)

El uso de hormigón expansivo con retracción compensada es un método efectivo para eliminar o minimizar la fisuración por retracción en elementos de hormigón. Este método está basado en una expansión controlada del volumen, inducida por una reacción química entre los materiales. Para lograr esa expansión existen dos posibilidades, la primera es usar cementos expansivos, y la otra es usar aditivos expansivos. En ambos casos lo que se hace es incorporar en el hormigón una cantidad controlada de compuestos expansivos, principalmente sulfoaluminato de calcio y/u óxido de calcio (CaO). El primero, al hidratarse conjuntamente con el cemento Portland, produce etringita, en tanto que el segundo produce hidróxido de calcio, generando expansiones que, como suceden en las primeras edades del hormigón, no provocan los problemas destructivos asociados con estas reacciones.

El hormigón con retracción compensada (HRC) tendrá una expansión igual o ligeramente superior a la retracción por secado prevista. En el gráfico 2.6 se representa del concepto del HRC, se comparándose el comportamiento de un hormigón con cemento expansivo y uno con cemento portland, durante el periodo de curado húmedo y el periodo de secado al aire.

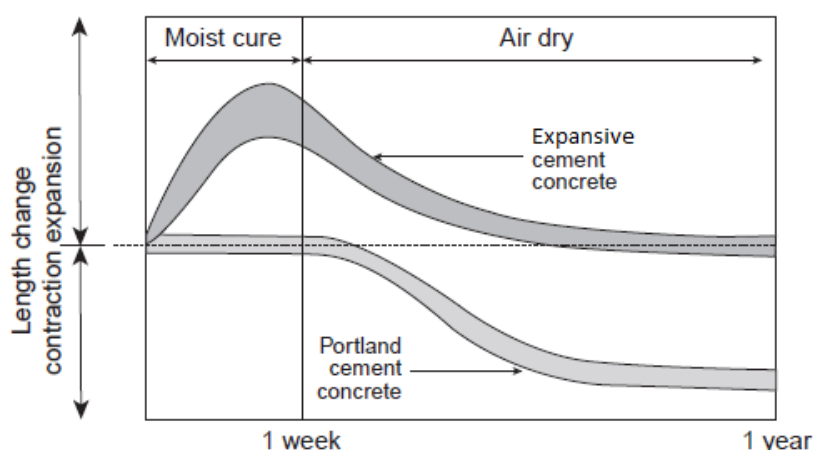


Figura 2.6 Comportamiento del hormigón con cemento expansivo (Kumar Metha & Monteiro, 2006)

Si la expansión fuera insuficiente no se alcanzaría el objetivo, que es que en su estado final de equilibrio, el hormigón permanezca con tensión nula o con una ligera tensión de compresión residual. En el caso que la expansión fuera excesiva, en magnitud o duración, el hormigón podría sufrir daños. Durante los primeros días de curado húmedo el hormigón normal puede experimentar una leve expansión, que rápidamente se revierte en una fuerte contracción cuando es expuesto al medio ambiente. El hormigón con retracción compensada (HRC), en cambio, desarrolla una importante expansión durante la fase de curado húmedo. Durante la expansión el hormigón experimentará una cierta precompresión, debida a las restricciones impuestas ya sea por la armadura, o por el espacio, la cual se aliviara durante la etapa de retracción.

El uso de estos hormigones puede ser más eficiente al momento de contrarrestar no solo la contracción por secado a edades tempranas, sino la contracción a largo plazo de las losas de hormigón. Por lo que sería ideal para solucionar los problemas que se vienen

presentando en la construcción de pavimentos de hormigón, obteniendo beneficios como mayor calidad, durabilidad, mayor tamaño de losa y por lo tanto reducción de juntas y posiblemente menores costos en su ejecución. Para esto debemos verificar el comportamiento de dichos hormigones, observando si reaccionan y producen la expansión del hormigón a los niveles necesarios. Y así para contrarrestar los esfuerzos producidos por contracción por secado principalmente. Además analizar la mejor forma de controlar dicha expansión. El hormigón con retracción compensada, se logra de dos maneras; mediante el uso de cemento expansivo o de aditivos expansivos, los cuales se expondrán a continuación.

2.3.1. Cemento expansivo

Cementos expansivos son cementos hidráulicos que, a diferencia del cemento portland, se expanden durante el período de hidratación temprana después del fraguado. Para conseguir este cemento se pueden utilizar métodos que modifiquen la estructura del cemento mediante la formación de nuevos constituyentes del clínker, tales como sulfoaluminato cálcico hidratado (etringita). Según la ACI 223R-10 "Guide for the use of shrinkage-compensating concrete" el cemento expansivo se clasifica en:

- Cemento expansivo tipo K: Es una mezcla de cemento portland, sulfato tetracálcico trialuminato anhidro (C4A3S), sulfato de calcio (CaSO₄), y cal viva (CaO); el C4A3S es un constituyente de un clínker quemado por separado que luego es mezclado con cemento portland o, alternativamente, se puede formar simultáneamente con el clínker durante el proceso de producción del cemento.
- Cemento expansivo tipo M: Es una mezcla de cemento portland, cemento aluminoso, y sulfato de calcio convenientemente proporcionado.
- Cemento expansivo, tipo S: Es un cemento portland con un alto contenido de aluminato tricálcico (C3A) y un contenido de sulfato de calcio por encima de lo que se encuentra comúnmente en el cemento portland.

Según la búsqueda de la literatura, se encontró que entre estos tres tipos de cemento expansivo, tipo K es el más común comercialmente. Los cementos expansivos tienen la desventaja de experimentar la pérdida rápida de consistencia, debido a la gran necesidad de agua para la formación de etringita en las primeras horas de hidratación (De Melo Neto, 2008)

2.3.2. Aditivos expansivos

Son componentes expansivos, que se adicionan al hormigón durante su producción. Su principal ventaja, radica en la posibilidad de dosificar la cantidad de aditivo, para así conseguir el nivel de expansión deseado. Según la ACI 223R-10 "Guide for the use of shrinkage-compensating concrete" los aditivos expansivos se clasifican en:

- Aditivo expansivo tipo K: Es una mezcla de sulfoaluminato cálcico y sulfato de calcio que produce etringita cuando se mezcla con cemento portland y agua.

- Aditivo expansivo tipo M: Es una mezcla de cemento aluminoso y sulfato de calcio que produce etringita cuando se mezcla con cemento portland y agua.
- Aditivo expansivo tipo S: Es una mezcla de aluminato tricálcico (C_3A) y sulfato de calcio la cual produce etringita cuando se mezcla con cemento portland y el agua.
- Aditivo expansivo tipo G: Es una mezcla de dióxido de calcio y dióxido de aluminio que produce cristales de hidróxido de calcio cuando se mezcla con cemento portland y agua.

La tabla 2.1, presenta un resumen de los diferentes tipos de aditivos, y el proceso expansivo que pretende cada uno.

TIPO DE ADITIVO	COMPONENTES	PROCESO EXPANSIVO	TIEMPO REQUERIDO
K	Sulfoaluminato calcico	Formación de etringita (sulfoaluminato calcico hidratado)	7 Días
	Sulfato de calcio		
M	Aluminato calcico		
	Sulfato de calcio		
S	Aluminato tricalcico		
	Sulfato de calcio		
G	Dioxido de calcio	Formación de cal hidratada ($Ca(OH)_2$)	1 - 2 Días
	Dioxido de aluminio		

Tabla 2.1 Tipo de aditivos expansivos.

Las variantes de aditivos y cementos expansivos tipos K, S Y M, están basados en la formación de etringita, en cantidades considerables durante los primeros días de fraguado. Los componentes expansivos deben producir tensiones expansivas después del fraguado, en una etapa en la que en hormigón adquiere cierta rigidez para transferir los esfuerzos de expansión como un material plástico. La expansión que toma lugar después de la solidificación (formación tardía de etringita) reduce el rendimiento mecánico, o en caso extremo, podría llevar a la falla del material. El tiempo de expansión es inversamente proporcional a la finura del componente expansivo, y directamente proporcional a la cantidad de sulfato añadido.

La etringita se produce en forma de agujas las cuales al formarse alrededor de los silicatos de la pasta hacen que ésta comprima todas las partículas y se genere el efecto de expansión. La formación de etringita se inicia casi inmediatamente después de que el agua de mezclado es introducida y su formación y continua durante el curado con agua hasta que se agota el SO_3 o el Al_2O_3 . El mayor porcentaje de la formación de etringita debe darse cuando el hormigón muestre cierto grado de resistencia. Si la expansión generada por la etringita ocurre mientras el hormigón está en estado plástico, se corre el riesgo que la expansión sea disipada en deformaciones del hormigón plásticas o semiplásticas y no genere ninguna compresión en este, que es lo que se pretende inicialmente. (Garcia Madrid & Horstman Largacha, 1985)

2.3.3. Aditivos expansivos basados en cal.

Este tipo de aditivo, utilizado para producir hormigones con retracción compensada, está basado en la reacción expansiva que ocurre entre la cal (CaO) y agua, para producir hidróxido de calcio acorde con la reacción [2.1].



El óxido de calcio (CaO) no es otra cosa que caliza cocida a temperaturas variables entre 900 y 950 °C, produciendo cal viva, la cual a contacto con el agua reacciona de manera rápida y violenta. La piedra caliza de la cual deriva, es la misma que es utilizada para producir el cemento, por lo tanto posee una compatibilidad absoluta con el cemento. Para que la CaO pueda ser utilizada con éxito como agente expansivo se debe cocer a temperaturas mayores a 1000 °C, resultando en “dead burnt lime” (Colleparidi & Trolli, 2008). Como se ha descrito, la cal viva reacciona rápidamente al entrar en contacto con el agua, por lo que al ponerla en una mezcla de hormigón, esta será la primera en absorber el agua y se tendrá gran parte de la reacción durante el mezclado, transporte y puesta en obra de la mezcla. La otra parte reaccionará cuando el material se encuentra en fase plástica.

Justamente se ha buscado retrasar la reacción de varias formas y con varios productos, por ejemplo revistiendo las partículas para retardar la penetración del agua. Pero de igual forma una vez que el agua logre penetrar por esta protección, la reacción de la cal será instantánea y violenta y reaccionará toda en una vez o casi de una sola vez. Razón por la cual estos recubrimientos podrían resultar poco efectivos pues las partículas más pequeñas reaccionarán antes y las más grandes un poco después, pero siempre en cuestión de un máximo 2-3 horas, nunca en días. En realidad, la temperatura de cocción más alta induce un proceso de sintetización reduciendo la porosidad del material y retardando su reactividad con el agua. Un retardo adicional en la hidratación se puede obtener mediante la reducción de la finura de los granos durante proceso de molienda subsiguiente. Alta porosidad y tamaño pequeño de partículas de CaO aceleran la transformación en Ca(OH)₂

Aditivos basados en cal vs aditivos basados en sulfoaluminatos.

Como se anotó anteriormente existen varias familias de agentes expansivos, los más importantes son los basados en la formación de etringita por medio de la transformación de sulfoaluminatos, y los basados en la transformación de cal en hidróxido de calcio. La expansión producida por estos agentes debe ocurrir dentro de un periodo de tiempo determinado en un hormigón adecuadamente reforzado para que se produzcan las tensiones de compresión en el hormigón. La figura 2.7 muestra un proceso de expansión típico, en función del tiempo para los dos hormigones, en él se muestra la diferencia entre los dos tipos de agentes expansivos.

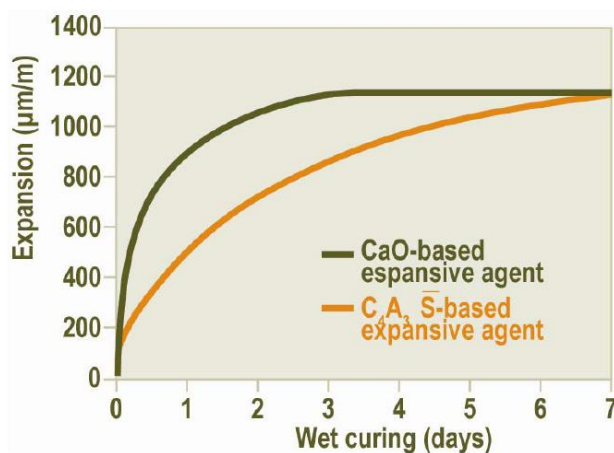


Figura 2.7 Comportamiento de agentes expansivos basados en CaO y basados en C₄A₃S (Colleparidi & Trolli, 2008)

La rápida expansión inducida por el CaO, podría obligar a usar hormigón de rápido endurecimiento, con el fin de aprovechar al máximo la reacción. El proceso relacionado con la hidratación de la cal se produce dentro de 1 a 3 días. Mientras que sobre la base de formación de etringita serán necesarios de 5 a 7 días para desarrollar completamente su potencial expansivo. De otro lado el hormigón con retracción compensada con aditivos basados en CaO, requiere un periodo más corto de curado húmedo, alrededor de 2 días, para alcanzar la expansión requerida. Mientras, los basados en sulfoaluminatos pueden requerir alrededor de 7 días de curado húmedo continuado. Por lo tanto el desempeño en términos de expansión en los hormigones con CaO, están menos afectados por las deficiencias de curado. En consecuencia, tienen menos riesgo de presentar expansiones tardías debido a CaO sin reaccionar. Generalmente se prefiere adicionar CaO como componente expansivo externo, al cemento portland ordinario, pues de esta forma reacción no es afectada por el tipo de cemento usado. (Colleparidi & Trolli, 2008)

En la figura 2.8 se comparan las tasas de expansión con dos desarrollos de resistencia de cemento A y B típicos. Se observa la formación de etringita concuerda muy bien con los hormigones A y B. Por otra parte, la tasa de expansión relacionada con la hidratación de la cal, concuerda solo con la resistencia a edades tempranas del hormigón A. mientras que el hormigón B no desarrolla un adecuado nivel de esfuerzos en el periodo de (0-12h) que corresponde al tiempo en el que se desarrolla el 75% de la expansión. Esta diferencia puede explicar el mayor uso de aditivos basados en la formación de etringita para la fabricación de hormigones expansivos con retracción compensada en el pasado, cuando se usaban hormigones con resistencia a la compresión a 1 día de 5-10 MPa.

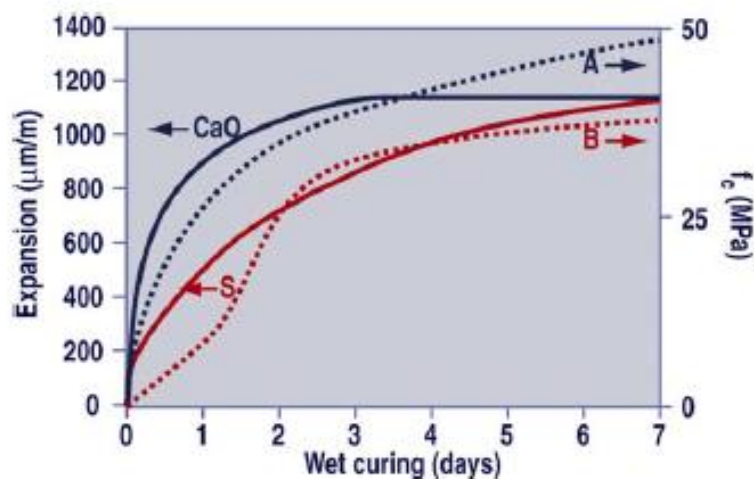


Figura 2.8 expansión restringida y esfuerzo de compresión para hormigones con CaO o sulfoaluminatos

Por lo anterior, el uso de aditivos expansivos basados en CaO, combinados con hormigones con resistencia a la compresión a temprana edad entre (10-20 MPa) resulta más ventajoso con respecto a los basados en sulfoaluminatos. Esto debido al corto tiempo de curado requerido.

2.3.4. Factores que influyen en la expansión

La expansión en el hormigón puede verse afectada por diferentes factores, los principales se exponen a continuación. (García Madrid & Horstman Largacha, 1985)

- Tipo de cemento o de aditivo expansivo: Los diferentes tipos de cemento o aditivos expansivos, difieren en la forma de los compuestos de aluminio, según se utilice uno u otro aluminato, se consigue una velocidad de formación de la etringita una cantidad de la misma y con ellos una cierta expansión durante el proceso de fraguado y endurecimiento.
- Composición química y grado de finura: La velocidad de expansión depende de la cantidad de aluminatos preparados para hidratarse, siempre y cuando exista CaSO₄ accesible, además para una cantidad dada de aluminatos el tiempo que dura la expansión depende de la cantidad de sulfato cálcico presente. En cuanto al grado de finura se puede afirmar que un aumento de la superficie específica producirá menos expansión. Esto se da debido a que el aumento de la superficie produce una aceleración del proceso de formación de etringita en los primeros momentos, produciéndose deformaciones plásticas. Lo cual anula el proceso expansivo.
- Relación agua/cemento: Al disminuir la relación agua/cemento se aprecia un incremento en la expansión, esto se da en consistencias medias.
- Temperatura: Para humedades relativamente bajas, manteniendo la temperatura constante, se produce un descenso de la expansión.

- **Coacción a la expansión:** Puede darse por medio de las armaduras, del rozamiento de la base, o estructuras adyacentes, la coacción determina la expansión final, y produce una compresión en el hormigón del orden de 2 a 7 kg/cm², y con ello se consigue minimizar la aparición de fisuras de retracción por secado.
- **Tiempo de amasado:** El aumento del tiempo de amasado, produce un descenso de la expansión. El amasado acelera la formación de etringita y se pierde la disponibilidad de la misma para la expansión posterior.
- **Curado:** Las condiciones de curado deben ser más intensas que en un hormigón normal, existen dos reacciones de hidratación diferentes, la formación de los silicatos cálcicos hidratados, y la formación de la etringita que determina la expansión, estas dos reacciones están afectados de forma diferente por la temperatura y la disponibilidad de agua de curado. Un curado descuidado puede reducir el nivel de expansión

2.4. MEDICIÓN DE LA EXPANSIÓN EN EL HORMIGÓN

El método utilizado para estudiar la expansión de un elemento es el basado en la norma (ASTM C878) "Expansión restringida de hormigones con retracción compensada". El diseño de mezclas de (HCR) debe partir de evaluar los niveles de expansión deseados de forma tal que estos no sean excesivos, pues se podrían inducir esfuerzos indeseables que tiendan a agrietar el elemento o a deformarlo en exceso. Por esto, es necesario que el desempeño del hormigón, en lo que a compensación se refiere, sea probado de acuerdo a lo que se establece en la norma ASTM C878/C878M, en donde se puede estimar la cantidad de material expansivo, necesaria para lograr los niveles deseados de expansión en el hormigón. Este método de ensayo también se puede adaptar fácilmente a los estudios de expansión con distintos grados de restricción, las comparaciones de cementos, los efectos del contenido de cemento, proporciones de mezcla, o tratamientos ambientales que difieren de los procedimientos estándar establecidos por este método de ensayo.

Para lograr el sistema de retención, el hormigón con retracción compensada se cuela alrededor de una varilla roscada que tiene una placa de acero unida a cada extremo. El vástago roscado pasa a través del prisma de 75 mm, cuadrado con una longitud de 250 mm y una longitud total (incluyendo la longitud de las tuercas de la varilla y la tapa) de aproximadamente 290 mm. Al menos tres muestras se prepararán para cada prueba, las placas de acero en los extremos sirven de contención. La jaula de restricción es de auto-reacción, que consiste en una varilla de acero con arandelas de cierre de acero, y por tuercas hexagonales fuera de la jaula, esta jaula de restricción se muestra en la figura 2.9. El curado y el régimen de medición para los prismas (HRC) son idénticos al de los prismas para mezclas tradicionales de hormigón.



Figura 2.9 Molde para medida de expansión restringida (Alarcon, 2012)

Se han realizado pruebas con algunas variaciones a la norma, como el ensayo de prisma restringido con estrangulamiento, con el cual se pueden medir los efectos de la retracción del hormigón. Este ensayo está conformado por un molde metálico de 600×150×150 mm con coacciones en los extremos, con unas anillas de anclaje. El fondo del molde está cubierto por una lámina de nylon, con objeto de reducir el rozamiento y adhesión entre el hormigón y el molde metálico. En la sección central de la probeta se estrangula la sección mediante una entalla de 50 mm de base y 106 mm de altura. (Mora, Aguado, & Gettu, 2003). Con el fin de medir los desplazamientos horizontales, se dispone de un transductor en puente. El mismo se fija al hormigón fresco mediante dos placas delgadas de aluminio de 100×10 mm. La distancia entre los extremos que constituyen la galga de medida es de 100 mm. Este sistema de medida es ligero y solo ejerce una presión de 0,25 kPa sobre la superficie de hormigón.

También se ha utilizado en ensayo de panel restringido, para medir las características de retracción del hormigón en grandes superficies, el cual está formado por un molde metálico de 100 × 800 × 800 mm. Como en el caso anterior, para reducir el rozamiento y adhesión entre el hormigón y el molde, se dispone de una lámina de polimetilmetacrilato, de 3 mm de espesor. La restricción en los extremos se obtiene mediante 3 filas de pernos restringiendo el movimiento en las dos direcciones horizontales.

2.5. DISEÑO DE HORMIGÓN CON RETRACCIÓN COMPENSADA

Según la ACI 223R-10 el diseño de hormigón con retracción compensada debe tener en cuenta lo siguiente

- Estimación de la contracción del elemento. En primer lugar, se debe realizar una predicción suficientemente fiable de acuerdo a la experiencia de la contracción esperada del elemento. En esta estimación, se debe tener en cuenta los efectos del espesor del elemento, cantidad de refuerzo, la humedad relativa, la composición del hormigón y el tipo de agregado.

- Selección de la expansión miembro requerido. Según ACI 223R, para proporcionar una compensación de la contracción satisfactoria, la expansión requerida en el elemento restringido, debe ser mayor, o por lo menos igual a, la contracción esperada.
- Estimación de la expansión mínima requerida en el ensayo ASTM C878 Esta expansión máxima, se determina mediante las figuras 2.10 y 2.11 dependiendo del tipo de aditivo expansivo utilizado. Tomadas de la ACI 223-10 y basadas en los datos publicados por Russell.

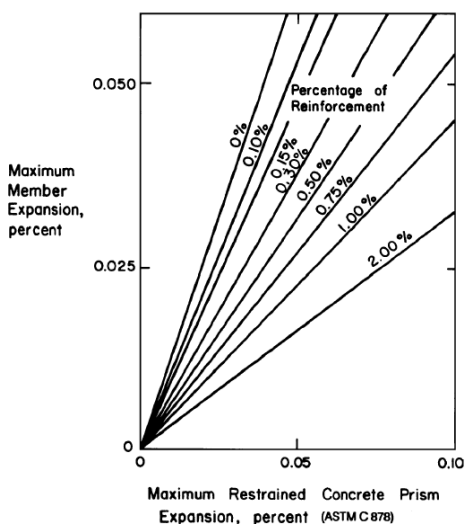


Figura 2.10 Estimación de la expansión mínima para sistemas basados en la formación de etringita. (Russell 1973)

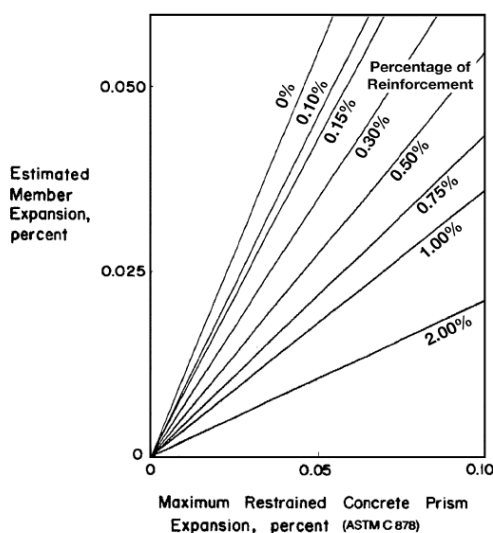


Figura 2.11 Estimación de la expansión mínima para sistemas basados en la formación de cal hidratada. (Russell et al 2002)

2.6. APLICACIONES DEL HORMIGÓN CON RETRACCIÓN COMPENSADA

El Hormigón con retracción compensada (HRC), puede ser utilizado en cualquier tipo de estructuras de hormigón armado sin juntas, condicionado por un curado húmedo adecuado. En particular puede utilizarse para pavimentos industriales interiores o exteriores de hasta 600 o 900m² respectivamente. Como se ha visto anteriormente, esta técnica está basada en una expansión restringida temprana, que ocurre entre el agente expansivo y el agua. Y durante la contracción producida por las armaduras, la expansión del hormigón es transformada en una acción que compensa los esfuerzos inducidos por la retracción por secado, la cual empieza al final del curado húmedo preliminar.

La figura 2.6 muestra la expansión restringida, determinada de acuerdo al ensayo ASTM C 878, la línea sólida indica el curado bajo agua saturada con cal, pero este tipo de curado es poco realista principalmente en losas de pavimento, por lo que la línea punteada corresponde a encharcamiento continuo durante dos días, y secado al aire con una humedad de 65% en el cual la tasa de expansión se reduce al 50% y en aproximadamente 5 días se anula totalmente (Colleparidi, Borsoi, & Colleparidi, 2005)

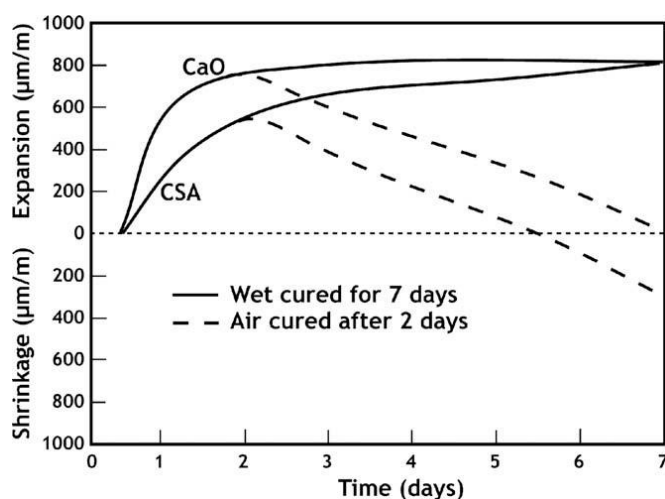


Figura 2.12 Cambio de longitud de los especímenes de hormigón reforzado con CaO o CSA como agente expansivo

Por tanto, una aplicación exitosa de hormigón compensador de la retracción para pavimentos sin grietas ni juntas de contracción sigue siendo difícil de lograr en la práctica. Se ha venido estudiando la combinación de un aditivo reductor de retracción (SRA) con un agente expansivo basado en CaO, que ha demostrado ser de gran éxito incluso en ausencia de curado húmedo, pues se obtiene mezclas menos sensibles al secado (Colleparidi, Borsoi, & Colleparidi, 2005). También se ha usado exitosamente la combinación de un agente expansivo basado en CaO y un superplastificante poliacrilato especial (PA/SRA) capaz de reducir tanto la cantidad de agua de amasado como la contracción por secado para construir pisos industriales de hormigón sin juntas de contracción de 800m² y sin ningún tipo de curado húmedo.

2.7. DISCUSIÓN

Una vez introducidos dentro del presente capítulo los conceptos más relevantes implicados en la retracción del hormigón, se presentan las diferentes alternativas existentes para minimizar o compensar esta retracción. Profundizando en el uso de hormigón con retracción compensada. Sin embargo se ha encontrado que el desarrollo de aditivos compensadores de retracción basados en cal no se ha profundizado lo suficiente en España. Esto, sumado a la gran ventaja que al parecer ofrece sobre los aditivos basados en sulfoaluminatos motiva a realizar una investigación más exhaustiva, sobre la posibilidad de su utilización.

Adicionalmente Bajo concepto de pavimentos libres de juntas se puede obtener una importante línea de investigación en el área de los hormigones expansivos, para obtener un mejor desempeño que los pavimentos tradicionales, los cuales acarrearán muchas más variables como las juntas inducidas, dovelas de trasferencias, sellado de juntas, que de no tener un especial cuidado y mantenimiento, podrían llevar a un desgaste prematuro de la estructura. En la realidad, el mantenimiento que se les da a las juntas es casi nulo, salvo en estructuras que por sus condiciones así lo demanden. El hecho de poder hacer un pavimento industrial con un menor número de juntas, disminuye los problemas que a través de éstas se presentan, minimizando los costos de mantenimiento y reparación; condiciones que serían ideales para los propietarios de este tipo de estructuras.

Como primer paso para el estudio de la utilización de cal como aditivo compensador de retracción en hormigones es importante conocer los procesos que se llevan a cabo durante su hidratación, como son la expansión y la temperatura. Y así definir la cinética de retracción de cada material, y escoger el más conveniente para ser utilizado posteriormente en un estudio para morteros y hormigones. En el capítulo siguiente se describirán los procedimientos y materiales utilizados para lograr esta caracterización

CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOS

3.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se han expuesto las generalidades de los hormigones con retracción compensada. Haciendo énfasis en los hormigones fabricados a partir de adiciones a la mezcla, y específicamente adiciones basadas en cal. Se ha explicado además, lo ventajoso que resulta utilizar este tipo de aditivos, respecto a los aditivos basados en sulfoaluminatos.

En este capítulo se describirán las características de los materiales empleados, sus dosificaciones y los equipos utilizados en los diferentes ensayos. Seguidamente se presenta el programa experimental que se ha seguido con el fin estudiar la viabilidad técnica del empleo de adiciones de CaO, y la selección del mejor tipo de cal a utilizar, entre las proporcionadas por el fabricante. La campaña experimental se ha dividido en dos fases, una de pruebas y ajuste de los diferentes ensayos posibles, y otra de experimentación como tal basado en los ensayos optimizados en la fase 1.

3.2. METODOLOGÍA

El objetivo de esta campaña es caracterizar la cinética de reacción de los diferentes tipos de cales para ser usadas como aditivo compensador de retracción. Para ellos se estudiara la calorimetría del proceso y la expansión generada. Este estudio se realizara en pastas de cemento, basados en la relación que existe entre los procesos generados en estas y los

generados en el hormigón. Los materiales, las dosificaciones, los procesos de fabricación de las mezclas y los métodos de ensayo se describen en esta sección. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló, adscrito al departamento de ingeniería de la construcción de la ETSICCPB, y en el laboratorio de materiales y control de calidad de la escuela politécnica superior de edificación de Barcelona (EPSEB)

3.2.1. Materiales utilizados

Cemento y agua

Para la realización de esta campaña experimental se utilizó cemento portland TIPO I. el cual se almacenó en recipientes estancos para evitar en lo posible la hidratación de este. El agua utilizada es destilada, pues mediante la utilización de esta se está asegurando que el agua es limpia y exenta de sustancias químicas que puedan llegar a alterar la mezcla.

Aditivo compensador de retracción

Para la realización de este estudio, la empresa CALES DE PACHS S.A, ha suministrado 5 tipos de cale, cada una con cinéticas diferentes. Cada una de las cales ha sido almacenada, en un recipiente estanco para evitar en lo posible su hidratación, las cuales son 5/15 blanca (A1), 5/15 con aditivo (A2), F2000 blanca (B1), F2000 con aditivo (B2) y tipo 5/15 que se nombró como (C1). El aditivo utilizado en las cales, es reserva del fabricante.

Aditivo superplastificante

Con el fin de ser lo más realista posible, y hacer que la mezcla sea similar a la que sería utilizada en obra, se ha dispuesto utilizar un aditivo superplastificante con una proporción de 1% sobre el peso del cemento en todas las mezclas. Se ha utilizado el aditivo Protechniflow 11 suministrado por la empresa mc-Bauchemie.

3.2.2. Dosificaciones

En esta campaña experimental, se han estudiado tres porcentajes de adición (1%, 4%, 7%), y tres relaciones a/c (0.35, 0.45, 0.6), dando como resultado 9 dosificaciones diferentes, para cada uno de los cinco tipos de cal. La nomenclatura utilizada para estas dosificaciones posee tres términos, el primero, identifica el tipo de cal (TC) este será (A) para las cales tipo 5/15 y (B) para las cales F2000, el segundo término indica la relación (a/c) y el tercero el porcentaje de adición utilizado (%A). Las dosificaciones utilizadas, definidas en kg/m^3 , se presentan en la tabla 3.1. . Para el cálculo del agua necesaria, fue tomada en cuenta la cantidad estequiometría que requiere la cal para hidratarse completamente, la cual fue adicionada a la cantidad requerida por trabajabilidad.

Nombre	Cemento (kg/m ³)	Cal (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
TC - 35/1	1469,0	14,7	508,6	14,7
TC - 35/4	1429,6	57,2	508,7	14,3
TC - 35/7	1392,3	97,5	508,9	13,9
TC - 45/1	1280,8	12,8	571,5	12,8
TC - 45/4	1250,8	50,0	570,2	12,5
TC - 45/7	1222,2	85,6	568,9	12,2
TC - 60/1	1074,4	10,7	640,6	10,7
TC - 60/4	1053,2	42,1	638,1	10,5
TC - 60/7	1032,8	72,3	635,7	10,3

Tabla 3.1 Dosificación de pastas

3.3. FASE 1: AJUSTE DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Con el fin de evaluar la influencia de adiciones de CaO en las diferentes etapas de fabricación del hormigón, se ha considerado trabajar inicialmente con pastas. Esto apoyado en la relación que existe entre los resultados que se dan entre estas y los que se podrían obtener en los hormigones. En esta etapa se evaluaron los diferentes ensayos disponibles, con el fin de buscar una repetitividad y reproducibilidad de los mismos y así garantizar su validez. Además de buscar la obtención de resultados acordes con el comportamiento esperado del material.

Lo que se pretende con estos ensayos, es determinar la cinética de reacción más idónea desde el punto de vista del comportamiento de las mezclas cementicias. Para esto se consideraron cinco tipos de cal con diferentes cinéticas, unas rápidas (un 80% de la reacción se completa hasta en 2 horas en el ensayo de la reactividad realizado con agua y CaO) y unas más lentas (un 80% de la reacción se completa en hasta en cuatro horas). Así mismo se estudió la interacción entre los procesos de hidratación del CaO y la pasta de cemento. Para lograr caracterizar esta cinética de reacción se buscó estudiar la calorimetría del proceso, y la expansión generada mediante los ensayos que se describen a continuación

3.3.1. Medición de expansión de cales por medio del aparato de Lambe

El aparato de lambe tiene por objeto, determinar mediante un ensayo rápido (algunas horas) la susceptibilidad de un material a la expansión o retracción. Este ensayo, se utiliza generalmente para estudiar suelos con potencial expansivo, pero en este caso se buscó adaptarlo, para medir la expansión de la cal proporcionada. El aparato está compuesto de, un marco de reacción, un anillo portaprobeta, un anillo guía y una placa superior porosa. Además el aparato posee un anillo de carga que permite el medir la carga generada durante la hidratación de la muestra. Una vez compactada la muestra y ensamblado el aparato, se inunda la muestra. La presión que actúa sobre ella al cabo de dos horas se designa con el nombre "índice de expansividad" que nos da, cualitativamente, una idea de lo peligroso que es el suelo, según una serie de ábacos publicados por Lambe. Este ensayo tiene la ventaja de ser rápido y de técnica muy sencilla.

Adaptación del montaje

En este caso se ha utilizado el aparato de Lambe para medir la expansión de una pasta de cal. Para esto se cambió el anillo de carga por un sensor de desplazamiento LVDT posicionado sobre la placa superior. Este se encarga de medir el desplazamiento en mm de la muestra en sentido vertical ya que lateralmente se encuentra confinada por el anillo portaprobeta. Con este instrumento se toma una medida inicial para definir el espesor de la muestra, y a partir de ahí se toman medidas cada 2 segundos, hasta encontrar un punto de estabilización de la expansión. El tiempo que toma la muestra en estabilizarse podría variar entre 1 y 5 horas dependiendo del tipo de cal utilizada. La muestra de cal se debe preparar previamente prensándola con una fuerza de 50 kg, directamente dentro del anillo portaprobeta, esto con el fin de intentar unificar, el espesor de la muestra y la configuración de la red porosa. La muestra se introduce en el aparato cubierta por un papel filtro, con el fin de impedir el paso de la muestra través de los agujeros de la placa superior

Una vez realizado el montaje se comienza a inundar la muestra, adicionando agua dentro del anillo exterior del aparato de lambe. El agua ingresa a la muestra de cal por los agujeros existentes en la parte inferior del anillo portaprobeta, dando lugar al inicio de la reacción expansiva. Para hacer más completo el montaje, se introdujo un termopar dentro de la muestra, otro en el agua que la inunda y un tercero en un recipiente exterior, el cual servía como referencia de la temperatura del agua. Todos estos conectados a un sistema de adquisición de datos para termopares tipo k, el cual tomaba datos con la misma frecuencia que lo hacía el LVDT, con esto se pretendía comparar los datos de calorimetría de la cal durante el proceso, con los datos de expansión. En la figura 3.1 se ilustra el montaje del aparato de lambe.

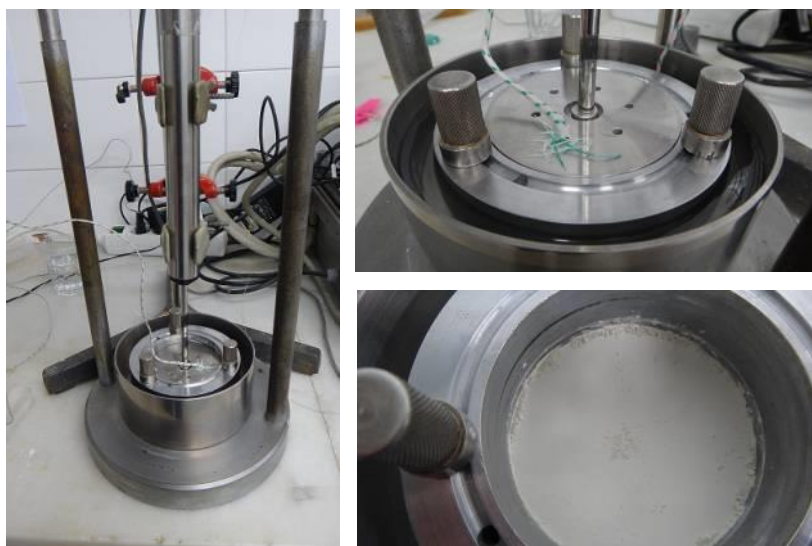


Figura 3.1 Montaje basado en el aparato de lambe para medición de expansión

Resultados obtenidos

En las figuras 3.2 y 3.3, se presentan los resultados obtenidos para dos de los tipos de cales estudiadas, la cal 5/15 blanca y la cal F2000 blanca. Los ensayos se realizaron por triplicado buscando definir la repetitividad del procedimiento obteniéndose los siguientes resultados.

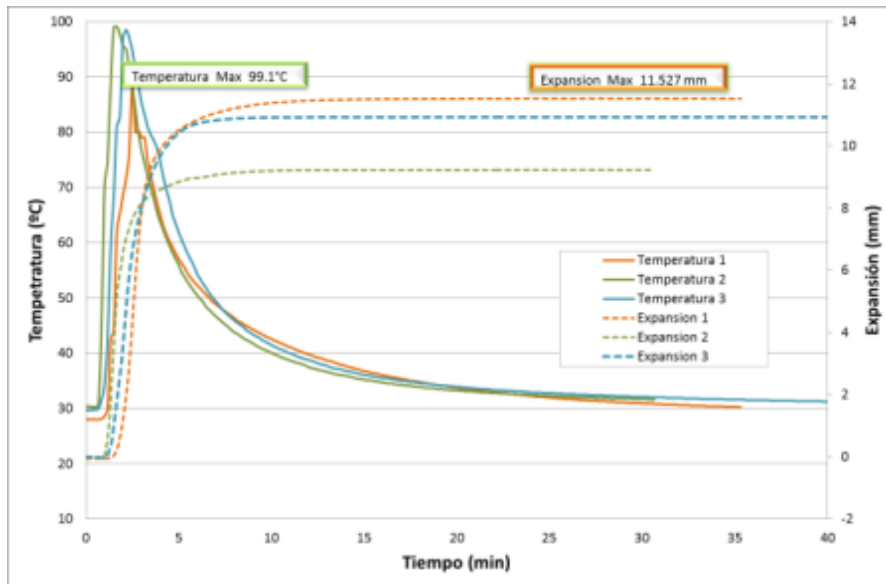


Figura 3.2 Comparativo de resultados para la cal tipo 5/15 blanca

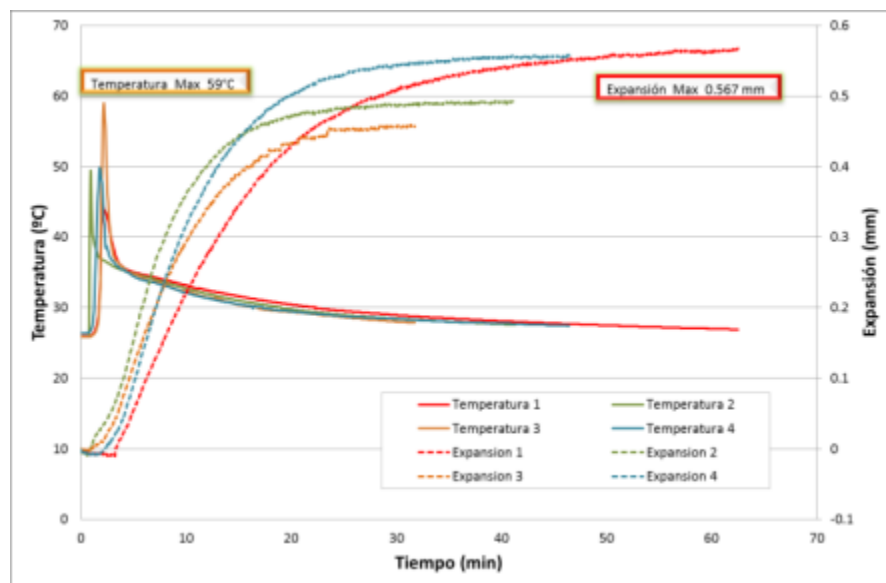


Figura 3.3 Comparativo de resultados para la cal tipo F2000 blanca

Se observa que no ha sido posible lograr que el ensayo sea repetible es decir que no se ha encontrado una proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo las mismas condiciones de medición. Estas condiciones incluyen: el mismo procedimiento de medición, el mismo observador, el mismo instrumento de medición, utilizado bajo las mismas condiciones, el mismo lugar, repetición en un periodo corto de tiempo. Sin embargo, estas pruebas se pueden usar dentro de este estudio para evaluar a grandes rasgos una tendencia de expansión y de calorimetría. Ya que estos resultados no son estrictamente concluyentes, se tomó la decisión de desestimar el ensayo.

Inconvenientes y causas de dispersión

- Preparación de la muestra:

En los materiales expansivos, el hinchamiento que experimentan al humedecerse, depende enormemente de las condiciones de compactación. Cuanto más compactado esté el material, mayor es la posibilidad de que se hinche. Por lo tanto la expansión del material depende de que la fuerza que se aplique para compactarlo, sea inferior o superior a la presión de hinchamiento. Para este caso se desconocen las características del material, por lo que la fuerza de compactación fue escogida de forma arbitraria. Adicionalmente, con el fin de unificar las muestras se le aplicó la misma fuerza a todas las muestras. Pero debido a que el tamaño de partícula podría no ser el mismo en todas las cales, no es posible garantizar que la compactación sea la misma en todas las muestras.

Por otro lado, en algunas ocasiones al ingresar la cantidad de agua establecida en el aparato, esta atravesó de manera casi inmediata la muestra, y comenzó a salir por la placa superior, esto debido a que la distribución de la red porosa es diferente en cada muestra dependiendo en gran medida de la compactación previa, por lo que en algunas ocasiones el ingreso de agua puede ser más lento que en otras. Adicionalmente, debido a que el prensado debe realizarse directamente sobre el anillo portaprobeta es posible que parte de la muestra obstruya la entrada de agua

- Condiciones de laboratorio

El espacio en el cual se desarrollaron los ensayos no posee condiciones climáticas controladas, por lo que una pequeña variación en estas influye en la temperatura de los materiales utilizados (agua y cal) y en las medidas de temperatura obtenidas durante el ensayo. Además al ser la cal un material tan reactivo, una humedad muy alta en el sitio de trabajo podría comenzar el proceso de hidratación de la muestra durante su preparación. Adicionalmente se debe tener en cuenta instalar el montaje en un espacio sin movimientos ni vibraciones que puedan hacer variar las lecturas del sensor LVDT.

En términos generales este ensayo maneja varias variables, como compactación de la muestra, tamaño de partícula, humedad y temperatura del material, configuración de la red porosa, condiciones ambientales y temperatura del agua. Estas variables no han podido ser controladas en este ensayo por lo que no se considera un ensayo repetible

3.3.2. Calorimetría

Por medio del ensayo de calorimetría se busca establecer el incremento de calor de la pasta de cemento en el proceso de hidratación inicial. Esto se realizó para cada tipo de adición de cal. El ensayo se realizó con dos tipos de curado diferentes abierto y con condiciones ambientales de 52% HR y 33° C.

Adaptación del montaje

Este ensayo se realiza mediante un procedimiento propio, el montaje consiste en obtener una muestra de pasta de cemento para llenar un molde plástico cilíndrico de 40 c.c. Este molde se coloca dentro de otro molde de porexpan que contiene perfectamente cada vasito para garantizar un máximo aislamiento del medio ambiente. Con esto se pretende obtener un proceso semi-adiabático, es decir, que el sistema no intercambie calor con su entorno. Una vez realizada la mezcla a mano de los materiales, se vierte en los recipientes y se introduce en ella, un termopar que transmite el valor de la temperatura cada minuto al sistema de adquisición de datos tipo PCE T-395, el cual posee una precisión del 0.2%, de donde posteriormente se obtendrán los gráficos correspondientes. Adicionalmente, se recogen datos de la temperatura ambiente para así determinar la variación de temperatura de la mezcla respecto a esta. En la figura 3.4 se presenta el primer montaje realizado.



Figura 3.4 Montaje 1 de ensayo de calorimetría

Inicialmente se realizó el ensayo con condiciones de curado al aire, cubriéndolo solamente con plástico para minimizar la influencia de la temperatura del entorno. Posteriormente se repitió el ensayo dentro de la cámara climática, en la cual se controlan las condiciones de humedad y temperatura (52% HR y 33° C)

Resultados obtenidos

El primer ensayo se realizó con condiciones de secado al aire para las 4 primeras cales estudiadas, 5/15 blanca, 5/15 con aditivo, F2000 blanca, y F2000 con aditivo. Tomando datos de temperatura de la mezcla cada minuto durante 4 días, las dosificaciones utilizadas son las descritas en el apartado 3.2.2. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.5

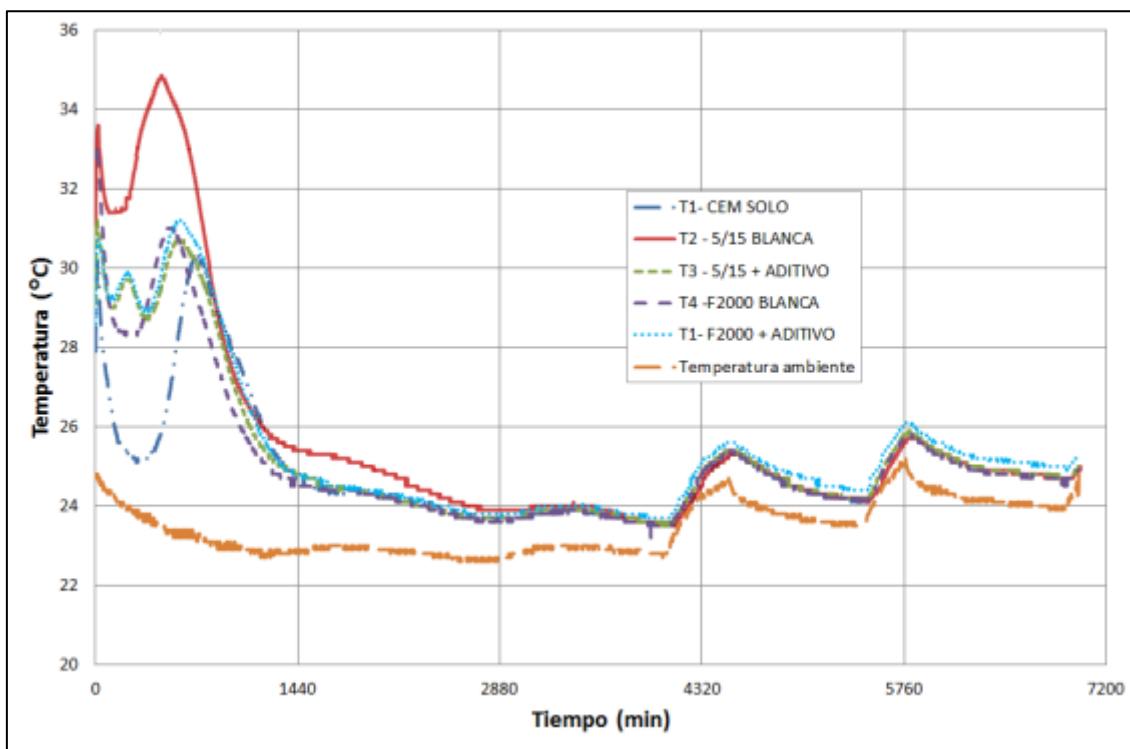


Figura 3.5 Resultados ensayo de calorimetría con secado al aire

Se observa, la gran influencia que tiene la temperatura ambiente en el ensayo, pues se puede ver como a partir del día 2 las curvas se mueven con la misma tendencia que la temperatura ambiente. Se registran picos más altos a partir del día 3 ya que a partir de ese día se registró un aumento en el ingreso de personal al recinto donde se lleva a cabo el ensayo, por ser un día hábil. A pesar de esta influencia, se pueden encontrar tendencias coherentes en los resultados. Se observa como las pastas con cales blancas y la pasta realizada solo con cemento, tienen el mismo comportamiento. Por su lado las cales con aditivo también se comportan similarmente entre sí lo que muestra que el ensayo es correcto.

Sin embargo Luego de realizar el ensayo con condiciones de secado al aire, se procedió a realizar el ensayo con condiciones ambientales controladas (52% HR y 33° C), para las cuatro cales estudiadas. En este caso el montaje fue introducido en la cámara climática, situada en el laboratorio de materiales y control de calidad de la escuela politécnica superior de edificación de Barcelona (EPSEB). Se tomaron datos cada minuto durante 5 días, las dosificaciones utilizadas son las descritas en el apartado 3.2.2. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.6

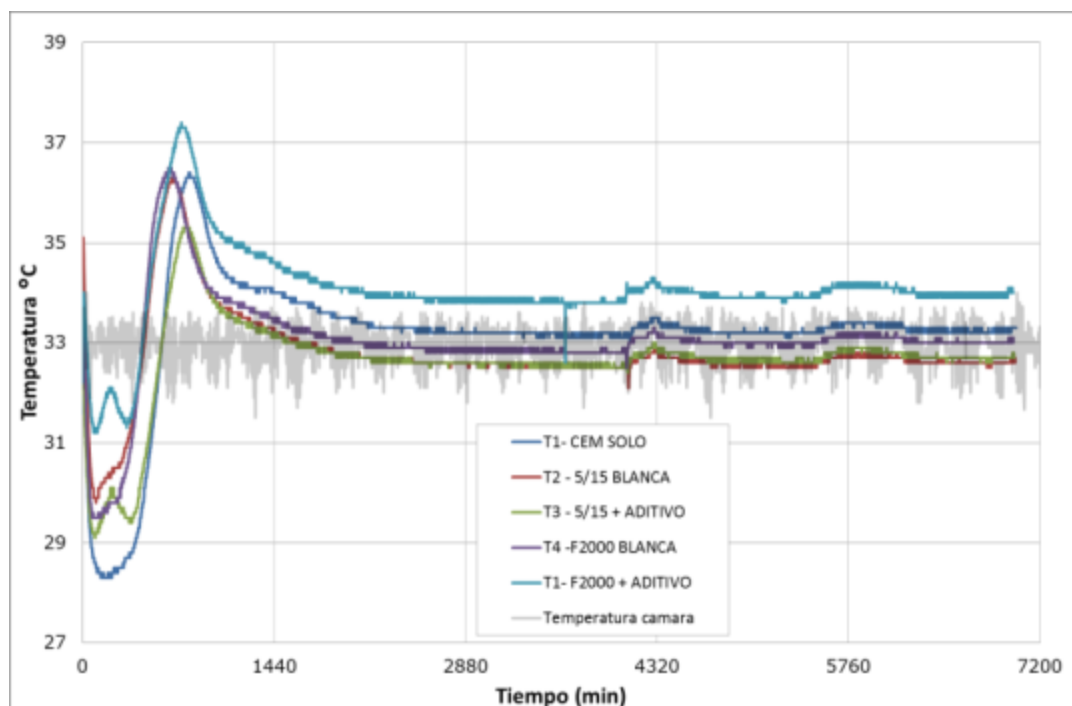


Figura 3.6 Resultados ensayo de calorimetría secado en cámara climática

En este caso, igual que en el anterior, se presenta una coherencia entre sí entre los resultados de pastas con cales blancas, igual que entre pastas con cales con aditivo. Sin embargo se observa que las diferentes muestras no se estabilizan en la misma temperatura, lo que puede hacer pensar en un error en la temperatura transmitida por el termopar, o en un error en los datos entregados por el sistema de adquisición de datos.

Inconvenientes y causas de dispersión

- Condiciones del laboratorio

En el caso de la calorimetría con secado al aire, se ha visto como las condiciones de temperatura del ensayo influyen en gran medida en los resultados del ensayo. Para el caso del ensayo realizado con cámara climática se encontró, que no es posible mantener exactamente constantes las condiciones de temperatura y humedad.

- Preparación de la muestra

Cada muestra ha sido realizada individualmente, lo que supone la manipulación del montaje con cada una de ellas. Es decir que se tuvo que destapar o abrir la cámara al menos cuatro veces, condición que puede inducir errores debido a la alta sensibilidad a las condiciones ambientales.

- Aparatos de medición

Las temperaturas de inicio y final marcadas en el sistema de adquisición de datos deberían ser iguales. Pero en este caso estas mediciones varían de un termopar a otro, por lo que hace imposible realizar una correlación entre los diferentes resultados.

Cambio de montaje

Analizando los resultados encontrados en el primer montaje se procedió a rediseñarlo. Esta vez, se buscó que el montaje fuera realmente semi-adiabático, procurando disminuir al máximo la influencia de las condiciones ambientales. Por esto se adicionó una cubierta de porexpan, y sobre ella se colocó una tabla de madera para así poder instalar un sargento a cada lado y lograr mantener completamente cerrado el sistema. Adicionalmente se cambió el sistema de adquisición de datos por uno más confiable, el Squirrel SQ2020, el cual tiene una precisión de 0.05%, contra el 0.2% de precisión que ofrecía el termómetro datalogger PCA T-395. En la figura 3.7 se muestra el montaje realizado para la medición de la calorimetría de forma semi-adiabática y el sistema de adquisición de datos utilizado.

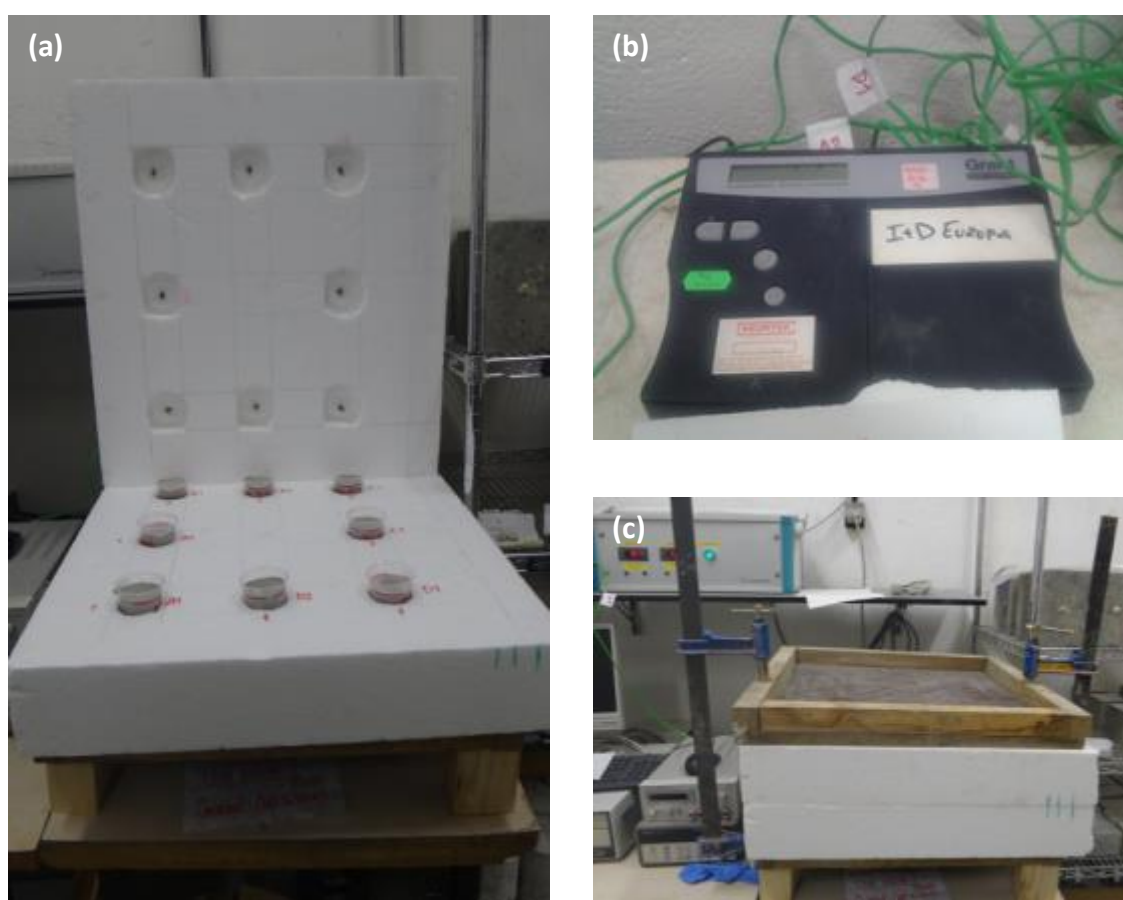


Figura 3.7 (a) Montaje 2 ensayo de calorimetría, (b) sistema adquisición de datos, (c) montaje cerrado

Resultados obtenidos

Este ensayo se realizó, utilizando la misma dosificación y el mismo tipo de cal en cuatro recipientes diferentes, con el fin de tener 4 resultados sobre el mismo material y así definir la repetitividad del proceso. Se tomaron datos cada 30 segundos, durante 2 días, los resultados obtenidos se presentan en la figura 3.8.

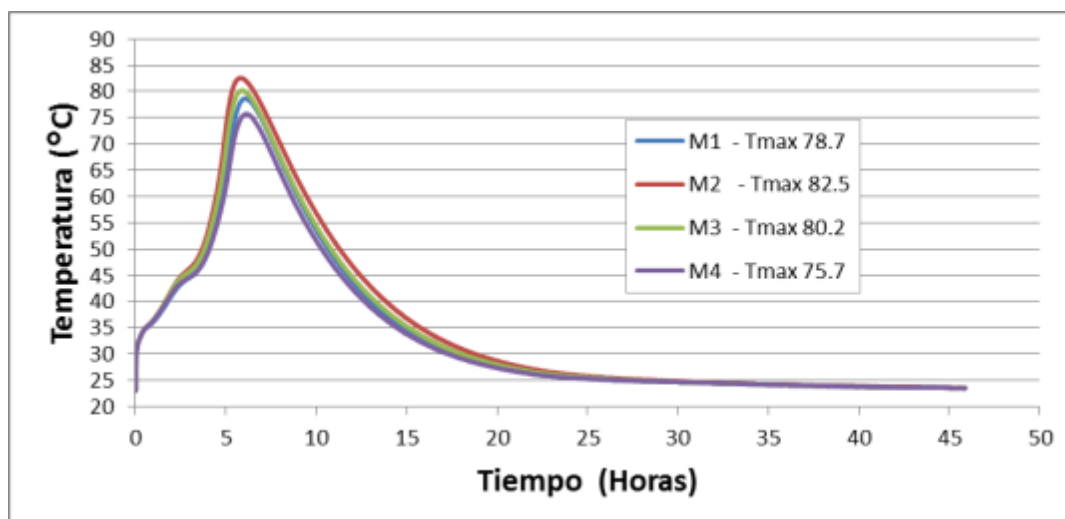


Figura 3.8 Resultados pruebas montaje 2 calorimetría.

Como se puede observar en la figura 3.8, el ensayo es repetible, pues aunque la variación entre los resultados en el punto máximo es de 3.8%, estos resultados son coherentes con lo esperado y bastante cercanos entre sí. Por este motivo lo que se aceptó utilizar este montaje para definir la calorimetría de todas las muestras. La descripción detallada del proceso se dará durante el desarrollo de la fase 2, fase donde se realizaron las pruebas sobre las cinco cales y con las 6 dosificaciones definidas.

3.3.3. Medición de expansión mediante el uso de probetas prismáticas

La metodología para la determinación de la retracción de secado en pastas está especificada en la Normas UNE 80113-2013 y consiste, básicamente, en la confección de probetas de mortero de dimensiones especiales (25x25x287 mm), con unos pernos calibradores insertados, que permiten realizar las medidas de longitud en un comparador de longitudes a lo largo del proceso de curado. Como este método se encuentra normalizado, se puede garantizar su repetitividad en cuanto al montaje, sin embargo se realizaron varias pruebas, para poner a punto el sistema de medición, y la habilidad del operador en el proceso de amasado y conformación de las probetas.

En la figura 3.9 se presentan el molde y el comparador de longitud utilizado para realizar los ensayos de puesta a punto del método. Se observa cómo cada molde tiene la posibilidad de fabricar 3 probetas simultáneamente para así corroborar las mediciones obtenidas. Las muestras fueron mantenidas en cámara húmeda durante todo el proceso.

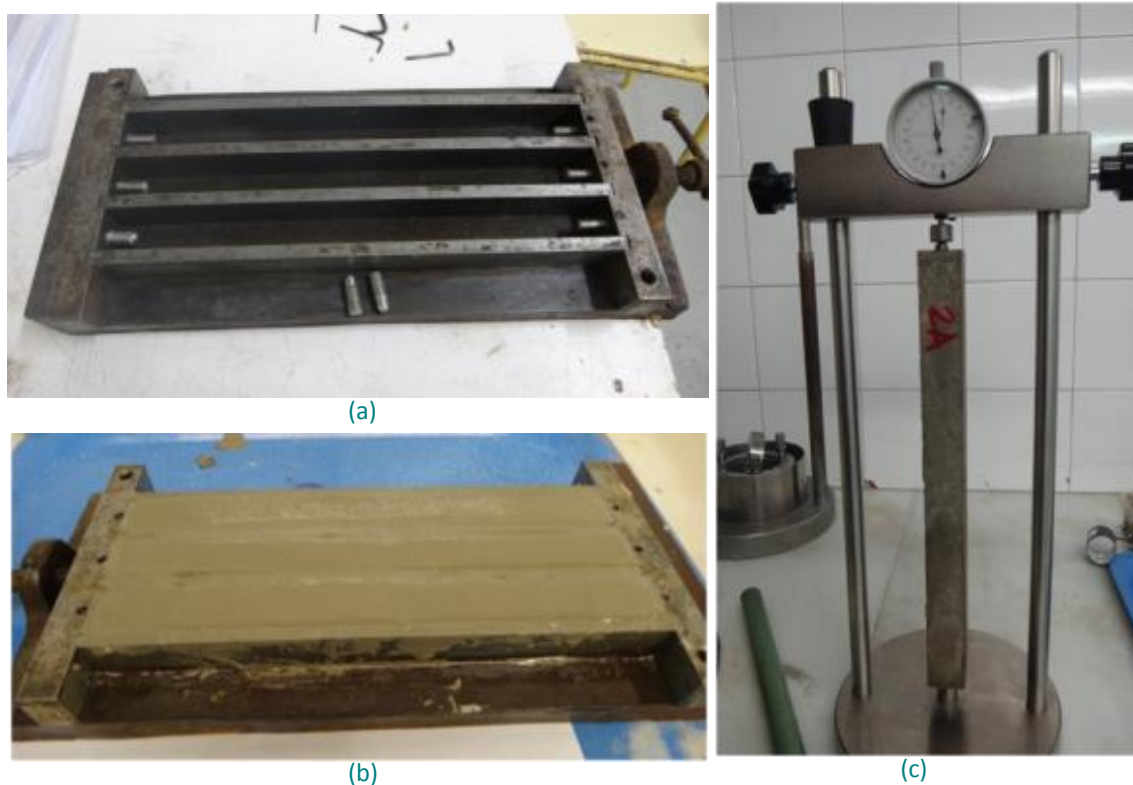


Figura 3.9 Molde y pernos utilizados (b) conformación de probetas, (c) comparador analógico de longitud.

Resultados obtenidos

Se realizaron dos pruebas iniciales para un tipo aleatorio de cal, en el primer caso se tomó el segundo dato en el día 4, dado que el día 2 y 3 no eran hábiles. En el segundo caso los datos omitidos fueron los correspondientes a los días 4 y 5. En el grafico 3.10 se presentan los resultados obtenidos.

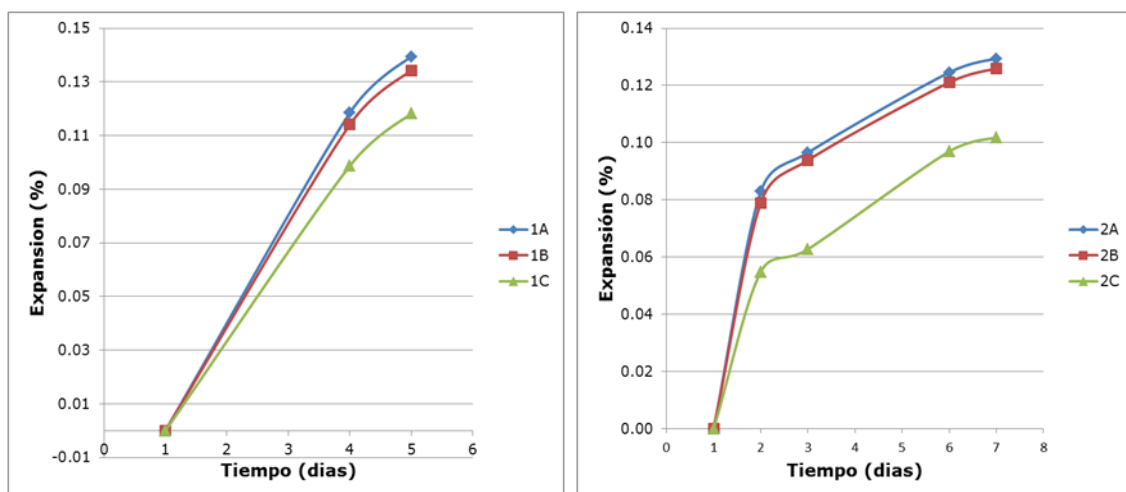


Figura 3.10 Resultados ensayo de expansión en probetas prismáticas

Se observa que en ambos casos se obtienen valores de expansión cercanos para cada grupo de probetas de un mismo ensayo. Además se encuentra coherencia entre los dos ensayos para el mismo tipo de cal. Sin embargo se evidencia la necesidad de hacer mediciones cada día, principalmente a edades tempranas, pues de lo contrario podría perderse información valiosa sobre el comportamiento del material en estas edades. Con esta prueba, se ha comprobado la viabilidad de utilización del método, por lo cual se adoptó como método principal para el desarrollo de esta tesis. Ya que de esta forma se puede caracterizar perfectamente el potencial expansivo de cada una de las cales suministradas por el fabricante.

Inconvenientes y causas de dispersión

- Preparación de probetas

Debido a la consistencia líquida de las pastas, fue necesario recubrir la parte exterior del molde con silicona para evitar la pérdida de material. El uso de este material, hizo más complicado la labor de desmolde de las probetas, por lo que en ocasiones estas se partían. Esta dificultad se vio acentuada en las mezclas con a/c 0.60, debido a que su resistencia a las 24 horas era la suficiente para soportar ningún tipo de esfuerzo.

- Toma de medida de las muestras

A pesar de haber encontrado gran repetividad en el montaje, se observa que la tercera medida de cada ensayo en ambos casos presenta una expansión más baja. Esto pudo darse porque las muestras fueron sacadas al mismo tiempo de la cámara húmeda, por lo cual al hacer la última medición esta ya había comenzado a perder agua y se encontraba en condiciones diferentes a las dos anteriores. Adicionalmente, una gran limitación del ensayo es que durante las primeras 24 horas no es posible realizar mediciones, sin embargo es primordial tomar medidas cada día durante los primeros 5-7 días, con el fin de tener la mayor información posible acerca del proceso expansivo.

3.4. FASE 2: CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.4.1. Ensayo de calorimetría

Analizados y corregidos los inconvenientes presentados con el montaje en la fase 1, se procede a realizar las pruebas para las 5 cales suministradas por el fabricante, este caso cada ensayo se hará por duplicado con el fin de asegurar la confiabilidad de los resultados. El ensayo ha sido realizado dentro de la cámara climática del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló.

Equipos utilizados

Debido a un fallo técnico del equipo de medición utilizado en la fase 1, fue necesario adoptar un nuevo sistema de adquisición de datos, esa vez se utilizó un aparato tipo HP 34970A, con características similares. En la figura 3.11 se muestra el nuevo sistema utilizado.



Figura 3.11 Sistema de adquisición de datos

Preparación de la mezcla

En cada sesión de ensayo se prepararon 4 mezclas, cada una con una dosificación diferente. Cada mezcla se dividió en dos recipientes, para así obtener dos mediciones por cada dosificación, teniendo especial cuidado en verter la misma cantidad de material en cada uno. El mezclado se realizó de forma manual, mezclando inicialmente el cemento y la cal durante 30 segundos, luego se le adiciona a la mezcla el agua previamente mezclada con el aditivo plastificante y se revuelve durante 60 segundos más.

Procedimiento de ensayo

- Se pesan todos los materiales necesarios en una sesión de ensayo y se mantienen en recipientes estancos. Estos materiales se encuentran almacenados en la misma cámara climática en la que se realiza el ensayo la cual tiene condiciones de temperatura y humedad controladas.
- Se mezclan los materiales según el procedimiento descrito en el apartado anterior.
- Se vierte la mezcla en los recipientes buscando tener el mismo peso en cada par de la misma dosificación, y se anota el peso.
- Una vez se tienen listos los recipientes con la mezcla, se ponen dentro del calorímetro, y se introduce un termopar tipo K en cada mezcla. Seguidamente, se cierra la tapa del calorímetro, la cual se abrirá solo para ingresar las demás muestras. Es importante anotar que el sistema de adquisición de datos empezara a grabar desde antes de introducir la primera mezcla. Luego en los resultados se encontrara el tiempo cero de cada mezcla analizando el punto en el cual la temperatura aumenta bruscamente.
- Una vez se han preparado todas las mezclas, se pone sobre el calorímetro una tapa de madera y se instala un sargento a cada lado del aparato.
- Pasados dos días, se desmonta el ensayo cortando las puntas que han quedado embebidas en las muestras y se recogen los datos grabados.
- Las muestras se almacenan en la cámara climática, para posteriores análisis.

3.4.2. Ensayo de expansión con probetas prismáticas

Analizados y corregidos los inconvenientes presentados con el montaje en la fase 1, se procede a realizar las pruebas para las 5 cales suministradas por el fabricante, se realizó un ensayo para cada una de las 45 mezclas (9 por cada tipo de cal). A continuación se detalla el procedimiento de ensayo y los equipos utilizados.

Equipos utilizados

Para la preparación de las mezclas se utilizó una mezcladora automática de mortero, la cual se muestra en la figura 3.12. Para la medición de las probetas en la etapa inicial, se contaba con un comparador de longitudes análogo, pero, ya que en la fase 1 se evidencio la necesidad de realizar mediciones incluso en días no hábiles, fue necesario cambiar de laboratorio. Esto implicó una variación en el equipo comparador de longitudes utilizado. El nuevo equipo disponible es un comparador sylvac S 229 digital, lo cual resulta benéfico, pues el hecho que sea digital implica que las medidas serán más precisas y confiables. Esto elimina la variable que implica la familiarización con el lector. En la figura 3.13 se presenta el equipo utilizado.



Figura 3.12 Mezcladora automática de morteros

Los moldes prismáticos utilizados para la fabricación de las probetas, son los descritos en la fase 1. Estos debidamente preparados con silicona en la parte exterior para impedir la pérdida de material, debido a su alta fluidez. Adicionalmente se debe cuidar que los pernos se encuentren perfectamente fijos, para que se mantengan centrados en la muestra durante el fraguado.



Figura 3.13 comparador de longitud utilizado en el ensayo de expansión

Preparación de la muestra

La muestra se mezcla mecánicamente, en una mezcladora automática de morteros, inicialmente se mezclan manualmente los materiales secos (cal y cemento) durante 30 segundos. Posteriormente se añade el agua mezclada previamente con el aditivo plastificante y se enciende la mezcladora durante 1 minuto a velocidad lenta. Se detiene la máquina, se verifica que no haya material pegado en el fondo con la ayuda de una espátula. Finalmente se enciende nuevamente la mezcladora durante dos minutos más. Una vez mezclada la muestra, se vierte en los moldes prismáticos. El llenado de los moldes se hace en dos capas aproximadamente iguales. Se presiona la pasta con los dedos pulgares o índice para obtener un llenado lo más perfecto posible, y cuidando de obtener una perfecta compactación. Se debe asegurar que no queden huecos, especialmente en las aristas, así como alrededor de los pernos. La cara superior se enrasa con una espátula.

Condiciones de curado y almacenamiento

Una vez preparadas las muestras se almacenan en cámara húmeda, la cual posee condiciones controladas de temperatura y humedad. Adicionalmente esta cámara cuenta con un sistema de rociadores, que mantienen completamente húmeda la muestra en todo momento. Trascorridas 24 horas se desmoldan las probetas y se almacenan nuevamente en la cámara. Las muestras solo serán retiradas de la cámara para hacer las mediciones diarias correspondientes. En la figura 3.14 se presenta la cámara húmeda del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló.



Figura 3.14 Almacenamiento en cámara húmeda

Medición

Para realizar las mediciones de longitud, se saca de la cámara húmeda, cada grupo de 3 muestras, correspondientes a una dosificación. Con el fin de evitar las pérdidas de humedad entre la primera y la tercera medida, se transportan dentro de un recipiente plástico y cerrado. Se saca, cada muestra del recipiente, se toma la medida entre los extremos de los pernos con el comparador de longitud, y se guardan nuevamente en el recipiente plástico, para ser trasladadas de regreso a la cámara húmeda. Este proceso se repite cada día para cada una de las 45 dosificaciones durante los primeros 7 días, a partir del día 8 se toman medidas cada 2 o 3 días, hasta que la muestra se estabilice.

CAPITULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha presentado campaña experimental, en donde se han expuesto detalladamente los ensayos que se han llevado a cabo a lo largo de este proyecto. El fin de esta campaña es lograr definir claramente la cinética de reacción de cada una de las cales entregadas por el fabricante.

Este capítulo tiene como objetivo, presentar y analizar los resultados obtenidos durante la campaña experimental. Inicialmente se presentaran los resultados de las pruebas de expansión y calorimetría realizados sobre pastas de cemento. Estudiado la influencia de la relación a/c y del contenido de adición en el % de expansión alcanzado y en la temperatura alcanzada durante la hidratación de cada una de las muestras.

Luego de analizar cada adición de cal por separado se hará una comparación entre los diferentes tipos de cal. Para finalmente hacer una correlación entre los dos ensayos realizados, buscando un parámetro que permita comprender a fondo el comportamiento de las adiciones dentro de la mezcla de cemento, y corroborar los resultados esperados.

4.2. RESULTADOS DE ENSAYOS DE CALORIMETRÍA

4.2.1. Curva típica de evolución de temperatura en pasta

Las curvas de evolución de temperatura, obtenidas para las diferentes dosificaciones en estudio difieren significativamente unas de otras. Esto en función del tipo y porcentaje de adición utilizado y de la relación a/c de cada una de las mezclas. Diferencias que serán analizadas posteriormente. En primer lugar se presenta la forma general esperada de las curvas y las zonas que quedan determinadas.

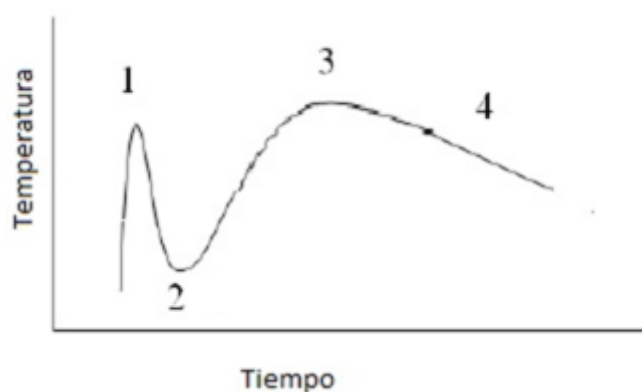


Figura 4.1 Curva típica de evolución de temperatura para las pastas de cemento

Los fenómenos químicos que se presentan durante el proceso de hidratación y endurecimiento de las pastas pueden agruparse en cuatro fases.

- Fase 1: Se presenta la primera hidratación superficial de los granos de cemento inmediatamente después de la adición del agua de amasado y comienza la disolución de los aluminatos y la formación superficial de etringita sobre las fases de C3A, esta primera fase tiene una duración de breves minutos.
- Fase 2: Se observa una significativa reducción en la velocidad de los procesos de hidratación. Ello es debido a la formación de una membrana alrededor de las partículas en hidratación que restringe el contacto de éstas con el agua exterior el agua sulfatada migra lentamente a través de la etringita que recubre la fase de C3A. En esta fase, es cuando el cemento permanece trabajable y puede durar de hora a hora y media, según la naturaleza de los componentes. A esta fase se le ha llamado periodo de inducción o durmiente. A medida que la concentración de los compuestos aumenta, termina el período durmiente, comenzando a formarse los primeros hidratos y como consecuencia la microestructura.
- Fase 3: Etapa de hidratación del cemento o inicio de fraguado, en cual aumentan las resistencias de la mezcla; los granos de cemento reaccionan desde la superficie hacia el interior y la parte anhidra de las partículas va reduciéndose. Al continuar la hidratación del C3S y del C3A, aumentando la concentración de sulfatos y aluminatos,

se produce un pico de calor en la mezcla. El cual tiene su máximo al final de esta etapa, momento que corresponde al final de fraguado. Esta etapa puede durar, en condiciones normales, unas 4-6 horas.

- Fase 4: En esta etapa, los productos de hidratación forman una densa corteza alrededor de las partículas originales, que actúa como una barrera para la difusión de iones, disminuyendo la velocidad de reacción. De esta manera, el proceso de hidratación es controlado por la velocidad de difusión de iones a través de los productos de hidratación. Se presenta la hidratación de las fases de silicatos y adquisición de resistencias mecánicas. Esta fase empieza al término de la hidratación del C3A ya que este colabora en la hidratación de los silicatos. En esta etapa el calor de hidratación disminuye proporcionalmente

A continuación, en la Figura 4.2 se presentan los resultados del ensayo de calorimetría obtenidos para las muestras patrón. Las cuales han sido fabricadas sin adición de cal. En la figura se identifican claramente los tres picos mencionados. Un primer pico se presenta durante la primera hora, y alcanzan una temperatura entre 4 y 6°C, siendo mayor a mezcla con menor a/c. Luego se observa, un periodo de inducción, cuya duración varia 5 y 6 horas, dependiendo de la relación a/c. finalmente se da un tercer pico de temperatura, el cual marca el final del proceso de fraguado de la mezcla. En este caso este pico se presenta a las 13 h para las mezclas con a/c 0.35 y 4 horas más tarde para las mezclas con a/c 0.60

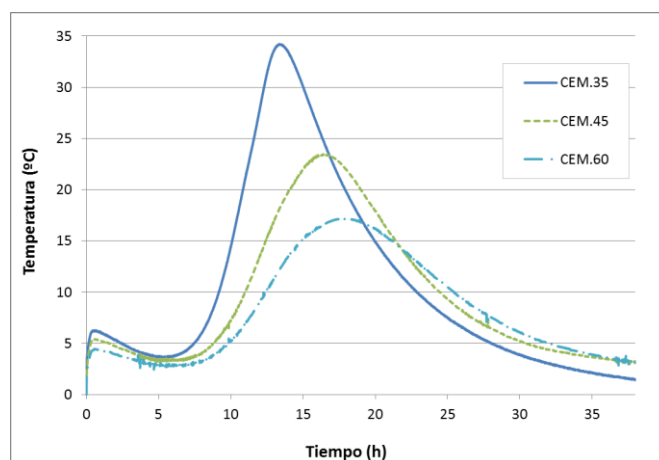


Figura 4.2 Resultados de ensayo de calorimetría para muestra patrón

En la Tabla 4.1, se presenta de forma cuantitativa los valores obtenidos para cada uno de los picos y la duración de la fase de inducción y la fase de fraguado de la mezcla.

	a/c	%CaO	Nombre	t1 (h)	T1 (°C)	t2 (h)	T2 (°C)	t3 (h)	T3 (°C)	t2 - t1	t3 - t2
CEM	0.35	0%	Blanco /0.35	0.54	6.20	5.53	3.65	13.34	34.20	4.99	7.81
	0.45	0%	Blanco /0.45	0.64	5.38	6.42	3.34	16.42	23.47	5.78	10.00
	0.60	0%	Blanco /0.60	0.67	4.40	6.69	2.75	17.65	17.22	6.02	10.96

Tabla 4.1 Resumen de tiempos requeridos para alcanzar cada uno de los picos de temperatura

4.2.2. Resultados para pastas con cales tipo 5/15

Luego de recolectar datos de cada mezcla, cada segundo durante dos días, se han obtenido los resultados que se presentan a continuación. En las figuras se muestra la temperatura alcanzada por la mezcla durante el proceso de hidratación y fraguado. Las temperaturas mostradas son relativas a la temperatura ambiente, es decir que a cada uno de los valores obtenidos se le ha restado dicha temperatura.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presentan de forma general, los resultados obtenidos en el ensayo de calorimetría para las mezclas con adición de cal tipo 5/15 con una proporción de 1%, 4% y 7%, y relación a/c 0.35. En la figura, las curvas se han agrupado por colores de acuerdo al tipo de cal utilizada, con el fin de facilitar su comprensión. La nomenclatura utilizada para estas dosificaciones posee tres términos, el primero, identifica el tipo de cal (TC) este será (A) para las cales tipo 5/15 y (B) para las cales F2000. Este primer término estará acompañado una (R) para las cales que poseen aditivo (recubrimiento), y (RF) para las que tienen aditivo y además son más finas. El segundo término indica la relación a/c y el tercero el porcentaje de adición utilizado (%A).

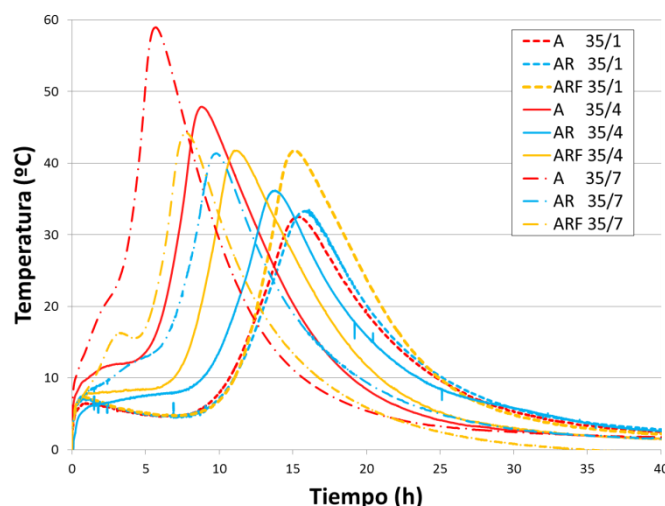


Figura 4.3 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.35 y % de cal variable

Se observa un comportamiento similar al esperado, en el cual se presentan claramente dos picos de temperatura. Un primer pico, asociado con la disolución de los silicatos y formación de etringita, y un pico máximo asociado a la hidratación de los silicatos, además de un periodo de inducción cuya duración varía de acuerdo a la cantidad de adición utilizada. Se observa además, que al aumentar el % de aditivo, aumenta el pico máximo, y disminuye el tiempo necesario para alcanzarlo. Cabe anotar entonces que la mezcla más rápida y con mayor pico máximo en este caso, es la que contiene la cal tipo A con 7% de cal. Además de esto, se observa un pico adicional durante el periodo de inducción en las mezclas fabricadas con cales aditivadas, es decir las mezclas con cal tipo AR y ARF, siendo más evidente este al aumentar el % de adición. Vemos como la adición de cal, influye en el proceso de hidratación del cemento, adelantando la aparición de sus picos máximos.

En la Figura 4.4 y Figura 4.5, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de calorimetría para las mezclas con adición de cal tipo 5/15 con una proporción de 1%, 4% y 7%, y relación a/c 0.45 y 0.60 respectivamente.

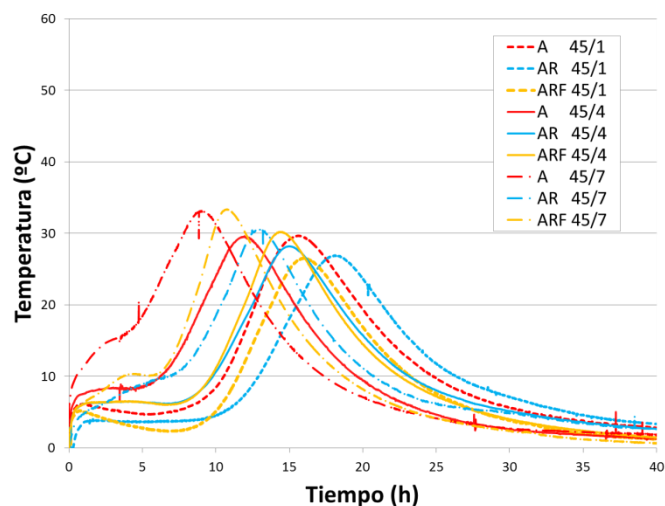


Figura 4.4 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.45 y % de cal variable

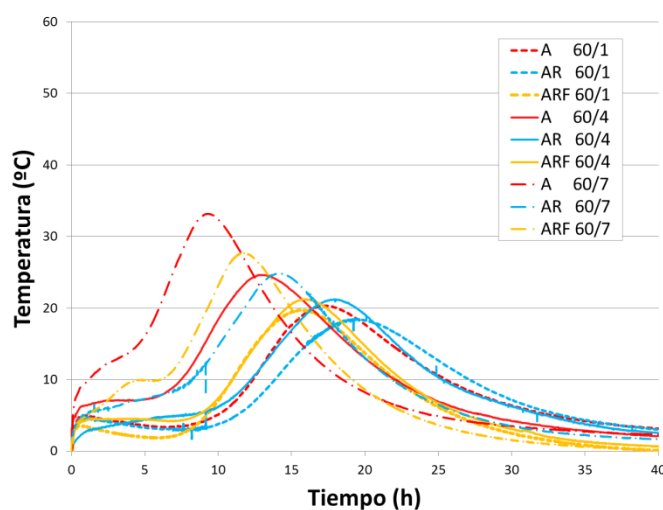


Figura 4.5 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.60 y % de cal variable

En las figuras se observa nuevamente un comportamiento similar al esperado, en el cual se identifican las cuatro etapas principales del proceso de hidratación. Sin embargo al comparar ambos gráficos con el obtenido para las mezclas con a/c 0.35 se observa una disminución en los picos máximos alcanzados por cada una de las muestras, y un menor tiempo necesario para alcanzarlas. A continuación se presenta de forma más detallada cada uno de los picos, se analizara, la temperatura obtenida en cada una de las etapas y el tiempo requerido para alcanzarla.

Análisis pico 3

En la Figura 4.6(a) se analizan los puntos de máxima temperatura para las muestras tipo 5/15 con a/c 0.35. En ella se presentan los tiempos necesarios para alcanzar el pico máximo (t_3) en cada muestra con diferentes % de adición. Para las mezclas con 1% de cal el tiempo necesario para alcanzar el pico máximo es muy cercano para los tres tipos de adición (entre 15 y 16 horas). Al aumentar la cantidad de aditivo este tiempo disminuye pues a mayor concentración de cal, mayor será el calor liberado, lo que aumentara la velocidad de las reacciones. Adicionalmente para los contenidos de 4% y 7% de cal la diferencia entre los diferentes tipos de cal aumenta. Para una concentración del 7% el pico máximo se presenta entre 3 y 10 h, y la diferencia de tiempo entre las muestras se ubica alrededor de las 2 horas. Claramente se observa como para todos los casos la mezcla fabricada con cal tipo A es más rápida. Resultado que concuerda en gran medida con lo esperado, teniendo en cuenta que las cales AR Y ARF, contienen un aditivo que retarda las reacciones.

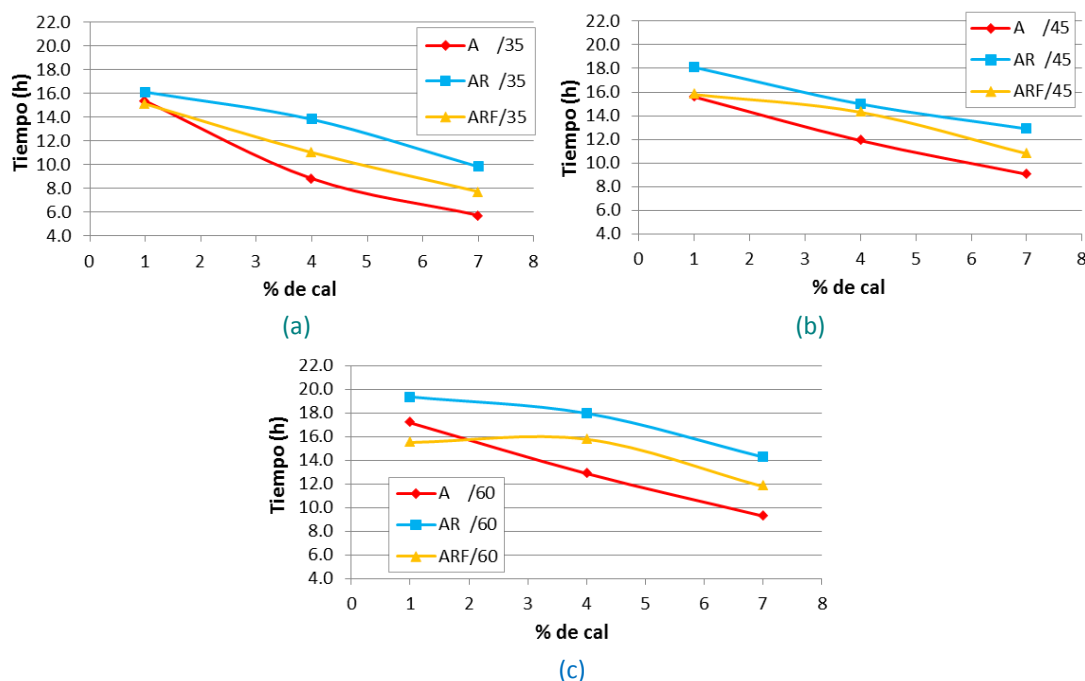


Figura 4.6 Tiempo necesario (t_3) para alcanzar el pico de temperatura máximo (T_3) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.

En las Figura 4.6 (b) y Figura 4.6(c) se analizan los puntos de máxima temperatura para las mezclas con a/c 0.45 y 0.60 respectivamente. Para las mezclas con 1% de cal y a/c 0.45 el tiempo necesario para alcanzar el pico máximo es muy cercano para las cales tipo A y ARF el cual se da alrededor de las 15.5 horas, mientras la mezcla con cal tipo AR alcanza su temperatura máxima 3 horas más tarde. Nuevamente al aumentar la cantidad de aditivo este tiempo disminuye y se sitúa entre 9 y 14 horas para mezclas con 7% de adición y la diferencia de tiempo entre las muestras es de aproximadamente 2 horas. En este caso también puede observarse como para todas las concentraciones de adición, la mezcla fabricada con cal tipo A

es más rápida. Para las mezclas con a/c 0.60 y 1% de cal el tiempo varía entre 15 y 19 horas, presentándose un tiempo menor, solo en este punto para la cal ARF. Nuevamente el tiempo disminuye, al aumentar la concentración de cal, situándose entre. 9 y 14 horas.

Al comparar los tres gráficos anteriores, para las diferentes relaciones a/c, se observa que a medida que esta aumenta, aumenta también el tiempo necesario para obtener la temperatura máxima. Adicionalmente las temperaturas máximas alcanzadas son menores. En la Figura 4.7, se presentan los resultados para temperatura en el punto 3 para mezclas con cal tipo 5/15, con el fin de compararlos con las tendencias de velocidad obtenidas.

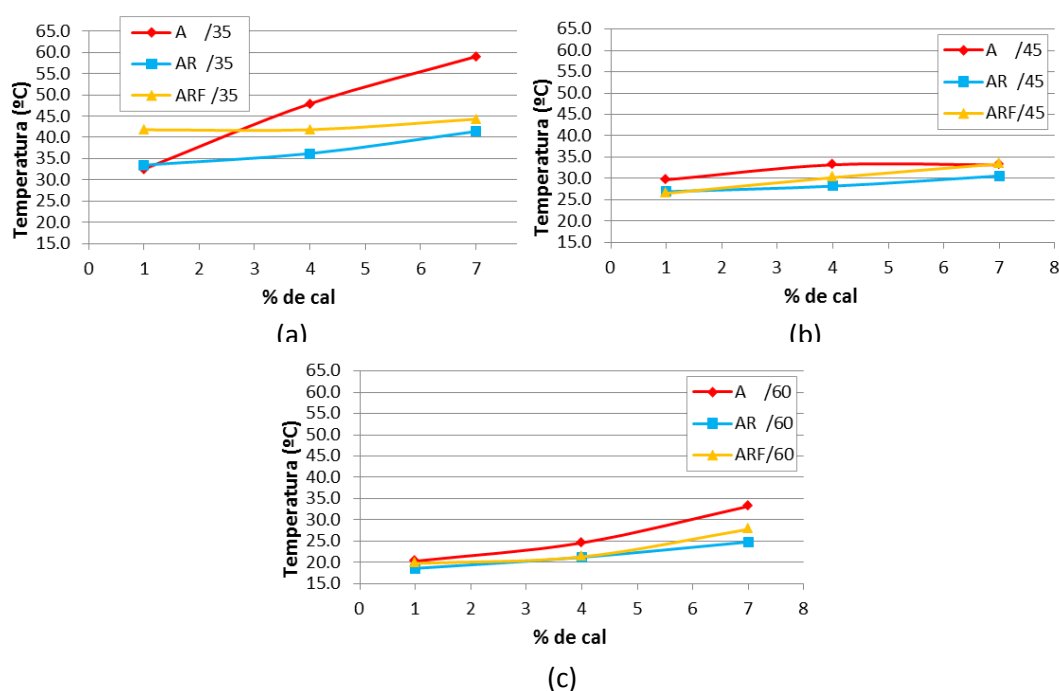


Figura 4.7 Pico de temperatura máxima (T3) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.

En la Figura 4.7 (a), se observa como para las mezclas con relación a/c 0.35 y 1% de cal se presenta una temperatura máxima T3 muy similar para las cales A y AR (entre 32 y 33°C), mientras que la cal ARF, presenta una temperatura 8°C por encima de estas. Cabe recordar que estas cales alcanzan su temperatura máxima T3 en tiempos muy cercanos. A partir de aquí al aumentar la concentración de adición, aumenta la temperatura. Siendo siempre mayor la temperatura alcanzada en la muestra con cal Tipo A con 7 % de adición, la cual en este caso es de 59°C, mientras que la cal AR siendo la más baja, alcanza una temperatura de 41°C para el mismo porcentaje de adición. Estos resultados se muestran bastante consistentes al compararlos con los resultados de tiempo, en donde coincide que la muestra que alcanza más rápidamente la temperatura máxima es la que contiene adición tipo A. por lo tanto se comprueba que a mayor contenido de cal mayor velocidad de reacción y mayor temperatura en su pico máximo T3.

Estos resultados son acordes con el comportamiento esperado, ya que la temperatura es uno de los parámetros que más influencia tienen en el desarrollo de resistencias del hormigón: un incremento de la temperatura hará que la mezcla madure más rápidamente que cuando ésta permanece constante. Esto se debe a una aceleración de la reacción de hidratación, la cual es activada térmicamente. Para las mezclas con relación a/c 0.45 y 0.60, presentadas en la Figura 4.7 (b) y (c) respectivamente, se conserva la tendencia en donde el tipo de cal que no contiene aditivo, reacciona más rápidamente. Adicionalmente se observa que, al aumentar la relación a/c el valor de temperatura máxima alcanzado es menor.

Análisis pico 1

Ahora se analizarán los otros dos picos que se presentan durante el proceso de hidratación. En la Figura 4.8, se presentan los resultados obtenidos para el pico 1, momento en el cual se da, la disolución de los aluminatos y la formación de etringita. Como se verifica en la figura, para las mezclas con adición tipo A, al aumentar la concentración no cambia significativamente la velocidad de aparición del pico 1, el cual se da en la hora 1 para todos los tipos de cal. Lo que podría indicar que en este punto aún no ha comenzado a reaccionar la cal. Sin embargo para las mezclas con cal tipo AR Y ARF, se presenta una tendencia diferente, en la cual al aumentar la concentración al 4% aumenta la velocidad de aparición del pico, y para concentraciones del 7% esta disminuye nuevamente.

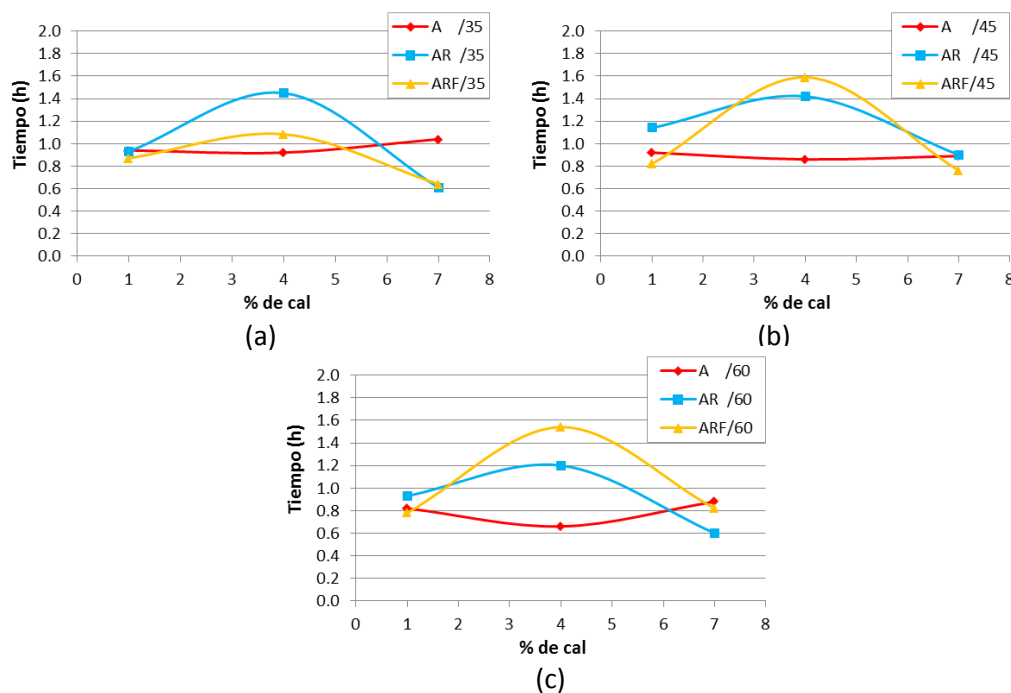


Figura 4.8 Tiempo necesario (t_1) para alcanzar el pico de temperatura inicial (T_1) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60

Sin embargo, Esto podría estar asociado al aditivo que contienen estos tipos de adiciones, el cual no es conocido por razones de confidencialidad comercial de la empresa

proveedora del material. Adicionalmente se debe tener en cuenta el posible error que se pueda presentar en la obtención de los valores exactos de los puntos, pues al aumentar la concentración este pico se ve influenciado por el aditivo y dificulta su ubicación correcta.

En la Figura 4.9 (a) se presentan los valores de temperatura T1 alcanzada en el pico 1 para cales tipo 5/15 con concentración de aditivo y relación a/c 0.5. La figura muestra como las mezclas con adición AR Y ARF, tienen un comportamiento similar entre sí, alcanzando una temperatura entre 6.5 y 7.5°C. Para todas las concentraciones de cal. Sin embargo para las mezclas con cal tipo A, la temperatura alcanzada aumenta al aumentar la concentración de cal, con un máximo de 14.5°C, para una concentración de 7%. En las Figura 4.9 (b) y Figura 4.9 (c) se presenta un comportamiento similar, en el cual las mezclas aditivadas no presentan variación significativa al aumentar la concentración de cal. revisando las tres figuras 4.10, se observa como como al aumentar la relación a/c, la temperatura máxima disminuye en mayor medida para 4 y 7% de cal situándose en 11.1°C para a/c 0.45 y en 9.4°C para a/ 0.60 en cales tipo A.

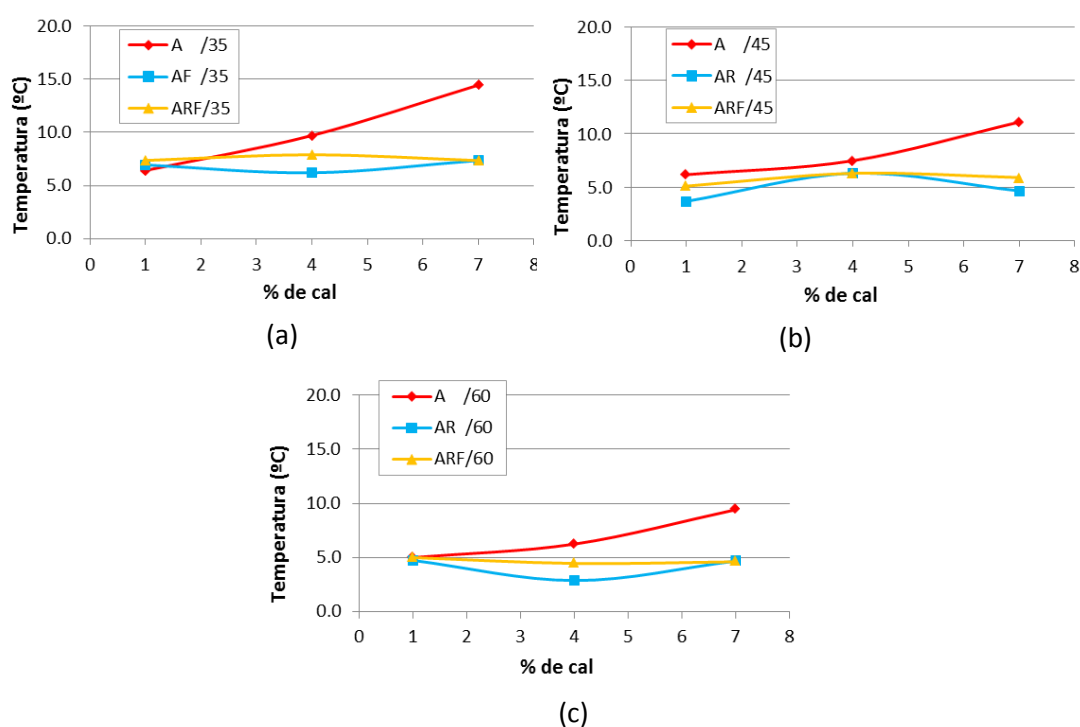


Figura 4.9 Pico de temperatura inicial (T1) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.

Análisis pico 2

En la Figura 4.10 (a), se presentan los resultados obtenidos en el pico 2 para mezclas con adición de cal tipo 5/15, este es el punto en el que finaliza el periodo de inducción, y se da el inicio del fraguado de la pasta. En este punto se observa un comportamiento similar al encontrado en los resultados para el punto 3. En el cual, el tiempo que toman las mezclas con 1% de adición tipo A y ARF y relación a/c 0.35 para alcanzar la temperatura máxima es muy cercano (6.8 horas), mientras que la cal AR, alcanza el pico 1 hora después. A medida que aumenta el contenido de adición de cal, la diferencia entre los tiempos se hace mayor, a la vez que la velocidad de la reacción aumenta, alcanzando un tiempo de 2.5 h para la mezcla con concentración del 7%, y una diferencia con los otros tipos de cal de aproximadamente 2 horas. Al comparar los gráficos para las diferentes relaciones a/c se observa que a medida que esta aumenta la velocidad disminuye para las mezclas con 4 y 7% de adición, para las mezclas con 1% de adición, la velocidad no varía significativamente.

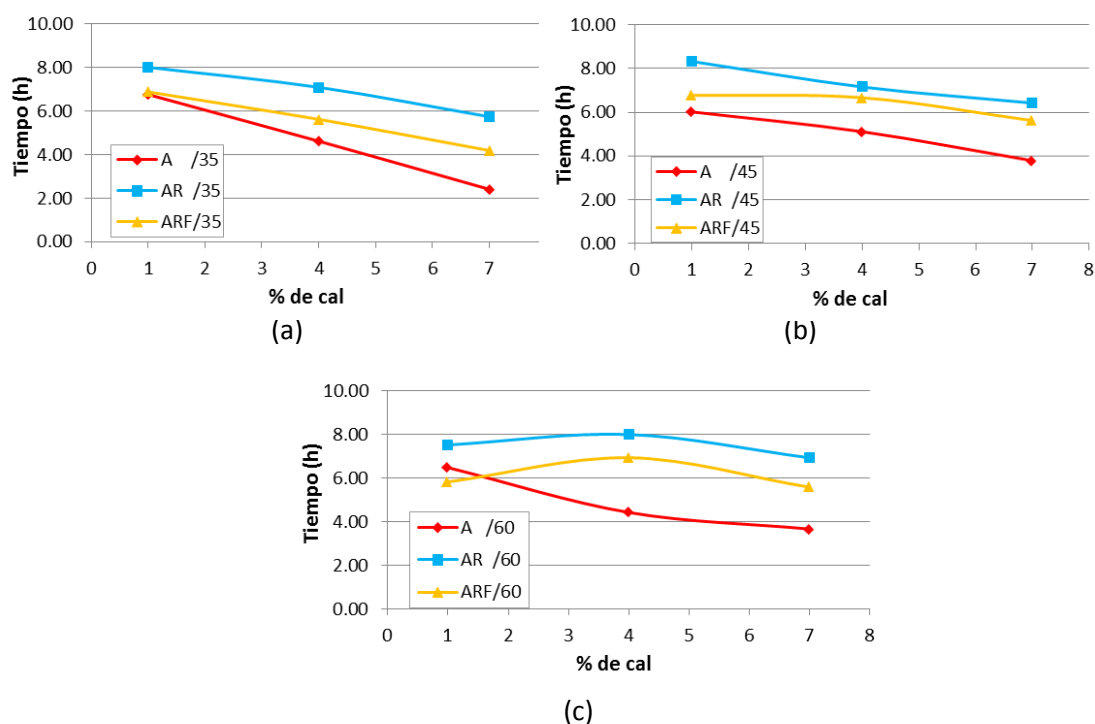


Figura 4.10 Tiempo necesario (t_2) para alcanzar el pico de temperatura (T_2) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60

En la Figura 4.11 se presentan los resultados para las temperaturas máximas obtenidas en el pico 2, para mezclas con relación a/c y % de adición variable.

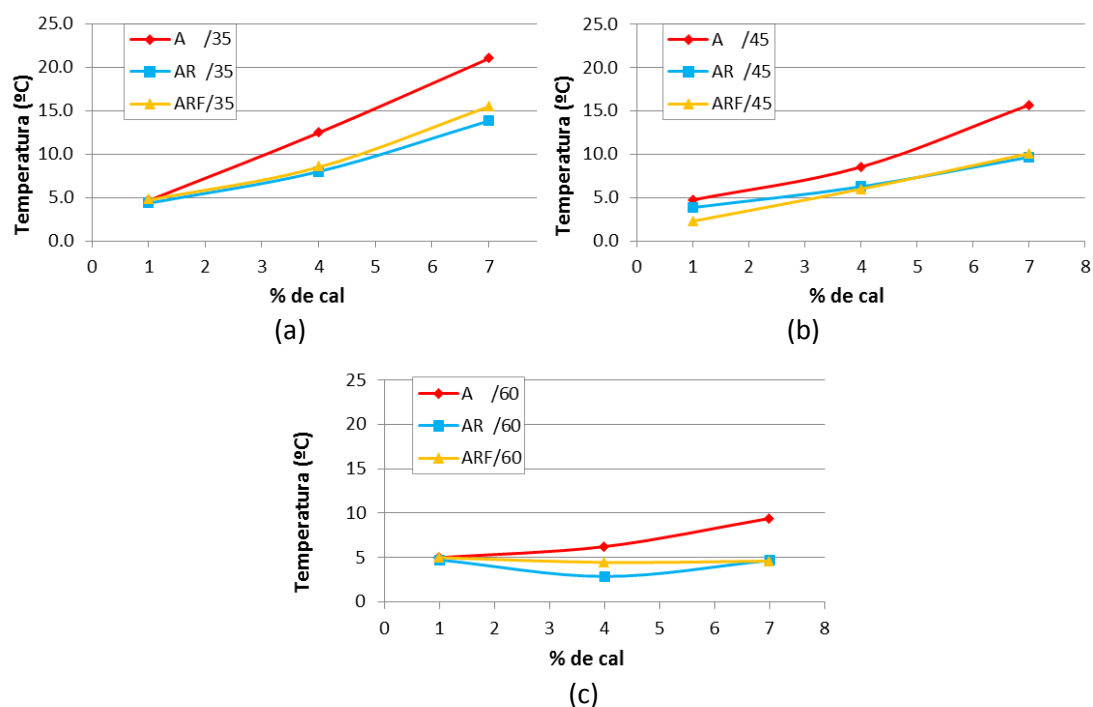


Figura 4.11 Pico de temperatura (T2) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60

Se observa nuevamente que para todas las dosificaciones el comportamiento de las mezclas con cales aditivadas es muy similar entre ellas. Cuando se tiene a/c 0.35 y 1% de cal, la temperatura alcanzada en esta etapa es de aproximadamente 4.5°C para todos los tipos de cales. A medida que aumenta el contenido de cal, aumenta la temperatura, alcanzando un valor máximo para la mezcla con cal tipo A con 7% de cal de 21°C. En este caso al aumentar el contenido de cal la diferencia entre las dos muestras aditivadas no es significativa, pero si lo es la diferencia con la cal tipo A. Esta diferencia, para un 7% de aditivo es de 5.5°C. Para las cales con a/c de 0.45 se presenta el mismo comportamiento, pero en este caso la temperatura máxima alcanzada en la mezcla con 7% de cal es de 15.7°C. Esto evidencia la disminución de las temperaturas al aumentar la relación a/c. finalmente para la mezcla con a/c 0.60, se tiene que las mezclas aditivadas A y AR, no presentan aumento de temperatura significativo al aumentar la concentración de cal, lo que si sucede con la cal tipo A.

De acuerdo al análisis anterior, se encuentra que la mezcla A 35/7 es la que presenta mayor temperatura y un tiempo menor para alcanzar su pico máximo. El hecho que un tipo de cal reaccione demasiado rápido puede resultar perjudicial a la hora de ser empleado en mezclas de hormigón como adición para compensar la retracción. Esto debido a que los fenómenos expansivos podrían presentarse cuando aún la muestra se encuentra en estado plástico, y no produciría el efecto de compensación de retracción deseado.

4.2.3. Resultados para mezclas con cales tipo F2000

Debido a que las cales proporcionadas tienen diferencias en su composición que solo son conocidas por su fabricante, se analizarán de manera independiente. En el apartado anterior se ha analizado el comportamiento encontrado en las mezclas con cales tipo 5/15. (A, AR, ARF). En este apartado se analizarán las mezclas con cales tipo F2000 (B y BR). En la Figura 4.12, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de calorimetría para las mezclas con adición de cal tipo F2000 con una proporción de 1%, 4% y 7%, y con una relación a/c 0.35. En la figura, las curvas se han agrupado por colores de acuerdo al tipo de cal utilizada, con el fin de facilitar su comprensión.

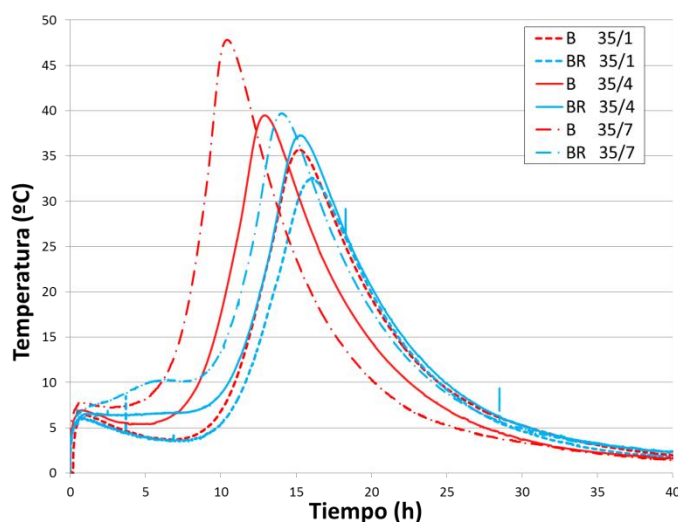


Figura 4.12 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.35 y % de cal variable

En la Figura 4.12 se observan claramente los tres picos principales asociados a las diferentes fases del proceso de hidratación del cemento. Se observa como la duración del periodo de inducción y la temperatura de esta fase varía de acuerdo al contenido de cal. A mayor % de adición, menor duración del periodo de inducción, el cual es el periodo en el que la mezcla permanece en estado plástico y en el que se presenta la reacción de la cal. Se observa además, que al aumentar el % de aditivo, aumenta el pico máximo, y disminuye el tiempo necesario para alcanzarlo. En este caso la mezcla más rápida y con mayor pico máximo, es la muestra tipo B con 7% de cal.

Se observa además un pico adicional en la mezcla fabricada con cal aditivada, lo cual supone una reacción de la cal que se superpone con la reacción del cemento. Este pico se hace más evidente al aumentar el % de adición. En esta figura se observa como el aditivo en la cal, retrasa la aparición de su pico máximo, aumentando la duración del periodo de inducción, pues es en esta fase en donde comienza la reacción de la cal.

En las Figura 4.13 y Figura 4.14, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de calorimetría para las mezclas con adición de cal tipo F2000 con una proporción de 1%, 4% y 7%, y con una relación a/c 0.45 y 0.60 respectivamente. En las figuras se observa como las

mezclas con cal tipo B reaccionan más rápidamente y alcanzan temperaturas máximas más elevadas. Al comparar todas las dosificaciones, se observa que, al aumentar la relación a/c, aumenta la duración de la etapa 3, en la cual se da el fraguado del material. Adicionalmente se observa una disminución en las temperaturas máximas alcanzadas T3.

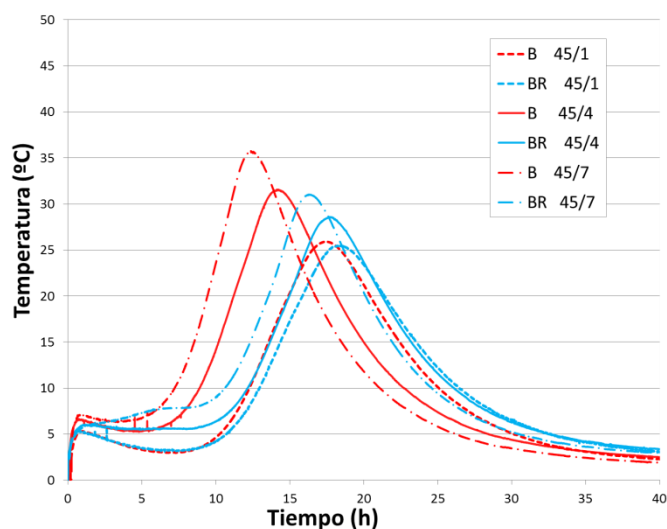


Figura 4.13 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.45 y % de cal tipo F2000 variable

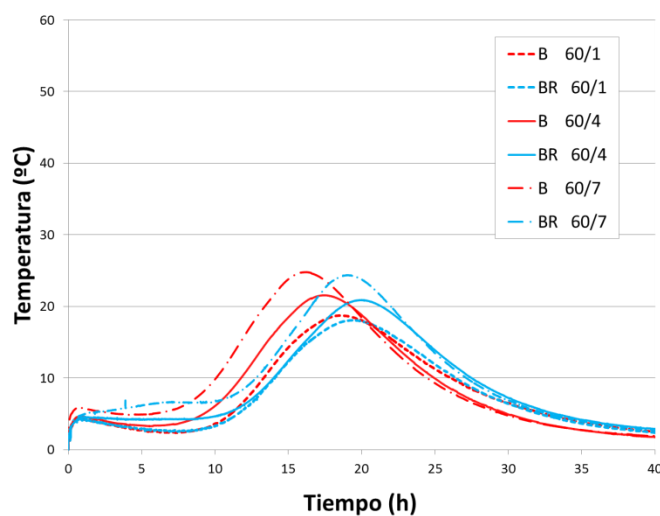


Figura 4.14 Resultados de calorimetría para pastas con a/c 0.60 y % de cal tipo F2000 variable

Análisis pico 3

En la Figura 4.15 se analizan con más detalle los puntos de máxima temperatura. En ella se presentan los tiempos necesarios para alcanzar el pico máximo de temperatura T3, para cada % de adición y relación a/c. En esta figura se puede verificar que para las mezclas con 1% de cal el tiempo necesario para alcanzar el pico máximo es muy cercano y se da entre 15 y 16 horas. Al aumentar la cantidad de aditivo este tiempo disminuye, y para la mezcla con aditivo tipo B y 7% de cal se sitúa en 10.4 horas, mientras la tipo BR alcanza este pico 3.5 horas después. Se observa como para todos los % de adición, la mezcla fabricada con cal tipo B es

más rápida. Resultado bastante coherente, pues el tipo de cal BR, contiene un aditivo que retarda la reacción. Se observa también como, al aumentar la relación a/c aumenta el tiempo necesario para alcanzar el punto de temperatura máxima T3.

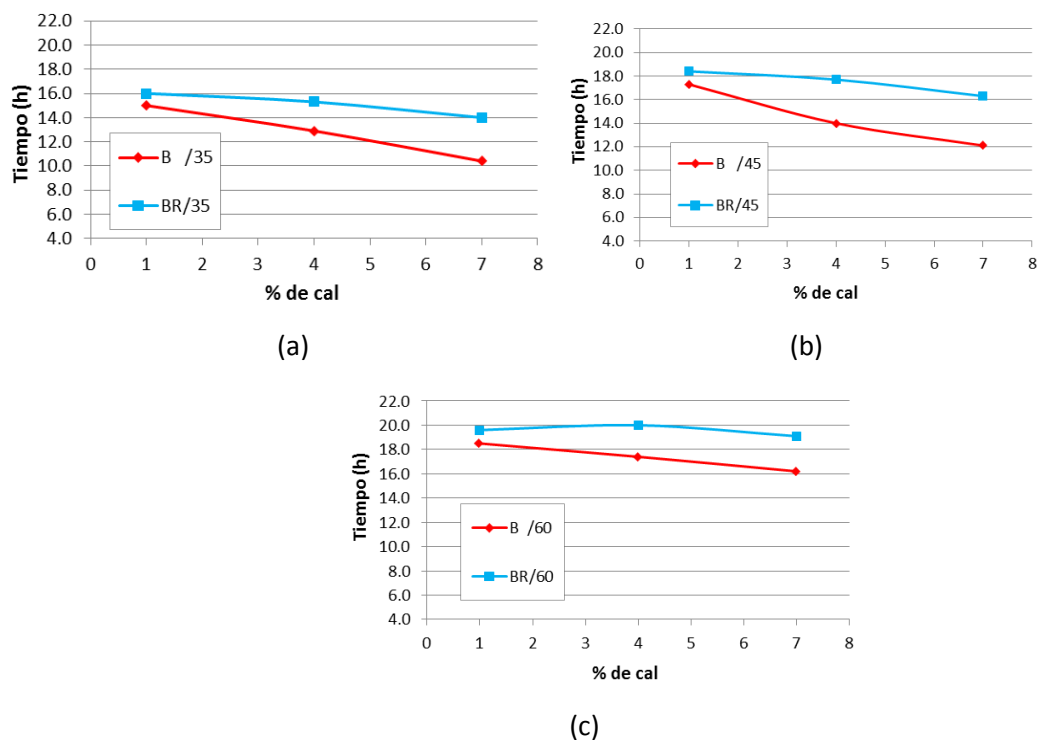


Figura 4.15 Tiempo necesario (t_3) para alcanzar el pico de temperatura máxima (T_3) para pastas con cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60

A continuación, en la Figura 4.16, se presentan los resultados de temperatura máxima alcanzada para cada una de las muestras. Con el fin de correlacionar los resultados de tiempo y temperatura máxima alcanzada. En la Figura 4.16(a), se observa, cómo estaba previsto que la temperatura para las muestras tipo B es mayor, presentándose mayor diferencia para una concentración del 7%. Para las mezclas con relación a/c 0.60 presentadas en la Figura 4.16(c) las temperaturas entre las dos muestras no tienen una variación significativa, entre 18 y 19°C, es decir que la cal B, con una relación a/c de 0.60, reacciona más rápidamente pero alcanza una temperatura ligeramente superior a la de la muestra BR.

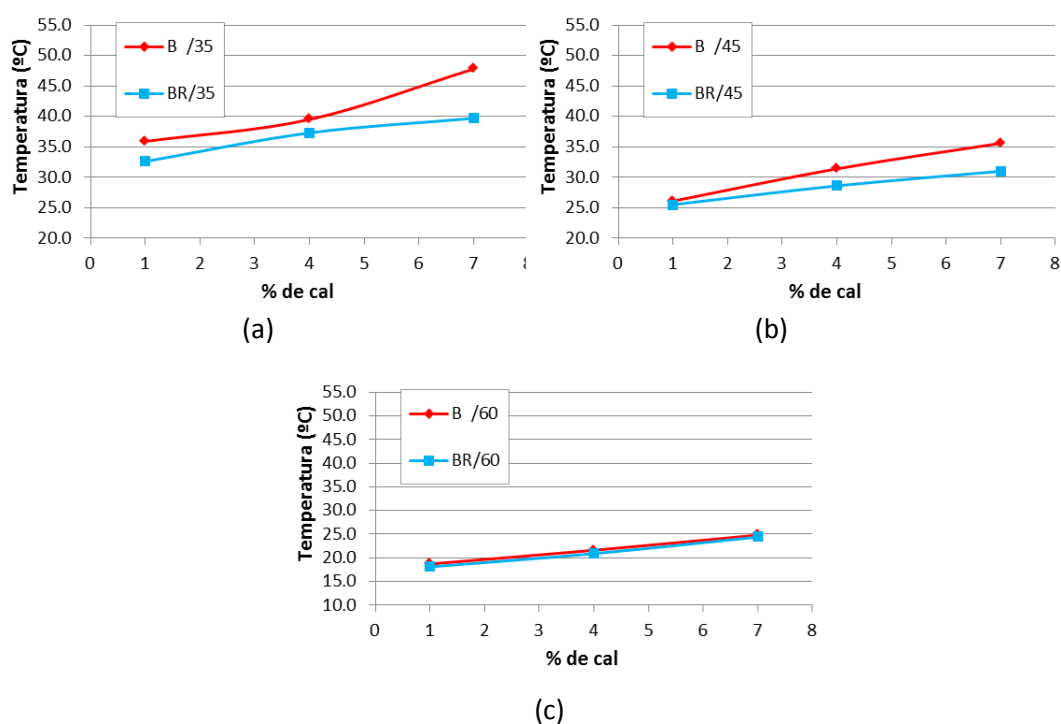


Figura 4.16 Pico de temperatura máximo (T3) para pastas con cal tipo 5/15 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.

En general, se verifica que las mezclas fabricadas con cales tipo BR reaccionan más lentamente y obtienen, temperaturas más bajas que las fabricadas con cal tipo B. Adicionalmente se observa como al aumentar la relación a/c la temperatura disminuye al igual que la velocidad. Para la mezcla B con a/c 0.37 y 7% de cal la temperatura alcanzada es 47.8°C, mientras que para a/c 0.60, el mismo tipo de cal y la misma concentración se obtiene una temperatura de 16.2° C.

Análisis pico 1

En la Figura 4.17 se presentan los tiempos necesarios para alcanzar la temperatura máxima en el punto 1 para las mezclas fabricadas con adición de cal tipo F2000. Como se ha explicado, este punto se da generalmente a los pocos minutos y representa el final de la etapa en la cual se da la disolución de los aluminatos y la formación inicial de etringita. En la Figura 4.16 (a) se observa, como para las muestras con 1 % de cal no se presentan diferencias significativas en la velocidad de la reacción, el pico se da entre 0.7 y 0.75 horas siendo la tipo BR ligeramente inferior. A medida de que el % de cal aumenta y disminuye la velocidad de la reacción para la cal tipo BR, la diferencia entre ambos tipos de cal se hace más significativa, mostrando este tipo de cal, como la más lenta. Sin embargo se observa como para la cal tipo B, la velocidad permanece casi constante, entre 0.7 y 0.78 horas, para todas las concentraciones de cal. Para las mezclas con a/c 0.45 mostradas en la Figura 4.17 (b) la cal tipo B permanece constante para concentraciones de 1 y 7% y presenta un ligero aumento de velocidad para concentraciones del 7%.

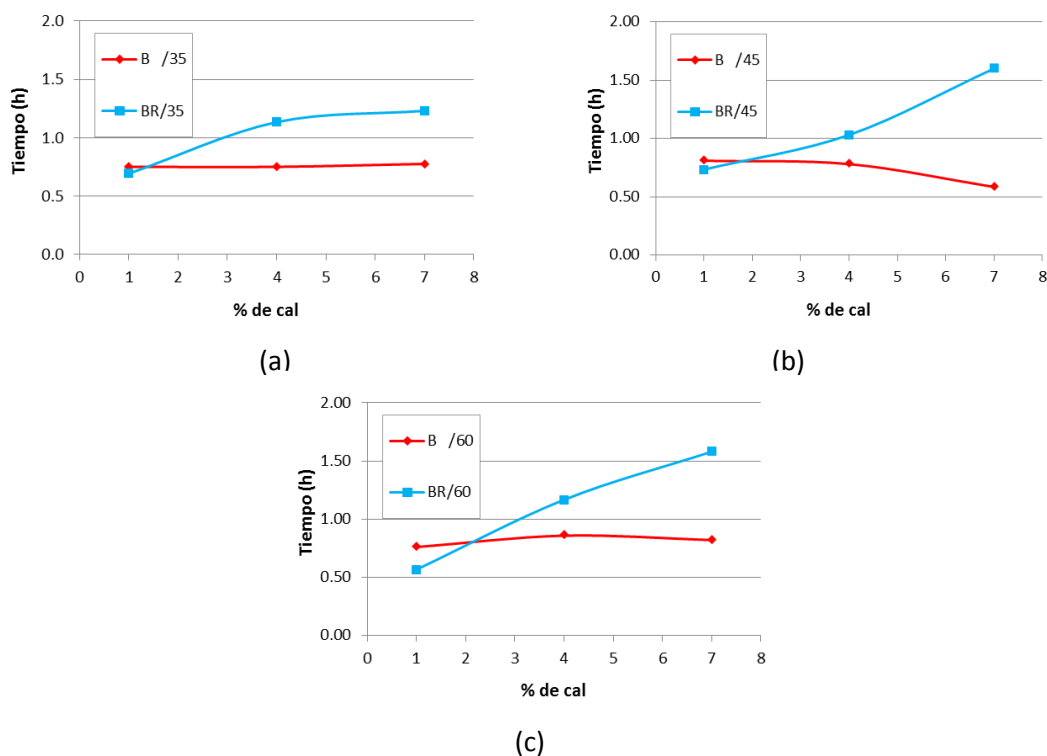


Figura 4.17 Tiempo necesario (t_1) para alcanzar el pico de temperatura inicial (T_1) para pastas con cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60

Con el fin de analizar si existe correlación que existe entre la velocidad de reacción y la temperatura, se presenta la Figura 4.18, en la cual se presentan los resultados para las temperaturas máximas obtenidas en el pico 1. Se evidencia como la temperatura no presenta cambios muy significativos al aumentar la concentración de cal, sin embargo la cal tipo B presenta temperaturas un poco más altas en todos los casos. Adicionalmente se sigue conservando la tendencia en la cual al aumentar el % de adición de cal, aumenta la temperatura. Pero cabe anotar que esta variación no es muy significativa, lo que demuestra que en este primer pico aún no ha comenzado a hidratarse la cal. Comparando las tres Figura 4.17(a), (b) y (c) con relaciones a/c diferentes se observa como al aumentar esta relación aumenta el valor de temperatura máxima alcanzado.

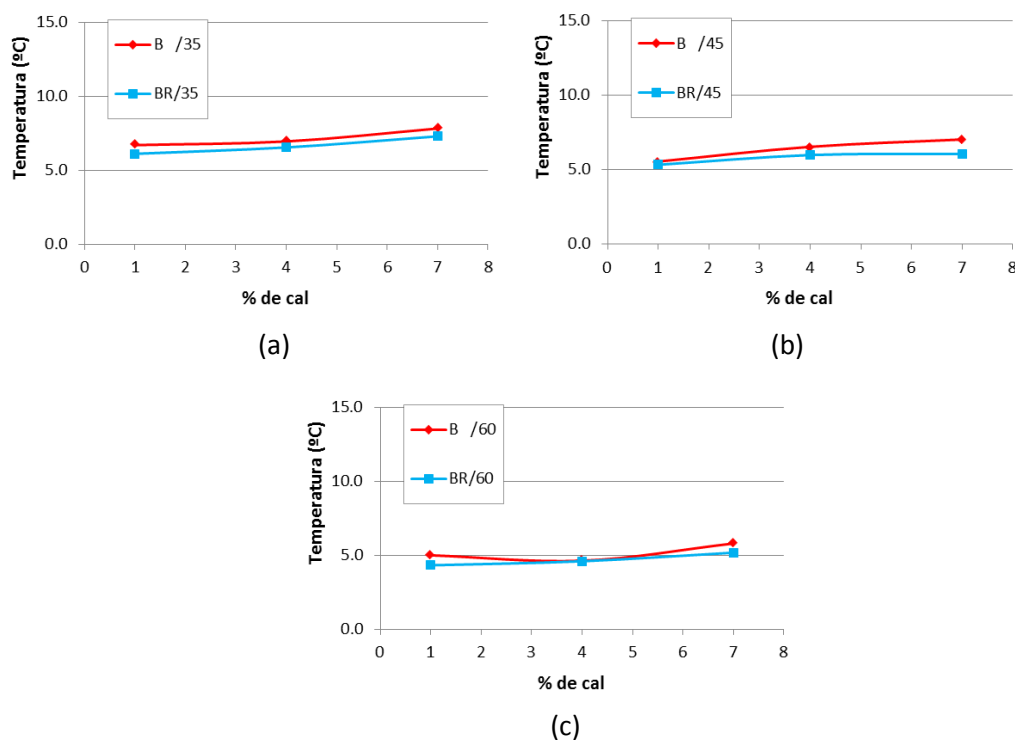


Figura 4.18 Pico de temperatura máximo (T1) para pastas con cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.

Análisis pico 2

Finalmente, se revisan los resultados obtenidos para el pico de temperatura 2, el cual marca el fin del periodo de inducción y el inicio del periodo de fraguado de la muestra. En la Figura 4.19, se presentan los tiempos necesarios para alcanzar el pico de temperatura T2. En este punto nuevamente se presenta poca variación entre las mezclas con 1% de adición de cal, entre 0.75 y 0.80 horas. A partir de allí la velocidad para las mezclas con cal tipo B aumenta al aumentar la concentración de cal. Para las mezclas con adición tipo BR, sucede lo contrario, al aumentar la concentración de cal, disminuye la velocidad. Cabe recordar que este punto marca la duración del periodo durmiente, por lo que se evidencia que en la cal aditivada (BR), el inicio de la etapa de fraguado se retrasa a medida que se aumenta el contenido de cal. Lo anterior puede justificarse en la presencia del aditivo dentro de la cal BR pues es en esta etapa que se evidencia el comienzo de la reacción de la cal y de su aditivo.

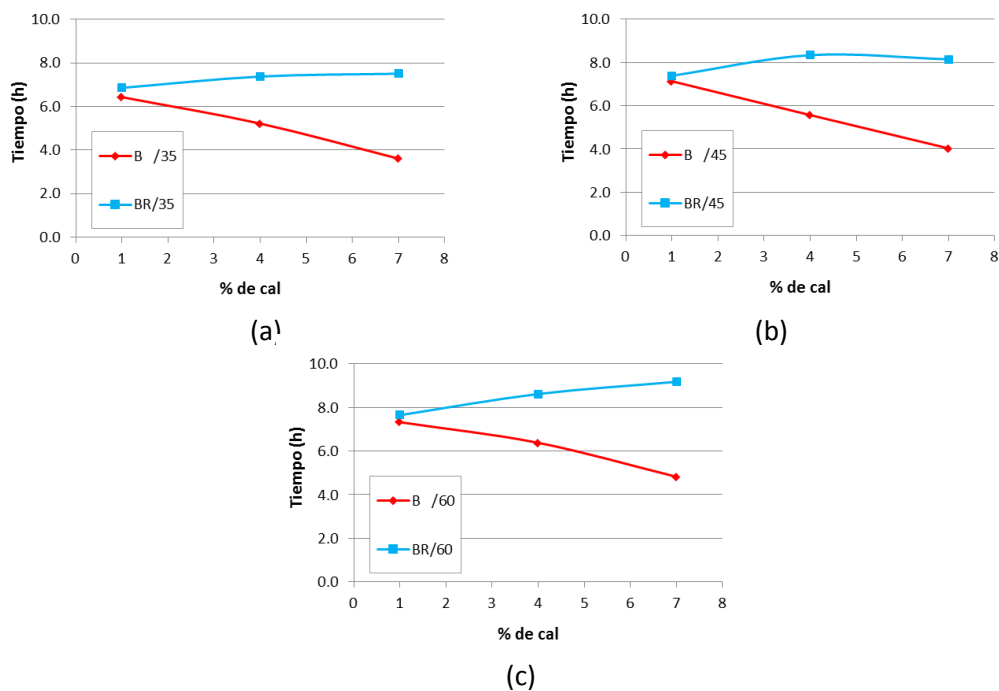


Figura 4.19 Tiempo necesario (t_1) para alcanzar el pico de temperatura inicial (T_1) para pastas con cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60

A continuación, en la Figura 4.20, se revisan las temperaturas máximas alcanzadas en el punto 2 para las mezclas fabricadas con cal tipo F2000. Esto con el fin de encontrar una correlación justificada entre la velocidad de reacción y la temperatura alcanzada.

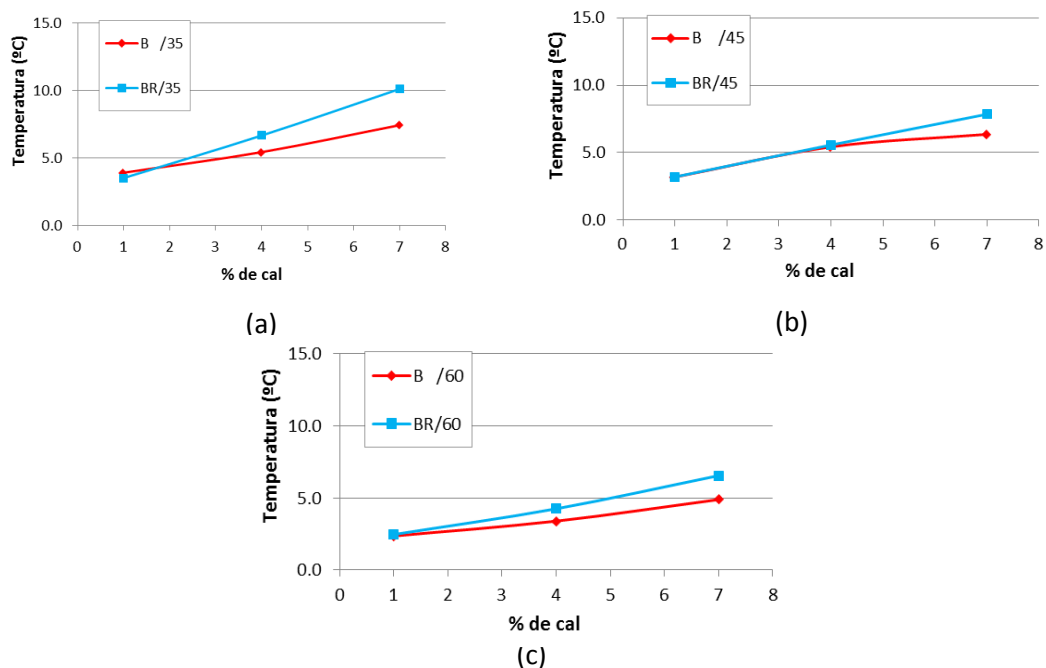


Figura 4.20 Pico de temperatura máximo (T_1) cal tipo F2000 (a) a/c 0.35, (b) a/c 0.45, (d) a/c 0.60.

Como en todos los casos anteriores, para las mezclas con 1% de aditivo, no se presenta una diferencia significativa en las temperaturas alcanzadas por los dos tipos de cal, para a/c 0.5 esta temperatura se encuentra entre 6.4 y 6.9°C. A medida que aumenta el contenido de adición, la temperatura aumenta, y la diferencia entre las mezclas comienza a ser más evidente. En este caso se observa como la muestra aditivada (BR) presenta mayor temperatura, contrario a lo que se presenta para las temperaturas T1 Y T3. Esto puede estar asociado a la superposición de las reacciones de la cal y del aditivo que contiene, lo que la hace más exotérmica en este punto.

4.2.4. Comparativo entre mezclas tipo 5/15 Y F2000

En la Tabla 4.2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada una de las mezclas, en la cual se especifica que muestra ha alcanzado los valores máximos y mínimos de tiempo (t) y temperatura (T). El tiempo t1 y su respectiva T1, corresponden al primer pico y marca el final de la fase 1, el tiempo t2 corresponde al punto en el cual termina el periodo de inducción del cemento, el tiempo t3 pertenece al tiempo en el cual se alcanza la temperatura máxima T3. Punto a partir del cual las mezclas comienzan su descenso de temperatura hasta estabilizarse con la temperatura ambiente.

CAL	a/c	Pico 1							
		Tiempo (t1)				Temperatura (T1)			
		Menor t1		Mayor t1		menor T1		Mayor T1	
TIPO 5-15	0.35	AR 35/7	0.61	AR 35/4	1.45	AR 35/4	6.20	A 35/7	14.46
	0.45	ARF 45/7	0.76	ARF 45/4	1.59	AR 45/1	3.67	A 45/7	11.11
	0.60	AR 60/7	0.60	ARF 60/4	1.54	AR 60/4	2.87	A 60/7	9.43
CAL	a/c	Pico 2							
		Tiempo (t2)				Temperatura (T2)			
		Menor t2		Mayor t2		Menor T2		Mayor T2	
TIPO 5-15	0.35	A 35/7	2.41	AR 35/1	8.01	AR 35/1	4.37	A 35/7	21.03
	0.45	A 45/7	3.78	AR 45/1	8.33	ARF 45/1	2.30	A 45/7	15.70
	0.60	A 60/7	3.66	AR 60/4	8.00	ARF 60/1	1.85	A 60/7	13.42
CAL	a/c	Pico 3							
		Tiempo (t3)				Temperatura (T3)			
		Menor t3		Mayor t3		Menor T3		Mayor T3	
TIPO 5-15	0.35	A 35/7	5.70	AR 35/1	16.10	A 35/1	32.54	A 35/7	59.00
	0.45	A 45/7	9.06	AR 45/1	18.10	ARF 45/1	26.50	ARF 45/7	33.40
	0.60	A 60/7	9.30	AR 60/1	19.40	AR 60/1	18.60	A 60/7	33.20

Tabla 4.2 Resumen de máximos y mínimos cada uno de los picos de temperatura para cal tipo 5/15

Para las cales tipo 5/15 la mezcla A 35/7 es la que presenta mayor temperatura en su pico máximo (59°C), la cual alcanza en el menor tiempo. La mezcla con menor temperatura en el pico máximo es la AR 60/1 (18.60°C), es precisamente esta mezcla la que toma mayor tiempo en alcanzar esta temperatura. Vemos entonces que las mezclas con cal sin aditivar, con menor a/c y mayor contenido de cal son las que presentan una reacción más rápida y alcanzan una temperatura más alta.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados para las mezclas con las cales tipo F2000 en este caso la mezcla B 35/7 es la que presenta mayor temperatura (47.80°C) y un tiempo menor para alcanzar su pico máximo (10.4 horas). Como se ha mencionado anteriormente para el caso de estudio, una cal con una velocidad muy alta de reacción y puede resultar poco interesante para ser utilizada como adición para compensar retracción. La mezcla BR 60/1 es la que más tiempo toma para alcanzar su temperatura máxima (19.60 horas) y la que permanece más tiempo en el periodo de inducción. El tiempo que cada muestra permanece en este periodo disminuye al aumentar el contenido de cal.

CAL	a/c	Pico 1							
		Tiempo (t1)				Temperatura (T1)			
		Menor t1		Mayor t1		menor T1		Mayor T1	
TIPO F2000	0.35	BR 35/1	0.69	BR 35/7	1.23	BR 35/1	6.11	B 35/7	7.82
	0.45	B 45/7	0.58	BR 45/7	1.60	BR 45/1	5.31	B 45/7	7.02
	0.60	BR 60/1	0.57	BR 60/7	1.58	BR 60/1	4.33	B 60/7	5.80

CAL	a/c	Pico 2							
		Tiempo (t2)				Temperatura (T2)			
		Menor t2		Mayor t2		Menor T2		Mayor T2	
TIPO F2000	0.35	B 35/7	3.61	BR 35/7	7.51	BR 35/1	3.50	BR 35/7	10.10
	0.45	B 45/7	4.03	BR 45/4	8.34	B 45/1	3.19	BR 45/7	7.85
	0.60	B 60/7	4.82	BR 60/7	9.18	B 60/1	2.36	BR 60/7	6.55

CAL	a/c	Pico 3							
		Tiempo (t3)				Temperatura (T3)			
		Menor t3		Mayor t3		Menor T3		Mayor T3	
TIPO F2000	0.35	B 35/7	10.40	BR 35/1	16.0	BR 35/1	32.60	B 35/7	47.80
	0.45	B 45/7	12.10	BR 45/1	18.4	BR 45/1	25.50	B 45/7	35.60
	0.60	B 60/7	16.20	BR 60/4	20.0	BR 60/1	18.10	B 60/7	24.80

Tabla 4.3 Resumen de máximos y mínimos cada uno de los picos de temperatura para cal tipo 5/15

Al comparar los dos tipos de cal, se encuentra que para el pico 1 los dos tipos de cales alcanzan su temperatura máxima, en un tiempo similar, pero el valor de esta temperatura para la cal tipo 5-15 es mayor, alcanzándose 14.5°C para a/c 0.35 y 9.5 para 0.60. En ambas mezclas coincide que las cales sin aditivo son las que alcanzan mayor temperatura en este punto.

Para el pico 3 las mezclas con cales tipo 5/15 son obtienen los picos máximos más rápidamente, situándose en 5.7 horas para las mezclas con a/c 0.35 y 7% de cal, considerada como la más rápida de todas, y en 9.3 horas para las mezclas con 0.60, mientras que las mezclas con cales tipo F200 se toman entre 10 y 16 horas para alcanzar este pico máximo. Adicionalmente los valores de temperatura de las cales 5/15 exceden los de las cales F2000 en aproximadamente 10°C para las a/c 0.35 y 0.6.

4.3. RESULTADOS ENSAYOS DE EXPANSIÓN

4.3.1. Resultados para pastas con adición de cal tipo 5/15

Luego de realizar un seguimiento diario de la expansión de la muestra, a partir de las 24 horas de edad, se han obtenido los siguientes resultados. En la Figura 4.21 se presentan los resultados obtenidos para las cales tipo 5/15 estudiadas con a/c 0.35 y % de cal variable. Además se presenta una comparación con la curva obtenida para una pasta de cemento fabricada sin adición de cal. En algunos casos la expansión alcanzada, se encuentra a nivel o per debajo de la muestra patrón fabricadas con solo cemento, este hecho, hace pensar que la mayor parte de la reacción se está produciendo durante las primeras 24 horas. Durante este tiempo el material aún se encuentra en estado plástico y no se ha realizado ninguna medida. Lo cual en este punto se presenta como una gran limitación del procedimiento.

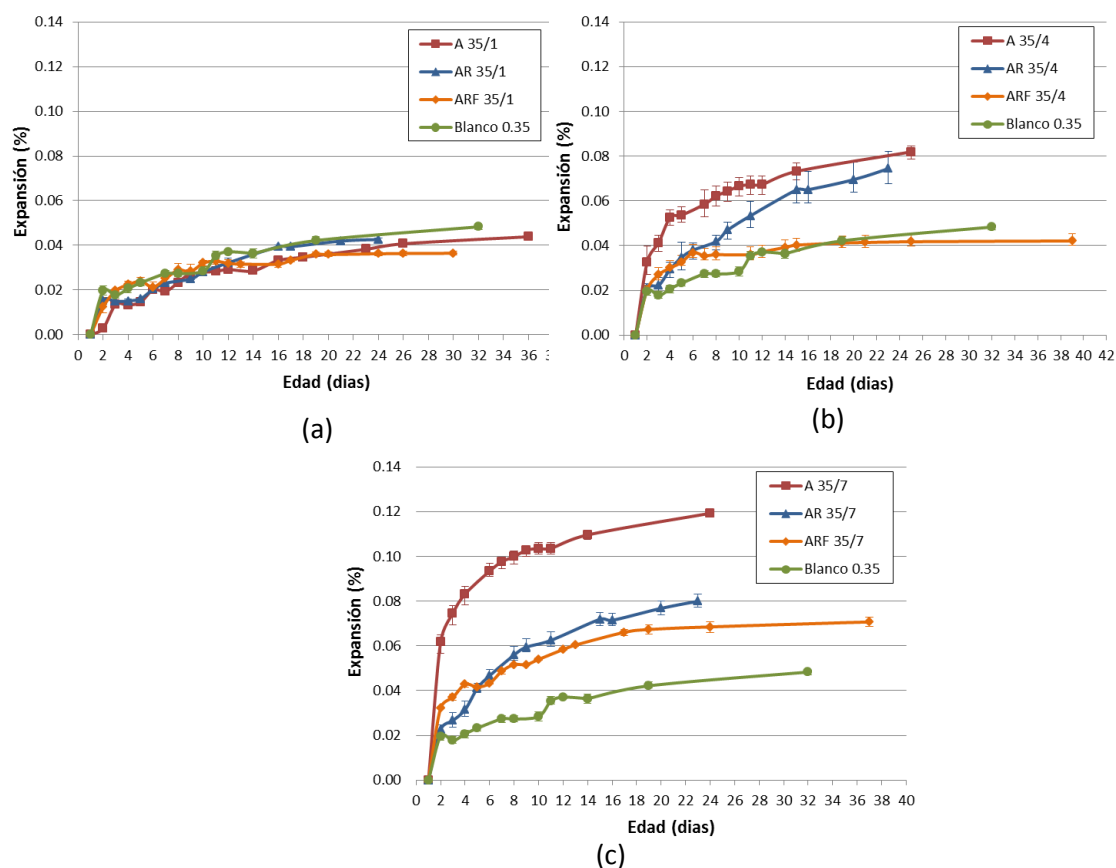


Figura 4.21 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo 5/15 y a/c 0.35

En la Figura 4.21(a) se observa como las tres mezclas tienen una expansión similar (entre 0.036 y 0.043% para el día 30), e incluso esta expansión es inferior a la de la curva sin adición de cal que alcanza una expansión de 0.047%, como se ha indicado anteriormente, se concluye que existe una expansión que se está dando durante las primeras 24 horas y no está siendo registrada. Para analizar mejor este resultado es necesario revisar, lo que sucede al variar alguno de los parámetros. En la Figura 4.21(b) y Figura 4.21(c) se muestra el

comportamiento de las mezclas con 4 y 7% de cal respectivamente. Al aumentar la concentración de cal se obtiene mayor expansión. En este caso, la muestra que aumenta su expansión final en mayor medida es la muestra A/35, la cual pasa de 0.044% para 1% de cal, a 0.119% para 7% de cal y. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en los ensayos de calorimetría en los que las mezclas con cal tipo A, alcanzan la temperatura máxima en un tiempo más corto.

En la Figura 4.22 se presentan los resultados obtenidos para las cales tipo 5/15 estudiadas con a/c 0.45 y % de cal variable. Además se presenta una comparación con la curva obtenida para una pasta de cemento fabricada sin adición de cal.

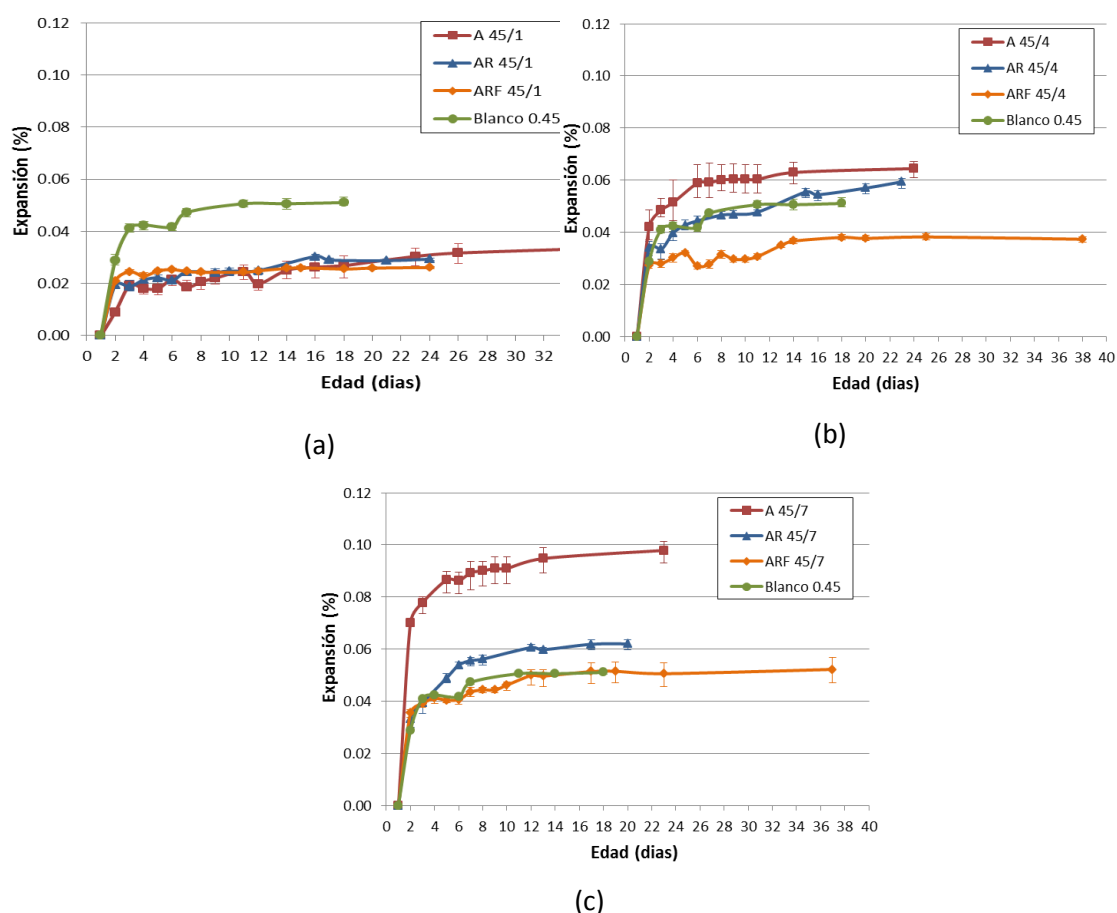


Figura 4.22 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo 5/15 y a/c 0.45

De igual manera se observa que al aumentar el % de cal, aumenta la expansión alcanzada. Si se comparan las Figura 4.21 y Figura 4.22 se observa como al aumentar la relación a/c, la expansión disminuye, como era predecible, ya que a mayor contenido de agua, se tendrá una muestra con mayor cantidad de vacíos, y por lo tanto se dará menor expansión en la muestra. Esto es debido a que estos vacíos actúan como cámara de expansión, ya que cuando la pasta aumenta de volumen, ocupan en primer lugar estos espacios sin provocar tensiones adicionales. Este comportamiento ha sido corroborado anteriormente con los

ensayos de calorimetría, en los cuales al aumentar a/c la temperatura máxima disminuye y el tiempo que tarda la mezcla en alcanzarlo es mayor.

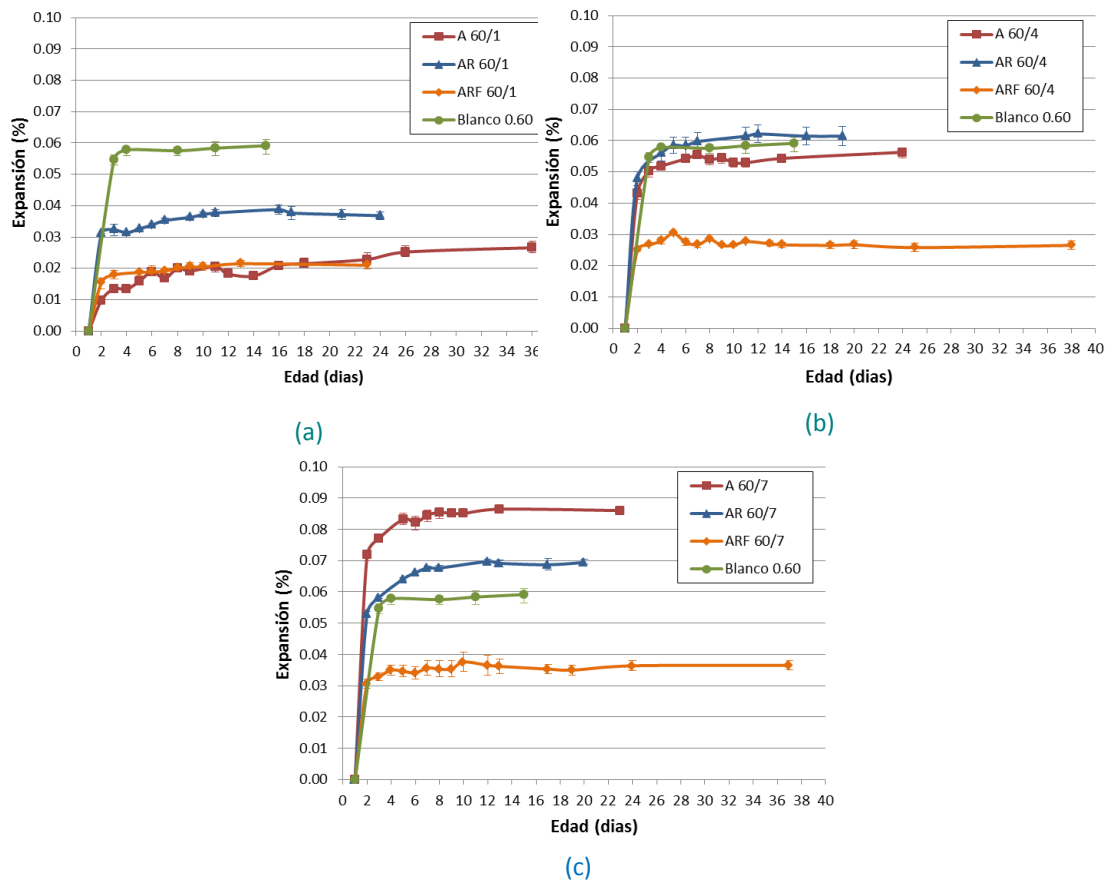


Figura 4.23 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo 5/15 y a/c 0.60

En la Figura 4.23 nuevamente se observa como la expansión para cales con 1% de aditivo se presenta aparentemente menor que la expansión para la mezcla sin adición. Esto se puede observar más claramente en la Figura 4.23(a) en la cual la mezcla AR 60/1, la cual ha sido considerada la más lenta y con menor temperatura máxima en los ensayos de calorimetría se acerca más a la curva del blanco 0.60. Lo que quiere decir que al ser más lenta su reacción, produce una expansión luego de que material haya fraguado, y los datos de su expansión pueden ser registrados en mayor medida. En la Figura 4.23(c) se marca en mayor medida este fenómeno, pues ya se tiene claro que las mezclas con mayor a/c tendrán menor expansión, contrario a lo que sucede en esta figura. Por lo tanto se puede ver claramente que al ser más lenta, tardara más en expandir, y por lo tanto se presentara una buena parte de la expansión, después de las 24 horas, cuando la muestra ya ha fraguado.

4.3.2. Resultados para pastas con adición de cal tipo F2000

Luego de realizar un seguimiento diario de la expansión de la muestra, a partir de las 24 horas de edad, se han obtenido los siguientes resultados. En cada uno de los gráficos se han incluido las barras de error correspondientes, las cuales representan la diferencia de cada

dato, respecto al promedio de los tres especímenes ensayados por cada dosificación. En la Figura 4.24 se presentan los resultados obtenidos para las cales tipo F2000 estudiadas con a/c 0.35 y % de cal variable. Además se presenta una comparación con la curva obtenida para una pasta de cemento fabricada sin adición de cal.

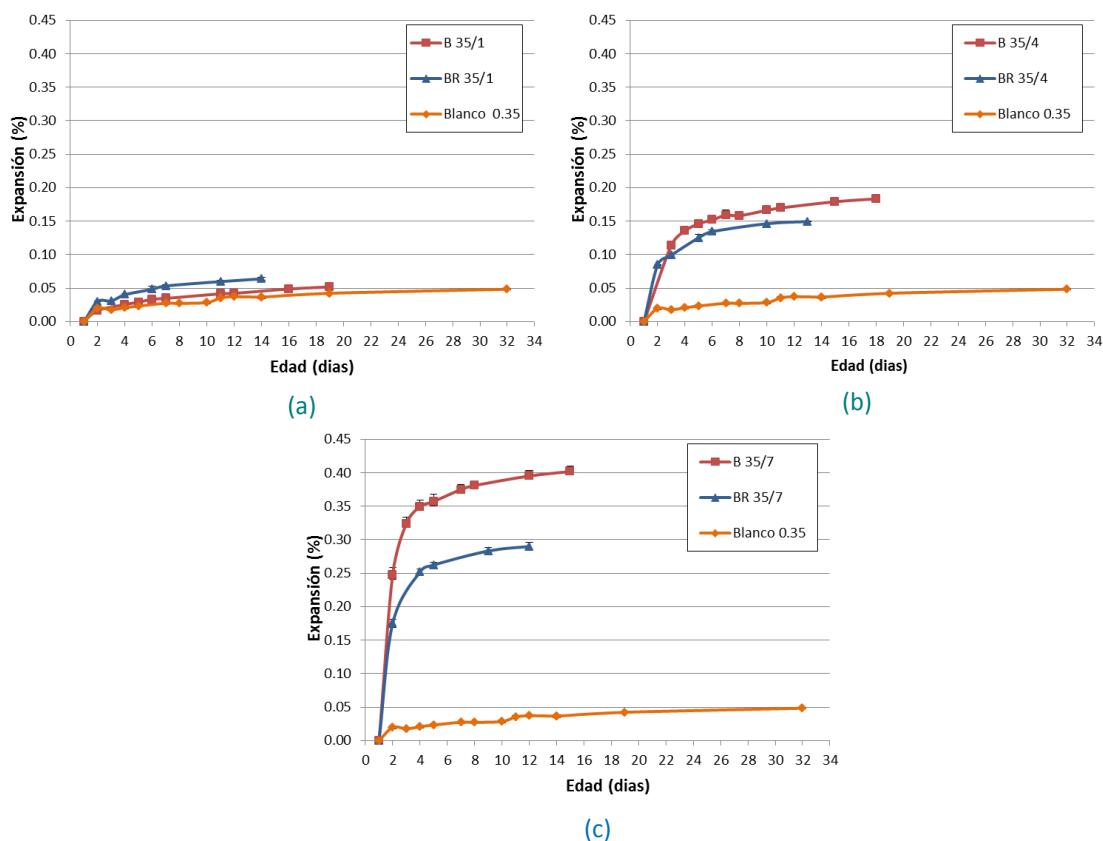


Figura 4.24 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo F2000 y a/c 0.35

Como se observa en la Figura 4.24(a) para las muestras con concentración de aditivo del 1%, no se presentan diferencias significativas entre la expansión alcanzada para cada uno de los tipos de cal. Este comportamiento coincide en lo observado en los ensayos de calorimetría para la misma dosificación, no los cuales la temperatura alcanzada no varía considerablemente. Adicionalmente, las muestras presentan un comportamiento aparentemente similar al de la mezcla sin adición de cal. De acuerdo a los resultados obtenidos en para las cales tipo 5/15, no es posible afirmar exactamente el nivel de expansión alcanzado, pues no se conoce la expansión durante las primeras 24 horas.

En la Figura 4.25 se presentan los resultados obtenidos para las cales tipo F2000 estudiadas con a/c 0.45 y % de cal variable. Además se presenta una comparación con la curva obtenida para una pasta de cemento fabricada sin adición de cal. En la Figura 4.25(a), se observa nuevamente que para una concentración de 1% de adición de cal, las mezclas realizadas con cal tipo B, presentan un comportamiento aparentemente similar al de la mezcla realizada sin adición. La mezcla realizada con cales tipo BR, presenta una expansión un poco

superior a las cales tipo B. Este comportamiento similar al mostrado en el ensayo de calorimetría en su punto de máxima temperatura T3, en donde el tiempo y la temperatura presentan valores muy cercanos. A partir de aquí, al aumentar el contenido de cal aumenta la expansión de la muestra. .

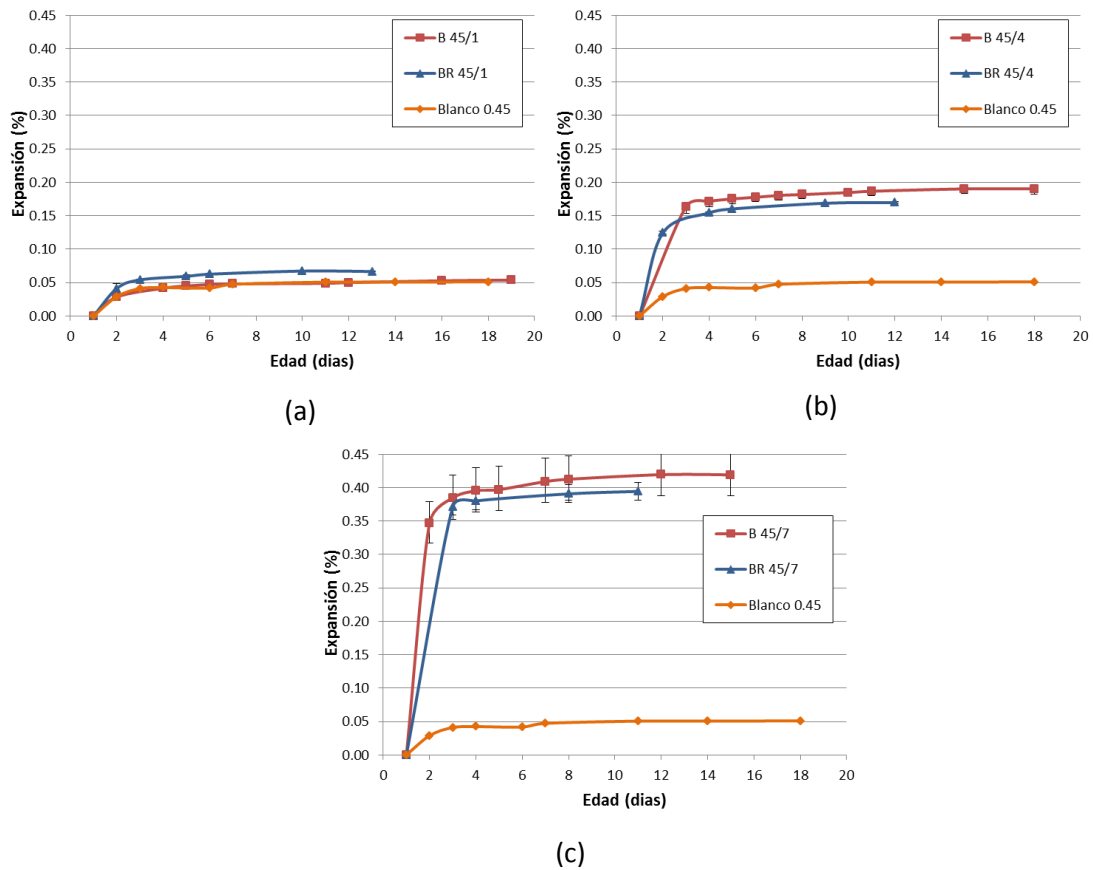


Figura 4.25 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo F2000 y a/c 0.45

En la Figura 4.26, se observa de nuevo el mismo comportamiento para las mezclas con relación a/c 0.45. Para mezclas con 1% de cal la diferencia en el nivel de expansión no es muy significativa, y al aumentar el contenido de cal, aumenta la expansión y aumenta la diferencia entre los dos tipos de cales. Al comparar este grupo de mezclas con los presentados en los grupos anteriores, observamos que al aumentar la relación a/c el nivel de expansión aumenta. En este punto ya se tiene claro que a mayor contenido de agua menor será la expansión, por lo tanto se puede deducir nuevamente que existe una gran parte de la expansión que se presenta durante las primeras 24 horas. Pues al ser más lenta la reacción de la muestra habrá mayor cantidad de datos registrados.

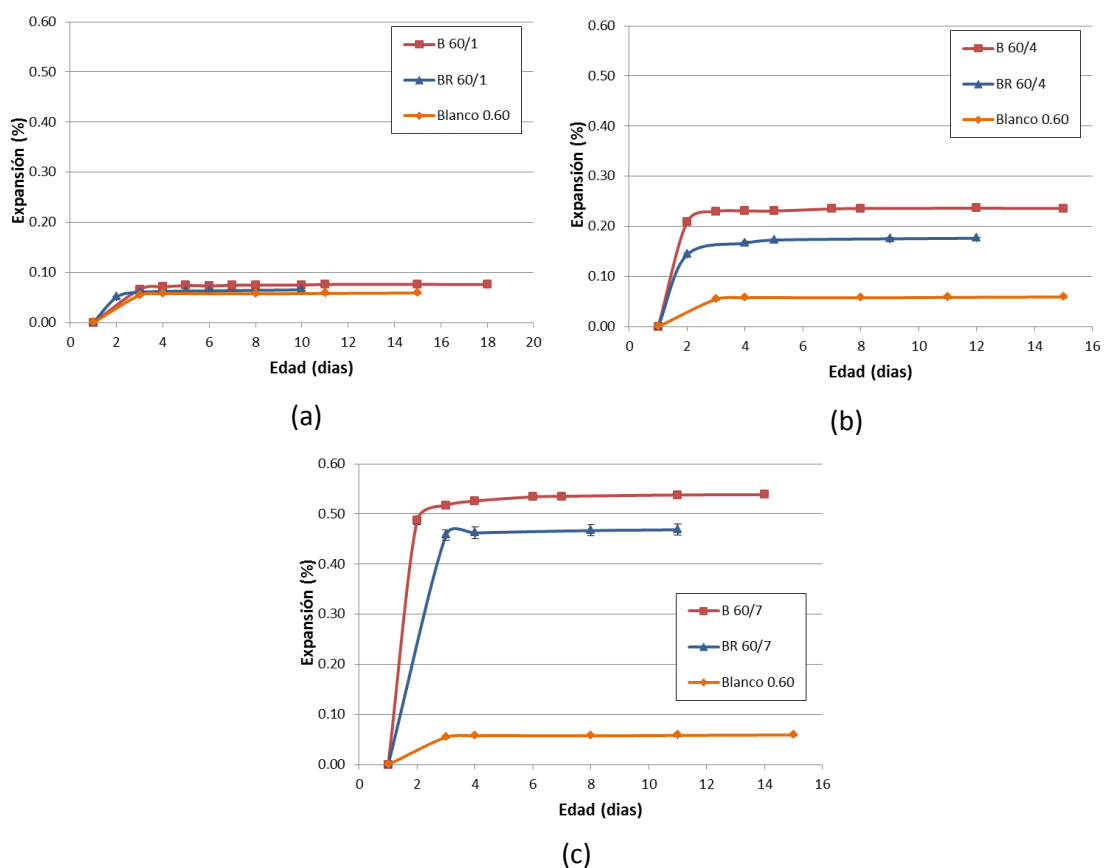


Figura 4.26 Resultados ensayo expansión con (a)1%,(b) 4% y (c) 7% de cal Tipo F2000 y a/c 0.60

4.4. CONCLUSIONES

Mediante el análisis de resultados se busca encontrar la relación que existe entre las diferentes variables estudiadas, además de corroborar las hipótesis planteadas, a continuación se presentan las principales conclusiones encontradas.

- Con este análisis de resultados, se ha corroborado la relación existente entre la velocidad de reacción y la temperatura máxima alcanzada durante el proceso de hidratación, estos resultados son acordes con el comportamiento esperado, ya que la temperatura es uno de los parámetros que más influencia tienen en el desarrollo de resistencias del hormigón, en este orden de ideas, un incremento de la temperatura hará que la mezcla madure más rápidamente. Esto se debe a una aceleración de la reacción de hidratación, la cual es activada térmicamente.
- Al aumentar el contenido de cal, aumenta el calor liberado, por lo tanto aumenta la velocidad de reacción, respecto a la obtenida con la muestra patrón. En consecuencia a esto se produce un aumento en la expansión final alcanzada.
- Al aumentar la relación agua cemento disminuye el calor de hidratación, debido a la menor cantidad de cemento dentro de la mezcla y por lo tanto disminuye la velocidad

de reacción de los procesos. Adicionalmente la expansión final disminuye, debido a la existencia de mayor contenido de vacíos que colaboran en la disipación de las tensiones producidas durante el fraguado de la mezcla.

- En las mezclas tipo 5/15, la cal sin aditivo(A), reacciona más rápidamente y alcanza mayor temperatura que las cales que se encuentran recubiertas (AR y ARF). Del mismo modo se encuentra que para las cales tipo F2000 se presenta una reacción más rápida y mayor temperatura en la cal recubierta (BR).
- La concentración de 1% no genera cambios significativos ni en temperatura ni en tiempo de reacción y por consiguiente no los genera en expansión.
- Analizando los resultados de expansión para muestras de cal tipo 5/15, en algunos casos no se cumple la correlación con el comportamiento para las pruebas de calorimetría. Esto puede estar asociado a que cada una de las dosificaciones contara con un tiempo de fin de fraguado diferente y es a partir de este punto donde se debería haber tomado el primer dato de expansión. Por lo tanto el tiempo cero de expansión no podrá ser tomado a las 24 horas para todas las mezclas.
- Para el caso de las cales tipo F2000, las cuales tiene una velocidad de reacción más lenta, si se conserva una correlación entre la velocidad de reacción, la temperatura alcanzada, y la expansión; en la cual, a mayor temperatura generada, mayor expansión alcanzara la muestra.
- En algunos casos se encontró que el nivel expansión alcanzada, se encuentra por debajo de la muestra patrón fabricada con solo cemento, este hecho, demuestra que existe una gran parte de la reacción que se está produciendo durante las primeras 24 horas. Teniendo en cuenta que existe un periodo sin datos, comprendido entre el fin de fraguado de la muestra y la toma de la primera medición. Dicha medición es la más importante para determinar la expansión producida, lo que en este punto se presenta como una gran limitación del procedimiento

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES GENERALES

Durante la realización de este trabajo se han utilizado diferentes técnicas, con el fin de lograr la caracterización de la cinética de reacción de los diferentes tipos de cales proporcionadas. Además de determinar cómo afecta la incorporación de dichos aditivos a las propiedades de las mezclas. A continuación, se presentan las principales conclusiones y aprendizajes que se han obtenido durante el desarrollo de este trabajo.

- Con este análisis de resultados, se ha corroborado la relación existente entre la velocidad de reacción y la temperatura máxima alcanzada durante el proceso de hidratación. A medida que la reacción se hace más exotérmica genera más expansión en el material.
- Al aumentar el contenido de cal, aumenta el calor liberado y por lo tanto aumenta la velocidad de reacción, respecto a la obtenida con la muestra patrón. En consecuencia a esto se produce un aumento en la expansión final alcanzada.
- Al aumentar la relación agua cemento disminuye el calor de hidratación y la velocidad de reacción de los procesos. Adicionalmente la expansión final disminuye, debido a la existencia de mayor contenido de vacíos que colaboran en la disipación de las tensiones producidas durante el fraguado de la mezcla.

5.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

- El método de Lambe no es apropiado para la medición de la expansión de cales, ya que sus resultados no son repetibles, debido a que no es posible garantizar que la compactación sea la misma en todas las muestras y además la distribución de la red porosa es diferente en cada muestra dependiendo en gran medida de esta compactación previa. Adicionalmente, el espacio en el cual se desarrollaron los ensayos no posee condiciones climáticas controladas, por lo que una pequeña variación en estas influye en la temperatura de los materiales utilizados y en las medidas de temperatura obtenidas durante el ensayo. En términos generales este ensayo maneja varias variables, que no han podido ser controladas en este ensayo por lo que no se considera un ensayo repetible.
- Con el procedimiento empleado para la medición de la expansión, no es posible determinar un valor máximo de expansión alcanzada, ya que claramente existe una expansión que se ha producido durante el tiempo comprendido entre el momento en el que ha terminado el fraguado y el momento en el que se ha tomado la el primer dato. Esta metodología solo podrá ser empleado para identificar las tendencias de cada una de las muestras.
- En el caso de la calorimetría, se ha visto como las condiciones de temperatura ambiente durante la realización de los ensayos influyen en gran medida en los resultados del ensayo. Por lo que se debe evitar en la medida de lo posible, cualquier interferencia con el medio ambiente.
- La diferencia en el efecto expansivo producido por cada una de las adiciones de cal depende básicamente de su proceso de fabricación y de la composición química que le dé el fabricante. Por lo tanto es importante conocer estas características, además de las propiedades físicas de cada material, para así determinar la compatibilidad entre este y el cemento y lograr aprovechar al máximo sus propiedades.
- El hecho que un tipo de cal reaccione demasiado rápido puede resultar perjudicial a la hora de ser empleado en mezclas de hormigón como adición para compensar la retracción. Esto debido a que los fenómenos expansivos podrían presentarse cuando aún la muestra se encuentra en estado plástico y la expansión producida será disipada. Si por el contrario la muestra no se expande lo suficiente no producirá el efecto de compensación de retracción deseado

5.3. PERSPECTIVAS FUTURAS

Este proyecto es un avance importante para el inicio del estudio de la viabilidad de uso de las adiciones de cal para generar hormigones expansivos, a partir de aquí se derivan varias profundizaciones para lograr llevar a punto el material.

- Continuar la caracterización química y de compatibilidad del material.
- Con el fin de optimizar el proceso de medición de la expansión, será necesario incluir un análisis previo de los tiempos de inicio y final de curado, con el fin de tener mediciones desde el momento que comienza la expansión en la mezcla.
- Debido a que las muestras estuvieron durante todo el periodo de medición dentro de la cámara húmeda, no se presentó una retracción por secado de la muestra, lo que no permitió evidenciar el efecto compensador de retracción de la cal. Para futuras campañas experimentales se debe adoptar un proceso mediante el cual la muestra permanezca durante los primeros 7 días dentro de la cámara húmeda y luego sea almacenada en una cámara con condiciones controladas, con el fin de analizar, la influencia del tiempo de curado y el efecto compensador de retracción de la cal, y así poder definir qué tipo de cal y que porcentaje logra finalmente minimizar o eliminar la retracción.
- Finalmente y después de haber determinado una dosificación idónea durante la experimentación correcta en pastas, será necesario replicar estos procesos en morteros y hormigones para evaluar la influencia de los áridos, además de evaluar otras características como la resistencia a flexión. Por último realizar una prueba de la cal y la dosificación escogida en tamaño real, con el fin de verificar, la reducción de la fisuración confirmar la posible reducción de las juntas de contracción.
- Verificar la incidencia que tiene el uso de CaO el comportamiento del material a flexión.
- El uso de CaO requiere entre 5 y 7 días de curado húmedo constante para lograr desarrollar completamente su potencial expansivo. Este curado en la práctica resulta un poco complicado, por lo que sería una gran ventaja lograr reducir este tiempo de curado húmedo.

CAPITULO 6. BIBLIOGRAFIA

- ACI 360 R, A. (2010). Guide to design of slabs-on-ground. *ACI committee 360R*.
- Alarcon, O. A. (2012). *Evaluacion de una alternativa para la construcción de pisos industriales de gran formato en colombia*. Bogota, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- ASTM. (09). *C878/C Standard test method for restrained expansion of shrinkage - compensating concrete*.
- Chen, W., & Brouwers, H. (2012). Hydration of mineral shrinkage-compensating admixture for concrete: An experimental and numerical study. *Construction and building materials* 26, 670 - 676.
- Collepardi, M., & Trolli, R. (2008). Crack-free concrete for outside industrial floors in the absence of wet curing. *Cement & Concrete Composites* 30, 887–891.
- Collepardi, M., Borsoi, A., & Collepardi, S. (2005). Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. *Cement & Concrete Composites* 27, 704–708.
- De Melo Neto, A. A. (2008). *ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ADITIVOS REDUTORES E COMPENSADORES DE RETRAÇÃO EM ARGAMASSAS E PASTAS COM CIMENTO DE ESCÓRIA*. Sao Paulo.

- Fernández Cánovas, M. (2007). *Hormigon*. Madrid: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Folliard, D., Cuyler, S., & Gregory, S. (2003). *Evaluation of Alternative Materials to Control Drying-Shrinkage Cracking in Concrete Bridge Decks*. Austin, Texas: Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- García Alarcon, O. (2012). *Evaluación de una alternativa para la construcción de pisos industriales de gran formato en Colombia*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- García Madrid, T., & Horstman Largacha, P. (1985). Hormigones y morteros sin retracción. *Revista de obras públicas*, 973 - 996.
- Gaurav, S., Lothenbach, B., & Juilland, P. (2011). The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures. *Cement and concrete research* 41, 218-219.
- Institute, A. A. (2010). *ACI 223R Guide for the use of shrinkage- compensating concrete*.
- Institute, A. C. (2010). *ACI committee 360R*.
- Konic, Z., & Malolepszy, J. (2007). Production of expansive additive to portland cement. *Journal of european ceramic society*, 605 - 609.
- Kumar Metha, P., & Monteiro, P. (2006). *CONCRETE, Microestructure, properties, and materials*. California: Mc Graw Hill.
- Lingling, X., & Min, D. (2005). Dolomite used as raw material to produce MgO-based expansive agent. *Cement and concrete research* 35, 1480-1485.
- Maltese, C., & Pistolesi, A. (2005). Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars. *Cement and concrete research*, 2244-2251.
- Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 551-558.
- Mo, L., Deng, M., & Wang, A. (2012). Effects of MgO-based expansive additive on compensating the shrinkage of cement paste under non-wet curing conditions. *Cement & Concrete Composites* 34, 377-383.
- Mora, J., Aguado, A., & Gettu, R. (2003). INFLUENCIA DE LOS ADITIVOS REDUCTORES DE RETRACCIÓN. *VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción*, Vol. II: Patología, pp. II.65 - II.72.

- Neville, A. (2011). *Properties of concrete 5th ed.* London: Pearson Education Limited.
- Opravil, T., & Ptacek, P. (2012). The synthesis and characterization of an expansive admixture for M-type cements II. The influence of free CaO to the formation of ettringite. *J therm anal calorim*, 517 -526.
- Rajabipour, F., & Gaurav, S. (2008). Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution. *Cement and concrete research*, 606 -615.
- Soler Ruiz, M. A. (2009). La retracción por secado del hormigón. *Premios Basf construction chemicals*.
- Troli, R., & Collepardi, M. (s.f.). *Shrinkage-compensating concretes for special structures*. Italia.
- Videla C, C., & Aguilar R., C. (s.f.). Evaluación de la efectividad de procedimientos para la evaluación de la retracción hidráulica en hormigones fabricados con cementos portland puzolánicos. *Ingeniería de construcción*, 17-26.
- Yan, P., & Xiao, Q. (2001). The effect of expansive agent and possibility of delayed ettringite formation in shrinkage-compensating massive concrete. *Cement and concrete research*, 335-337.