

# Desarrollo de materiales con retracción compensada a partir del óxido de calcio (CaO)

Tomo I: Cuerpo principal de la tesis

Tesis doctoral realizada por:

Cristina Fernández Rubio

dirigida por:

Sergio H. Pialarissi Cavalaro

Ignacio Segura Pérez

Barcelona, Diciembre 2017

Universitat Politècnica de Catalunya  
Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TESIS DOCTORAL







**Acta de calificación de tesis doctoral**

**Curso académico: 2017 - 2018**

Nombre y apellidos	CRISTINA FERNÁNDEZ RUBIO
Programa de doctorado	INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN
Unidad estructural responsable del programa	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**Resolución del Tribunal**

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de su tesis doctoral titulada “Desarrollo de materiales con retracción compensada a partir del óxido de calcio (CaO)”.

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

- NO APTO     
 APROBADO     
 NOTABLE     
 SOBRESALIENTE

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a		Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma)			
Vocal	Vocal	Vocal	Vocal

Barcelona a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2018.

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

- SÍ     
 NO

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado		Secretario de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado	

Barcelona a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2018.



*„Was ich tue, wenn ich nicht weiß, was ich tue“*

*Wernher von Braun*

*Ingeniero aeroespacial alemán.  
Jefe de diseño del cohete Saturno V, que llevó al hombre a la Luna*



*A mis yayos*



## -agradecimientos-

Aquestes son les últimes línies que escric en aquesta tesi, les quals em serviran per a fer un petit agraïment a totes aquelles persones que n'han format part directa o indirectament. En primer lugar, quisiera agradecer a mis tutores Nacho y Sergio por darme la oportunidad de entrar en este mundo de la investigación y guiarme durante estos cuatro años. Les agradezco también la paciencia, perseverancia y apoyo en esos momentos de incertidumbre durante el análisis de los resultados de los ensayos de laboratorio y por darme pautas para abordar los retos que se me iban planteando. También quisiera agradecer a los técnicos del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Lluís Agulló por su ayuda durante el montaje de ensayos, sus consejos y los buenos momentos pasados durante las largas jornadas en el laboratorio. En especial quisiera agradecer a Camilo, Jordi Cabrerizo y Robert.

Durante la primera fase de esta tesis también tuve la ocasión de trabajar con otros profesores a los cuales también les agradezco sus aportes a durante las campañas experimentales llevadas a cabo en elementos reales. En este agradecimiento es para Antonio Aguado, Joan Ramón Rosell, Joan Formosa y Marc Tous. Durante esta etapa agradezco también la participación de la empresa Cales de Pachs S.A. y en especial a Francesc Piñol por facilitarnos el material más importante para el desarrollo de esta investigación, como es la cal y permitir que la investigación se llevara a cabo en elementos reales fuera del laboratorio. Por otra parte, el desarrollo de esta tesis doctoral no habría sido posible sin el apoyo económico del Comissionat per a Universitats del DIUE de la Generalitat de Catalunya por medio de la beca FI-DGR 2013.

Durante el tiempo transcurrido en el doctorado me he cruzado con muchos compañeros, algunos con los que he tenido más contacto que con otros pero con los que hemos compartido muchas comidas en el comedor del laboratorio, cafés en el bar de camins y alguna que otra cena en ocasiones especiales. De todos ellos quisiera agradecer especialmente a los que han sido compañeros de despacho entre los que se encuentran Anna, Edu, Tai, Renan y Jorge. Además quisiera agradecer a Sandra por los momentos compartidos en el laboratorio cuando trabajábamos en su tesis doctoral y en mi tesis de master. También por ser la que de alguna manera me abrió el apetito a seguir en este mundo de la investigación.

També vull agrair a la meva família pel seu suport durant aquest temps i per donar-me forces per seguir endavant. Ja se que sou molts i espero no deixar-me a ningú: Mama, Papa, Sis i Ferran, yaya Teresa, yaya María, tiets (Cristi, Celes, Mercè, Jordi, Paco, Júlia, Antonio i Cati), cosins (Marta, Carlos, Irene, Ricard, Titus i Mario), y a mi otra familia americana por mandarme su apoyo por whatsapp y videollamadas.

No vull acabar els agraïments sense mencionar als amics, aquells que formen part de la nostra vida d'abans del doctorat i amb els que continuem compartint-la tot i que alguns estiguin a molts quilometres de distància. En especial aquest agraïment va dirigit als amics d'aquí, que son la Núria, l'Aleix, la Jenny, l'Ivan i els altres membres de la colla y al grupo de amigos del máster y que seguimos en contacto por whatsapp, que son Óscar, Juanjo, Mau, Karitas, Néstor, Jaime y Daniela.

Finalmente, quisiera agradecer a Carlos, por compartir conmigo este viaje y darme ánimos en los momentos en que más lo necesitaba. Por ser mi compañero en esta vida y formar parte de esta nueva aventura que nos espera.

A Islandia...



## -resumen-

La retracción del hormigón y los métodos actuales para mitigar este fenómeno se basan principalmente en la realización de juntas de retracción a las 24 horas, aproximadamente, del amasado de la mezcla. Estas juntas representan un punto crítico en los pavimentos debido a que pueden llegar a desencadenar procesos patológicos que van desde la rotura de los labios de la junta hasta la filtración de sustancias perjudiciales para el hormigón.

Las distintas patologías surgidas de la realización de las juntas, así como de la fisuración propia del hormigón han planteado el uso de materiales con retracción compensada para poder reducir la cantidad de juntas y mitigar las fisuras que aparecen en el elemento. En esta tesis doctoral se ha estudiado el efecto de la adición de CaO a la mezcla cementicia para la realización de hormigones de retracción compensada (HRC).

La primera línea de investigación se ha basado en el estudio a nivel de interacción química entre el cemento y la cal, contemplando la variación de tres variables principales como son la relación a/c, el porcentaje de cal añadido y el tipo de cal usado. Los resultados han evidenciado que existe una sinergia entre el cemento y la cal durante su hidratación, así como una competencia durante la hidratación del CaO con algunas de las fases presentes en el cemento. Así mismo, la adición de cal modifica los tiempos de fraguado de las distintas mezclas estudiadas, generando mezclas que fraguan en un tiempo menor al de una pasta de cemento sin adición de cal.

La segunda línea de investigación ha dejado patente la imposibilidad de medir el proceso de expansión que se da en este tipo de materiales durante las primeras 24 horas posteriores al mezclado mediante ensayos normalizados. Los resultados obtenidos indican que tanto el proceso de expansión como el de generación de tensiones se dan, principalmente, durante este período de tiempo, por lo que ha sido necesario plantear nuevos ensayos de diseño propio para poder caracterizar ambos procesos. El método del molde mixto ha permitido determinar la influencia de la adición de cal en morteros. Así se han obtenido valores máximos de deformación generada por esta adición, así como los valores de tensión que estos materiales son capaces de alcanzar. En la mayoría de los casos se ha observado que la tensión obtenida es superior a la propuesta en la bibliografía, sin que se observaran daños en la probeta endurecida.

La tercera línea de investigación ha dado lugar a un modelo numérico simplificado en el que se han modelizado las curvas de expansión y tensión generadas por el material desde los pocos minutos posteriores al amasado. Mediante la aplicación del modelo se ha establecido que no toda la cal añadida genera expansión efectiva en el material, sino que parte de esta queda amortiguada por hidratarse en un medio plástico. Por otra parte, al introducir la curva de deformación para el cálculo de la tensión generada en los ensayos reales se ha observado, igualmente, un segundo amortiguamiento. Esto pone de manifiesto que no puede obtenerse la tensión del material por la multiplicación directa de la deformación por el módulo, sino que es necesario introducir un factor de amortiguamiento en la ecuación.

Finalmente, las experiencias reales llevadas a cabo, principalmente en elementos tipo losa, han permitido observar el comportamiento real de la mezcla en una situación de no control del sistema de producción de la mezcla, así como durante el transporte y vertido. No se han encontrado incompatibilidades entre la cal y el uso de armado convencional o de fibras. Por otra parte, los ensayos de resistencia muestran que los hormigones con adición de cal son más resistentes que los que los de referencia sin cal.



---

## -abstract-

The shrinkage of concrete and the current methods to mitigate this phenomenon are mainly based on the realization of retraction joints approximately 24 hours after the mixing. These joints represent a critical point in the pavements due to the fact that they can trigger pathological processes. These processes go from the rupture of the lips of the joint to the filtration of substances that can be harmful to the concrete.

The different pathologies arising from the realization of the joints, as well as the concrete cracking of the concrete have raised the use of materials with compensated shrinkage in order to reduce the number of joints and mitigate the cracks that appear in the element. In this doctoral thesis the effect of the addition of CaO to the cementitious mixture for the realization of compensated shrinkage concretes (SCC) has been studied.

The first line of research is based on the study of the chemical interaction between cement and lime, considering the variation of three main variables such as the ratio w/c, the percentage of lime added and the type of lime used. The results have shown that there is a synergy between cement and lime during hydration, as well as competition during the hydration of CaO with some of the phases present in the cement. Likewise, the addition of lime modifies the setting times of the different mixtures studied, generating mixtures that set in a shorter time than a cement paste without the addition of lime.

The second line of research has shown the impossibility of measuring the expansion process that occurs in this type of material during the first 24 hours after mixing by using standardized tests. The obtained results indicate that both the process of expansion and the generation of tensions occur, mainly, during this period of time. Due to this fact it has been necessary to propose new tests in order to characterize both processes. The method of the mixed mould has allowed to determine the influence of the addition of lime in mortars. Thus, maximum values of deformation generated by this addition have been obtained, as well as the stress values that these materials can achieve. In most cases it has been observed that the stress obtained is higher than that proposed in the literature. Any damage has been observed in the hardened specimen despite the stress values accomplished.

The third line of research has given rise to a simplified numerical model in which the expansion and stress curves generated by the material have been modelled since the few minutes after the mixtures. Through the application of the model it has been established that not all the added lime generates effective expansion in the material. Part of it is damped by hydrating in a plastic material. On the other hand, when introducing the deformation curve for the calculation of the tension generated in the real tests, a second damping has also been observed. This shows that the tension of the material cannot be obtained by direct multiplication of the deformation by the elastic module. In order to obtain the stress value is necessary to introduce a damping factor in the equation.

Finally, the real experiences carried out, mainly in slab-type elements, have allowed to observe the real behavior of the mixture in a situation of non-control of the production system of the mixture, as well as during transportation and dumping. No incompatibilities have been found between lime and the use of conventional reinforcement or fibers. On the other hand, the compression tests show that the concretes with the addition of lime are more resistant than the reference ones without lime.



## -índice general-

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 RAZÓN DE SER.....	3
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	7
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL .....	8
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....</b>	<b>11</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	11
2.2 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND .....	12
2.3 INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE CAL EN LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.....	15
2.4 EL FENÓMENO DE LA RETRACCIÓN .....	17
2.4.1 <i>Tipos de retracción.....</i>	<i>17</i>
2.4.2 <i>Factores que influyen en la retracción. ....</i>	<i>19</i>
2.5 HORMIGÓN CON RETRACCIÓN COMPENSADA .....	23
2.5.1 <i>Funcionamiento y descripción.....</i>	<i>24</i>
2.5.2 <i>Factores que influyen en la expansión .....</i>	<i>25</i>
2.6 DISEÑO DE HORMIGÓN CON RETRACCIÓN COMPENSADA .....	26
2.7 MEDICIÓN DE LA EXPANSIÓN EN EL HORMIGÓN .....	27
2.7.1 <i>Medición de la expansión y diseño.....</i>	<i>27</i>
2.8 APLICACIONES DEL HORMIGÓN CON RETRACCIÓN COMPENSADA.....	29
2.9 CONCLUSIONES PARCIALES .....	30
<b>CAPÍTULO 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL: PLANIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....</b>	<b>31</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	31
3.2 PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL.....	32
3.2.1 <i>Nomenclatura de las mezclas estudiadas.....</i>	<i>33</i>
3.3 ANÁLISIS DEL PROCESO DE HIDRATACIÓN.....	34
3.3.1 <i>Materiales.....</i>	<i>34</i>
3.3.2 <i>Dosificación .....</i>	<i>35</i>
3.3.3 <i>Caracterización de los materiales base .....</i>	<i>38</i>
3.3.4 <i>Ensayos para la caracterización de pastas.....</i>	<i>41</i>
3.4 ANÁLISIS DEL PROCESO DE EXPANSIÓN .....	46
3.4.1 <i>Materiales.....</i>	<i>46</i>
3.4.2 <i>Dosificación .....</i>	<i>46</i>
3.4.3 <i>Ensayos para la caracterización del proceso expansivo.....</i>	<i>47</i>
3.4.4 <i>Ensayos para la caracterización de las propiedades básicas del material .....</i>	<i>55</i>
<b>CAPÍTULO 4. ETAPA I: ANÁLISIS DEL PROCESO DE HIDRATACIÓN EN PASTAS.....</b>	<b>57</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	57
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES BASE .....	58
4.2.1 <i>Propiedades físicas.....</i>	<i>58</i>
4.2.2 <i>Composición química y mineralógica .....</i>	<i>59</i>
4.2.3 <i>Determinación de la reactividad potencial.....</i>	<i>61</i>

4.3	EVALUACIÓN DEL INCREMENTO DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO.....	62
4.4	ESTUDIO DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE CALORIMETRÍA SEMIADIABÁTICA.....	64
4.4.1	<i>Influencia del contenido de cal</i> .....	66
4.4.2	<i>Influencia de la finura de la cal o de la superficie específica (BET)</i> .....	70
4.4.3	<i>Influencia de la aditivación de la cal</i> .....	71
4.4.4	<i>Influencia de la relación a/c</i> .....	73
4.5	CARACTERIZACIÓN DE LOS TIEMPOS DE FRAGUADO .....	76
4.5.1	<i>Influencia del contenido de cal y de la relación a/c</i> .....	77
4.5.2	<i>Influencia de la finura de la cal</i> .....	78
4.5.3	<i>Influencia de la aditivación de la cal</i> .....	79
4.6	CALORIMETRÍA ISOTÉRMICA.....	80
4.6.1	<i>Influencia del contenido de cal</i> .....	81
4.6.2	<i>Influencia de la finura de la cal o superficie específica (BET)</i> .....	84
4.6.3	<i>Influencia de la aditivación de la cal</i> .....	85
4.6.4	<i>Influencia de la relación a/c</i> .....	88
4.6.5	<i>Evolución de la energía normalizada</i> .....	89
4.7	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X EN CONTINUO.....	92
4.7.1	<i>Influencia del contenido de cal</i> .....	96
4.7.2	<i>Influencia de la finura de la cal</i> .....	98
4.7.3	<i>Influencia de la aditivación de la cal</i> .....	100
4.8	CONCLUSIONES PARCIALES .....	102
4.8.1	<i>Interpretación global de las variables analizadas</i> .....	104
<b>CAPÍTULO 5. PARTE II: ANÁLISIS DEL PROCESO EXPANSIVO EN MEZCLAS CEMENTO-CAL .....</b>		<b>111</b>
5.1	INTRODUCCIÓN .....	111
5.2	ADAPTACIÓN DE LOS ENSAYOS NORMALIZADOS EXISTENTES .....	113
5.2.1	<i>Caracterización de la variación dimensional</i> .....	113
5.2.2	<i>Caracterización de la variación dimensional de pastas de cemento y cal</i> .....	114
5.3	MÉTODO DEL ANILLO.....	116
5.4	MÉTODO DEL MOLDE MIXTO (DEFORMACIÓN/TENSIÓN).....	119
5.4.1	<i>Caracterización de la deformación libre</i> .....	119
5.4.2	<i>Caracterización de la tensión de confinamiento</i> .....	124
5.4.3	<i>Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del material endurecido</i> .....	127
5.5	ANÁLISIS CONJUNTO DE LOS RESULTADOS .....	129
5.6	ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA .....	130
5.6.1	<i>Influencia del contenido de cal</i> .....	130
5.6.2	<i>Influencia de la aditivación de la cal</i> .....	131
5.6.3	<i>Influencia de la superficie específica</i> .....	132
5.7	CONCLUSIONES PARCIALES .....	133
5.7.1	<i>Interpretación global de las variables analizadas</i> .....	134
<b>CAPÍTULO 6. MODELIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE REACCIÓN, DEFORMACIÓN E INCREMENTO DE LA TENSIÓN EN MORTEROS CON ÓXIDO DE CALCIO .....</b>		<b>137</b>
6.1	INTRODUCCIÓN .....	137
6.2	PLANTEAMIENTO TEÓRICO DE LAS DEFORMACIONES Y LAS TENSIONES .....	138
6.3	ESTIMACIÓN DE LA DEFORMACIÓN POTENCIAL.....	139
6.3.1	<i>Hidratación de la cal</i> .....	139
6.3.2	<i>Estimación de la expansión generada</i> .....	142

---

6.4	ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN DE LAS CURVAS DE EXPANSIÓN .....	144
6.4.1	<i>Parametrización de las curvas de deformación</i> .....	144
6.5	AJUSTE DE LAS CURVAS DE EXPANSIÓN MEDIANTE ENSAYOS DE CALORIMETRÍA Y VICAT .....	150
6.6	MODELO NUMÉRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN .....	153
6.6.1	<i>Análisis</i> .....	156
6.7	CONCLUSIONES PARCIALES .....	157
<b>CAPÍTULO 7. EXPERIENCIAS REALES DEL HRC EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN .....</b>		<b>159</b>
7.1	INTRODUCCIÓN .....	159
7.1.1	<i>Materiales y dosificaciones</i> .....	160
7.1.2	<i>Influencia de la puesta en obra</i> .....	162
7.1.3	<i>Hormigón endurecido</i> .....	164
7.2	CONCLUSIONES PARCIALES .....	166
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....</b>		<b>169</b>
8.1	INTRODUCCIÓN .....	169
8.2	CONCLUSIONES GENERALES.....	170
8.3	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS .....	170
8.4	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	175
<b>ANEJO 1. ENSAYO DEL ANILLO Y PLANOS DEL MOLDE MIXTO.....</b>		<b>181</b>
9.1	INTRODUCCIÓN .....	181
9.1.1	<i>Base teórica del ensayo de expansión</i> .....	183
9.1.2	<i>Planos de despiece del molde usado en el Método del molde mixto</i> .....	187



## -índice de figuras-

Figura 1. 1 – a) pavimento de hormigón fisurado; b) suelo arcilloso seco.....	3
Figura 1. 2 – Cambios dimensionales de un hormigón convencional y de un HRC (ACI Comitee, 2010; Mehta & Monteiro, 2006) .....	3
Figura 1. 3 – Comparación de resistencias HRC vs. OPC (Troli & Collepari, n.d.).....	4
Figura 1. 4 – Deformación de un HRC con adición de CaO o con adición de CaO y un SRA (M. Collepari et al., 2008; Troli & Collepari, n.d.).....	4
Figura 1. 5 – Pavimentos interiores de hormigón; a y b) zonas de aparcamiento.....	5
Figura 1. 6 – Pavimentos de HRC; a) pavimento interior; b) pavimento de parquin exterior .....	6
Figura 1. 7 – Lesiones en juntas: a) rotura de labios y desaparición del sellado; b) fisuración alrededor de un cruce de juntas.....	6
Figura 1. 8 – Retracción por secado; a) H. convencional; b) elemento de acero; c) HRC.....	7
Figura 1. 9 – Esquema de contenido de la tesis .....	8
Figura 2. 1 – Variación de temperatura durante la hidratación de una muestra de cemento tipo I, con una relación a/c de 0,35 (elaboración propia) .....	13
Figura 2. 2 – Consumo de las fases del clínker durante la hidratación del cemento Portland (Hewlett & Massazza, 2003).....	14
Figura 2. 3 – Formación de productos hidratados durante la hidratación del cemento Portland (Hewlett & Massazza, 2003) .....	14
Figura 2. 4 – Retracción del hormigón en función del agua de amasado.....	20
Figura 2. 5 – Influencia de la relación A/C y el contenido de árido en la retracción (Neville, 2011) .	20
Figura 2. 6 – Relación entre la retracción y el tiempo para hormigones almacenados a diferentes humedades relativas (Neville, 2011) .....	21
Figura 2. 7 – Influencia del contenido de cemento en la retracción (Canovas, 2007) .....	22
Figura 2. 8 – Variables que interactúan en la retracción del hormigón (Ruiz, 2009) .....	22
Figura 2. 9 –Comportamiento del hormigón con cemento expansivo (Mehta & Monteiro, 2006).....	23
Figura 2. 10 – Esquema para conseguir hormigones compensadores de retracción (Corinaldesi, 2012; Maltese et al., 2005; Mather, 1970; Mehta & Monteiro, 2006; Onoda Cement Company, n.d.) .....	24
Figura 2. 11 – Estimación de la expansión mínima para sistemas basados en la formación de etringita (a) (Henry G. Russell, 1973) y en la formación de hidróxido cálcico (b) (H. G. Russell et al., 2002) .....	26
Figura 2. 13 – Roca rota mediante el uso de morteros expansivos (Fuente: cemento BROKE S.L.) ...	27
Figura 2. 14 – Diseño de un HRC.....	27
Figura 2. 15 – Molde para medida de expansión restringida (Alarcon, 2012).....	28
Figura 2. 16 – Museo MAXXI, en Italia, realizado con HRC.....	29
Figura 3. 1 – Esquema de la campaña experimental.....	33
Figura 3. 2 - Esquema del interior de un picnómetro de Helio .....	38
Figura 3. 3 – Proceso de preparación del cemento anhidro para ensayo de DRX. a) portamuestras estándar; b) introducción del polvo a analizar; c) enrasado del material y d) final de la preparación .....	40
Figura 3. 4 – Ensayo de reactividad frente al ácido cítrico.....	40
Figura 3. 5 – Ensayo de calorimetría cuasiadiabática; a) materiales y calorímetro; b) software de adquisición.....	41
Figura 3. 6 - Dimensiones y distribución de las muestras en el calorímetro (mm). Planta y sección. ....	42

Figura 3. 7 - Detalle de colocación de los termopares en la tapa del calorímetro. a) tapa superior con las sondas; b) detalle del termopar antes de introducirse en la muestra.....	42
Figura 3. 8 - Detalle del calorímetro. a) calorímetro y data logger; b) calorímetro en funcionamiento .....	43
Figura 3. 9 - Portamuestras para ensayo de calorimetría isotérmica; a) Portamuestras con marca de aforo; b) final de ensayo a 48h; c) total de muestras ensayadas simultáneamente.....	43
Figura 3. 10 - Ensayo inicio y final de fraguado (UNE-EN 196-3).....	46
Figura 3. 11 - Curva granulométrica del árido normalizado CEN (0-2mm) .....	46
Figura 3. 12 - Ensayo Lambe modificado para CaO .....	47
Figura 3. 13 - Procedimiento de ensayo UNE 80113; a) moldeado de las probetas; b) probetas desmoldadas; c) proceso de medición.....	48
Figura 3. 14 - Sistema de medición de US en continuo.....	49
Figura 3. 15 - Anillo para ensayo de expansión.....	50
Figura 3. 16 - Adquisición de datos de las galgas y de las sondas de temperatura .....	51
Figura 3. 17 - Croquis de las piezas del molde en planta (a) y dimensiones generales (b) .....	52
Figura 3. 18 - Detalle de colocación de la célula de carga para el ensayo de tensión de confinamiento .....	52
Figura 3. 19 - Detalle de colocación del LVDT para el ensayo de deformación libre.....	53
Figura 3. 20 - Componentes necesarios para el ensayo de tensión de confinamiento y deformación libre .....	53
Figura 3. 21 - División de probeta normalizada para ensayos complementarios.....	55
Figura 3. 22 - Representación de la metodología de medición de US en probetas cúbicas .....	56
Figura 4. 1 - Distribución de tamaños de partícula de la muestra de cal A3Ad.....	59
Figura 4. 2 - Patrones de DRX de las cales anhidras.....	60
Figura 4. 3 - Determinación de la reactividad potencial de las diferentes muestras de cal anhidra.	61
Figura 4. 4 - Resultados de la calorimetría cuasiadiabática y valores analizados para mezclas de cemento y cal del tipo A3Ad.....	62
Figura 4. 5 - Evolución de la temperatura y del tiempo a medida que aumenta la adición de cemento en una cantidad fija de cal A3Ad .....	63
Figura 4. 6 - Puntos significativos en las curvas de temperatura de hidratación.....	64
Figura 4. 7 - Curvas de temperatura de hidratación de 3 pastas juntamente con una curva teórica	65
Figura 4. 8 - Curvas de temperatura de hidratación de 3 pastas juntamente con una curva teórica	66
Figura 4. 9 - Valores de a) temperatura y b) tiempo para los picos 1-d, 2-L, 3-S y 4-S de pastas con un 1% de cal y relación a/c 0,35.....	66
Figura 4. 10 - Valores de a) temperatura y b) tiempo para los picos 1-A, 2-L, 3-S y 4-S de pastas con un 4% de cal.....	67
Figura 4. 11 - Valores de temperatura y tiempo para los picos 1-d, 2-L, 3-S y 4-S de pastas con un 7% de cal.....	68
Figura 4. 12 - Temperatura de los puntos característicos para pastas de cemento con los 3 porcentajes de cal (a/c 0,35) .....	69
Figura 4. 13 - Tiempo de los puntos característicos para pastas de cemento con los 3 porcentajes de cal (a/c 0,35).....	70
Figura 4. 14 - Valores de tiempo del pico 1-d para las 15 muestras estudiadas (a/c 0,35).....	70
Figura 4. 15 - Valores de temperatura de los cuatro picos estudiados para pastas de cemento y cal (A2Ad y A3Ad) en función de la relación a/c y del porcentaje de cal.....	71
Figura 4. 16 - Valores de tiempo de los cuatro picos estudiados para pastas de cemento y cal (A2Ad y A3Ad) en función de la relación a/c y del porcentaje de cal .....	71

Figura 4. 17 – Temperatura de los cuatro picos estudiados para pastas de cemento y cal (A1Na y A2Ad).....	72
Figura 4. 18 – Valores de tiempo de los cuatro picos estudiados para pastas de cemento y cal (A1Na y A2Ad) en función de la relación a/c y del porcentaje de cal .....	72
Figura 4. 19 – Curva de temperatura de hidratación en función del tiempo para tres pastas de cemento, en las que dos de ellas contienen cal.....	73
Figura 4. 20 – Curvas de temperatura de hidratación en función del tiempo para pastas de cemento sin cal al variar la relación a/c .....	74
Figura 4. 21 – a) Valores de temperatura y b) tiempos de los puntos 1-d, 2-L, 3-S y 4-S para pastas de cemento .....	74
Figura 4. 22 – Temperatura de hidratación para pastas con relaciones a/c 0,35; 0,45 y 0,60 .....	75
Figura 4. 23 – Valores de temperatura del pico 4-S para todas las dosificaciones realizadas .....	75
Figura 4. 24 – Valores de tiempo en alcanzar el pico 4-S para todas las dosificaciones realizadas....	76
Figura 4. 25 – Tiempos de fraguado para las dosificaciones con la cal A1Na .....	77
Figura 4. 26 – Influencia del porcentaje de cal (a) y la relación a/c (b) en los tiempos de fraguado para la cal A1Na.....	77
Figura 4. 27 – Influencia de la finura de la cal en los tiempos de fraguado para las cales A2Ad y A3Ad .....	78
Figura 4. 28 – Influencia de la aditivación de la cal en los tiempos de fraguado para las cales A1Na y A2Ad .....	79
Figura 4. 29 – Influencia de la aditivación de la cal en los tiempos de fraguado para las cales B1Na y B2Ad .....	79
Figura 4. 30 – Puntos significativos en las curvas de calor de hidratación de pastas de cemento (a/c 0,45 y CEM 52,5R) .....	80
Figura 4. 31 – Puntos significativos en las curvas de calor de hidratación de pastas de cemento y cal (a/c 0,45, CEM 52,5R y cal B2Ad-14%).....	80
Figura 4. 32 – Influencia del porcentaje de cal en el flujo de calor para todas las pastas en el pico 3-L <sub>2</sub> .....	82
Figura 4. 33 – Influencia del porcentaje de cal en el tiempo para todas las pastas en el pico 3-L <sub>2</sub> .....	83
Figura 4. 34 – Relación entre la saturación del medio de iones Ca <sup>2+</sup> y el final del período durmiente de la curva de hidratación del cemento .....	83
Figura 4. 35 – Influencia del porcentaje de cal en el flujo de calor para todas las pastas en el pico 5-S <sub>2</sub> .....	84
Figura 4. 36 – Influencia del porcentaje de cal en el tiempo para todas las pastas en el pico 5-S <sub>2</sub> .....	84
Figura 4. 37 – Influencia de la finura de la cal en el flujo de calor para las cales A2Ad y A3Ad en los picos 3-L <sub>2</sub> , 5-S <sub>2</sub> y 6-A <sub>2</sub> .....	85
Figura 4. 38 – Influencia de la finura de la cal en los tiempos para las cales A2Ad y A3Ad en los picos 3-L <sub>2</sub> , 5-S <sub>2</sub> y 6-A <sub>2</sub> .....	85
Figura 4. 39 – Influencia de la aditivación de la cal en el flujo de calor para las cales A1Na y A2Ad en los picos 3-L <sub>2</sub> , 5-S <sub>2</sub> y 6-A <sub>2</sub> .....	86
Figura 4. 40 – Influencia de la aditivación de la cal en los tiempos para las cales A1Na y A2Ad en los picos 3-L <sub>2</sub> , 5-S <sub>2</sub> y 6-A <sub>2</sub> .....	86
Figura 4. 41 – Influencia de la aditivación de la cal en el flujo de calor para las cales B1Na y B2Ad en los picos 3-L <sub>2</sub> , 5-S <sub>2</sub> y 6 .....	87
Figura 4. 42 – Influencia de la aditivación de la cal en los tiempos para las cales B1Na y B2Ad en los picos 3-L <sub>2</sub> , 5-S <sub>2</sub> y 6-A <sub>2</sub> .....	87

Figura 4. 43 – Influencia de la relación a/c en el flujo de calor para todas las pastas con el 0% y el 7% de adición en los tres picos analizados .....	88
Figura 4. 44 – Influencia de la relación a/c en los tiempos para todas las pastas con el 0% y el 7% de adición en los tres picos analizados.....	89
Figura 4. 45 – Evolución de la energía en pastas de cemento con cal A1Na en función del porcentaje de cal.....	90
Figura 4. 46 – Evolución de la energía en pastas de cemento con cal B1Na en función del porcentaje de cal.....	90
Figura 4. 47 – Evolución de la energía en pastas de cemento con cal A1Na en función de la relación a/c.....	91
Figura 4. 48 – Evolución de la energía en pastas de cemento con cal B1Na en función de la relación a/c.....	92
Figura 4. 49 – Evolución de las fases del cemento 52,5R (a/c 0,45) obtenidas mediante el ensayo de DRX.....	93
Figura 4. 50 – Evolución de las fases de las pastas de cemento y cal tipo A (7%; a/c 0,45) obtenidas mediante el ensayo de DRX .....	94
Figura 4. 51 – Evolución de las fases de las pastas de cemento y cal tipo B (7%; a/c 0,45) obtenidas mediante el ensayo de DRX .....	94
Figura 4. 52 – Evolución de las fases de las pastas de cemento y cal (14%; a/c 0,45) obtenidas mediante el ensayo de DRX .....	95
Figura 4. 53 – Evolución de las fases de CaO (a) y de portlandita (b) para las dosificaciones con las cales B1 y B2 para los porcentajes de 7% y 14% de CaO (a/c 0,45) y el patrón .....	96
Figura 4. 54 – Evolución de las fases de alita (a y c) y de etringita (b y d) para las dosificaciones con las cales B1 y B2 para los porcentajes de 7% y 14% de CaO (a/c 0,45) y el patrón (CEM 45).....	97
Figura 4. 55 – Evolución de las fases de CaO (a) y de portlandita (b) para las dosificaciones con las cales A2 y A3 para el porcentaje de 7% de CaO (a/c 0,45) y el patrón.....	99
Figura 4. 56 – Evolución de las fases de alita (a) y de etringita (b) para las dosificaciones con las cales A2 y A3 para el porcentaje de 7% de CaO (a/c 0,45) y el patrón .....	99
Figura 4. 57 – Evolución de las fases de CaO (a) y de portlandita (b) para las dosificaciones con las cales A1 y A2 para el porcentaje de 7% de CaO (a/c 0,45) y el patrón.....	100
Figura 4. 58 – Evolución de las fases de alita (a) y de etringita (b) para las dosificaciones con las cales A1 y A2 para el porcentaje de 7% de CaO (a/c 0,45) y el patrón .....	101
Figura 4. 59 – Gráfico de evolución de las fases (a) etringita y (b) portlandita para todas las dosificaciones estudiadas en DRX .....	103
Figura 4. 60 – Gráfico de evolución de las fases (a) CaO y (b) alita para todas las dosificaciones estudiadas en DRX.....	103
Figura 4. 61 – Proceso de disolución de la alita y de formación de C-S-H y CH .....	108
Figura 4. 62 – Proceso de disolución del aluminato tricálcico y los sulfatos y de formación de la etringita.....	109
Figura 5. 1 – Esquema de la campaña experimental para la caracterización del proceso expansivo en morteros con adición de cal .....	112
Figura 5. 2 – Curvas de expansión de las cales anhidras A1Na (a) y B1Na (b) mediante el ensayo Lambe modificado .....	113
Figura 5. 3 – Patrones de deformación de la misma cal observados de manera sistemática .....	114
Figura 5. 4 – Valores de expansión para pastas de cemento con distinto ratio a/c .....	114
Figura 5. 5 – Valores de expansión para las pastas de cemento y cal y para el patrón sin cal, en función de la relación a/c. (Variable analizada: %CaO) .....	115

Figura 5. 6 – Representación gráfica de la hipótesis de expansión no medida durante las primeras 24 horas que permanecen en el molde .....	116
Figura 5. 7 – Método propio I. Evolución de las expansiones para la dosificación MB1Na45-7 .....	117
Figura 5. 8 – Método propio I. Evolución de las tensiones para la dosificación MB1Na45-7 .....	118
Figura 5. 9 – Estado final del anillo metálico del Método del anillo .....	118
Figura 5. 10 – Comprobación visual de la expansión del mortero; a) inicio del ensayo, b) final del ensayo con el mortero endurecido.....	119
Figura 5. 11 – Curvas de caracterización de la deformación libre para las dosificaciones ensayadas .....	120
Figura 5. 12 – Comparación de las curvas de temperatura y deformación para las dosificaciones MB1Na45-7 (a) y MB1Na45-14 (b) .....	121
Figura 5. 13 – Curvas de deformación para determinar la influencia del contenido de cal (morteros con adición de cal del tipo B1Na y B2Ad) .....	121
Figura 5. 14 – Ensayo de tensión de confinamiento .....	124
Figura 5. 15 – Curvas de caracterización de la tensión de confinamiento para las dosificaciones MC45-0, MB2Ad45-7 y MB2Ad45-14 .....	124
Figura 5. 16 – Curvas de tensión para determinar la influencia del contenido de cal (morteros con adición de cal del tipo B1Na y B2Ad) .....	125
Figura 5. 17 – Relación entre los valores de tensión y deformación a las 24 horas de los morteros ensayados.....	130
Figura 5. 18 – Ensayo de ultrasonidos en continuo.....	130
Figura 5. 19 – Curvas de evolución de la velocidad de los US para el análisis de la influencia del aumento del contenido de cal a) morteros con cal B1Na y patrón y b) morteros con cal B2Ad y patrón.....	131
Figura 5. 20 – Curvas de evolución de la velocidad de los US para el análisis de la influencia de la aditivación de la cal.....	132
Figura 5. 21 – Curvas de evolución de la velocidad de los US para el análisis de la influencia de la superficie específica.....	133
Figura 6. 1 – Esquema representativo de la obtención de las deformaciones teóricas y reales.....	139
Figura 6. 2 – Cantidad de $\text{Ca(OH)}_2$ que aporta el CaO y los silicatos a las 48 horas del inicio del mezclado; a) valores en gramos b) valores porcentuales absolutos .....	141
Figura 6. 3 – Influencia de los parámetros A1, A2, p y $x_0$ en las curvas .....	145
Figura 6. 4 – Curva de deformación real vs. Curva obtenida con la ecuación [6.8] para el mortero MA1Na45-7.....	145
Figura 6. 5 – Curva de deformación experimental y teórica con los parámetros de la tabla 6.6 de los morteros MA1Na45-7 y MB1Na45-7 (Ajuste 1) .....	147
Figura 6. 6 – Curva de deformación experimental y teórica con los parámetros de la tabla 6.7 de los morteros MA3Ad45-7 y MB2Ad45-7 (Ajuste 2) .....	147
Figura 6. 7 – Curva de deformación experimental y teórica con los parámetros de la tabla 6.7 de los morteros MA1Na45-7, MB1Na45-7 y MB1Na45-14 (Ajuste 3) .....	148
Figura 6. 8 – Curva de deformación experimental y teórica de los morteros MA3Ad45-7, MB2Ad45-7, MB1Na45-14 y MB2Ad45-14 (Ajuste 4).....	149
Figura 6. 9 – Gráfico de interacción de las curvas de temperatura, deformación y tiempos de inicio (IF) y final de fraguado (FF) para el mortero MB1Na45-7.....	150
Figura 6. 10 – Gráfico de interacción de las curvas de flujo de calor, deformación y tiempos de inicio y final de fraguado para el mortero MB1Na45-7 .....	151

---

Figura 6. 11 – Esquema del planteamiento de los modelos numéricos a partir de los ensayos de ultrasonidos y de deformación .....	153
Figura 6. 12 – Resultados obtenidos al aplicar el Modelo de acumulación lineal en los morteros MA1Na45-7 y MB2Ad45-14.....	154
Figura 6. 13 – Resultados obtenidos al aplicar el Modelo de acumulación de las diferencias en los morteros MA1Na45-7 y MB2Ad45-14.....	155
Figura 6. 14 – Resultados obtenidos al aplicar la ecuación [6.16] para la determinación de la tensión en los morteros MA1Na45-7 y MB2Ad45-14.....	157
Figura 7. 1 – a) vertido del hormigón; b) cono de Abrams.....	163
Figura 7. 2 – Fisuración en losas: a) losa no fisurada (Ref.18) y b) losa con fisuras (Ref.9) .....	163
Figura 7. 3 – Fisuración en losas Ref.: 4 y 5: a) sistemática en carril y b) aleatoria en superficie....	166
Figura A1. 1 – Anillo para ensayo de expansión .....	182
Figura A1. 2 – Adquisición de datos de las galgas y de las sondas de temperatura .....	183
Figura A1. 3 – Esquema de las deformaciones contempladas para el cálculo .....	184
Figura A1. 4 – Fuerzas actuantes durante el ensayo de expansión confinada.....	184
Figura A1. 5 – Descomposición de las tensiones actuantes en el acero del anillo de confinamiento .....	185

## -índice de tablas-

Tabla 3. 1 - Nomenclatura de las dosificaciones .....	34
Tabla 3. 2 – Densidades de los materiales empleados (unidades en kg/m <sup>3</sup> ).....	35
Tabla 3. 3 – Dosificación para pastas de cemento y pastas de cemento y cal A1Na (kg/m <sup>3</sup> ) .....	36
Tabla 3. 4 – Dosificación pastas de filler y cal A1Na (kg/m <sup>3</sup> ) .....	36
Tabla 3. 5 – Dosificación para calorimetrías isotérmicas para pastas de cemento y pastas de cemento, o filler, y cal (gr).....	37
Tabla 3. 6 - Dosificación para DRX para pastas de cemento y pastas de cemento y cal (gr).....	37
Tabla 3. 7 – Tiempos de mezclado para ensayo de calorimetría semiadiabática.....	43
Tabla 3. 8 – Fases para el ensayo de DRX.....	45
Tabla 3. 9 – Dosificación para morteros con cal A1Na y sin cal (kg/m <sup>3</sup> ).....	47
Tabla 3. 10 - Características del sistema desarrollado para determinar la expansión de morteros..	50
Tabla 3. 11 – Tabla del software y datos necesarios.....	54
Tabla 3. 12 – Datos de la célula de carga y LVDT.....	54
Tabla 3. 13 – Tiempos de mezclado manual .....	55
Tabla 4. 1 – Propiedades físicas de las muestras de cal anhidra .....	58
Tabla 4. 2 – Composición química de las diferentes muestras de cal analizadas.....	59
Tabla 4. 3 – Valores de las fases analizadas en las cales.....	60
Tabla 4. 4 – Valores de las fases analizadas en el cemento anhidro por orden de contenido .....	61
Tabla 4. 5 – Valores obtenidos de las curvas de calorimetría cuasiadiabática de la figura 4.4.....	63
Tabla 4. 6 – Resumen del comportamiento de las curvas de calorimetría de las mezclas de cemento y cal (a/c 0,45; 7%-14% CaO) frente a las variables estudiadas.....	105
Tabla 4. 7 – Resumen del comportamiento de las fases principales de las mezclas de cemento y cal (a/c 0,45; 7%-14% CaO) frente a las variables estudiadas.....	105
Tabla 5. 1 – Tabla comparativa entre períodos de hidratación y deformación del material.....	120
Tabla 5. 2 – Valores de las pendientes en los tres tramos de la curva de deformación calculadas en mm/(m·h).....	122
Tabla 5. 3 – Valores de las pendientes en los dos tramos de la curva de tensión .....	125
Tabla 5. 4 – Porcentaje de reducción de la tensión a las 45 horas.....	126
Tabla 5. 5 – Resultados comparativos de los ensayos complementarios a los 7 días .....	127
Tabla 5. 6 – Resultados de deformación y tensión a las 24 horas.....	129
Tabla 5. 7 – Resumen de la influencia de las variables estudiadas para cada ensayo.....	135
Tabla 6. 1 – Relación entre el contenido inicial de CaO y el contenido final de Ca(OH) <sub>2</sub> formado a las 48 horas.....	140
Tabla 6. 2 – Relación entre el Ca(OH) <sub>2</sub> proveniente de la hidratación del CaO y de los silicatos.....	140
Tabla 6. 3 – Propiedades del CaO y del Ca(OH) <sub>2</sub> (Courard et al., 2014) .....	142
Tabla 6. 4 – Parámetros para la obtención de la expansión teórica. Resultados teóricos y reales ..	143
Tabla 6. 5 – Valores K <sub>D</sub> para la obtención de la deformación real.....	144
Tabla 6. 6 – Valor de los parámetros de la ecuación [6.8] de las curvas de deformación de los morteros .....	146
Tabla 6. 7 – Valores de los parámetros de la ecuación [6.8] para los morteros estudiados agrupados según los ajustes de las curvas realizados.....	146
Tabla 6. 8 – Valores de alita, CaO y Ca(OH) <sub>2</sub> al inicio y al final de la pendiente máxima de deformación .....	151
Tabla 6. 9 – Valores de los coeficientes para la asimilación a la curva real de tensión .....	156

---

Tabla 7. 1 – Relación de experiencias realizadas con HRC .....	160
Tabla 7. 2 – Dosificación de los hormigones .....	161
Tabla 7. 3 – Características de la puesta en obra .....	162
Tabla 7. 4 – Prestaciones de los hormigones analizados .....	164
Tabla A1. 1 – Características del sistema desarrollado para determinar la expansión de morteros .....	182

# 1 | Introducción

## 1.1 Introducción

Actualmente, los pavimentos de hormigón son las soluciones más empleadas en el caso de grandes superficies como aparcamientos, naves industriales, etc. Resulta una solución económica para todos estos casos, además de que permiten distintos acabados estéticos que se adaptan a la finalidad del cliente. En estos pavimentos existe una desventaja intrínseca del tipo de material, que es, la retracción por secado.

La retracción por secado, y las posibles patologías que se derivan de ella, son fenómenos que han sido estudiados en profundidad. Es por este motivo que existen pautas y normas que regulan el proceso de ejecución de pavimentos con tal de poder sobrellevar este fenómeno. La solución más empleada a nivel técnico para evitar la fisuración, es la ejecución de juntas de retracción en el pavimento. Estas juntas se diseñan como puntos débiles del elemento por las cuales el hormigón tendrá más facilidad para fisurar. De esta manera se evitan los pavimentos con fisuras por toda la superficie, que terminan por ser las causas de patologías más graves.

En contraposición a los beneficios que suponen las juntas de retracción, los desperfectos en las losas suelen generarse principalmente en estos puntos o como consecuencia de ellas. Al realizar estos cortes se divide el pavimento en superficies más pequeñas, pero al mismo tiempo esto puede favorecer los cambios de nivel entre las nuevas losas y el depósito de suciedad. A largo plazo, y sin un buen mantenimiento, el sellado de la junta desaparecerá, los labios de esta terminarán por romperse y el coste de la reparación se incrementará.

Una posible solución a este problema es la ejecución de pavimentos sin juntas de retracción, que resultan posibles mediante el uso de hormigones de retracción compensada (HRC). El funcionamiento de estos hormigones se basa en el uso de cementos expansivos o adiciones expansivas que contrarrestan la retracción por secado (ACI Commitee, 2010). En condiciones de no confinamiento esta expansión podría producir la rotura del material, mientras que en el caso contrario se podría generar un hormigón pretensado. En estos casos, cuando la magnitud del pretensado se encuentra entre 0,1 y 0,7MPa se obtienen los denominados hormigones de retracción compensada (Mehta & Monteiro, 2006).

Para el caso de esta tesis doctoral, no se ha usado un cemento con propiedades expansivas, sino que se ha optado por la adición de un componente expansivo, como es el óxido de cal (CaO). Confeccionando un hormigón de esta manera puede usarse un cemento Portland convencional y añadir en la proporción adecuada el porcentaje de adición necesaria para cada elemento o situación. De esta manera, debido al efecto expansivo que genera el óxido de cal, puede obtenerse igualmente un hormigón de retracción compensada sin necesidad de usar cementos especiales.

Esta expansión o pretensado que puede generarse en el hormigón resulta interesante desde un punto de vista de seguridad, de mantenimiento y, por consiguiente, económico. Actualmente, muchos de los pavimentos industriales están realizados con hormigón, cuyo acabado difiere en función de su localización o uso. No obstante es más común de lo deseado encontrarse con pavimentos que, debido al uso continuo, presentan lesiones que pueden llegar a entorpecer o dificultar el trabajo. Así pues, el hecho de tener un pavimento en el que puedan realizarse hasta un 70% menos de juntas (Mehta & Monteiro, 2006) aumentará la vida útil de este elemento y reducirá el coste de mantenimiento.

Actualmente existen estudios del comportamiento de esta adición usados para este tipo de hormigones (Min, Dongwen, Xianghui, & Mingshu, 1995), así como empresas que ya hace tiempo que suministran materiales similares (Onoda Cement Company, n.d.). No obstante, a nivel nacional los cementos expansivos se usan con finalidades de demolición de rocas o estructuras sin el uso de explosivos. Por este motivo únicamente se han encontrado normas extranjeras para el ensayo de este tipo de hormigones. Como ejemplo se pueden mencionar las normas americanas ASTM C845 (ASTM, 1996) y la ASTM C878/C878M-09 (ASTM, 2009). Otras normas europeas como la UNE 80113 (AENOR, 2013) o la UNI 11307 (UNICEMENTO, 2008b) únicamente determinan la expansión por restos de CaO remanente o la retracción del hormigón.

Los hormigones de retracción compensada (HRC) evitan precisamente el fenómeno que se da en la figura 1.1 además de otras fisuras características derivadas de la evaporación del agua. Estas otras tipologías pueden ser la retracción autógena, el asentamiento plástico o las derivadas de los cambios de temperatura en el conjunto de la masa de hormigón.

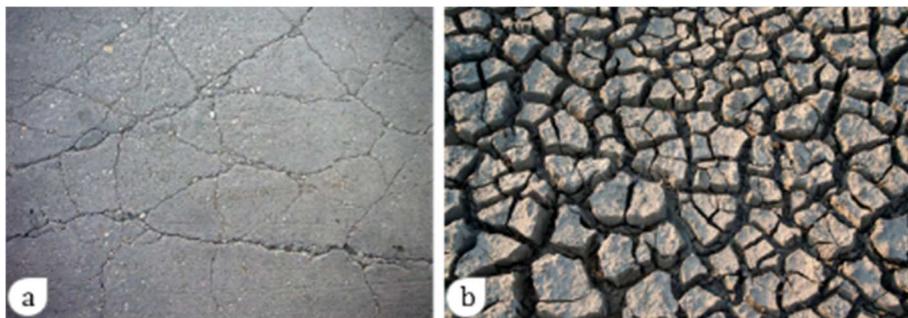


Figura 1.1 - a) pavimento de hormigón fisurado; b) suelo arcilloso seco

En la figura 1.1 se muestran dos ejemplos de fisuración por retracción. En el primer caso (figura 1.1a) se trata de un pavimento de hormigón en el que la rápida evaporación del agua ha generado fisuras en forma de piel de cocodrilo. En el segundo caso (figura 1.1b) se observa un suelo arcilloso en el que la tipología de fisuras es muy similar a la del hormigón. Al comparar dos materiales tan distintos se puede deducir que este fenómeno no es único del hormigón sino que es otro factor intrínseco de los materiales al secarse.

Los beneficios que aporta este material, juntamente con la facilidad para conseguir los materiales que lo forman, resulta una buena elección para su uso en pavimentos. De esta manera se reducirían costes de mantenimiento y se alargaría la vida útil tanto del material como de los vehículos que transitan por ellos. Otro beneficio a tener en cuenta es la reducción de los tiempos de obra y el consiguiente ahorro económico que esto conlleva al eliminarse la tarea de ejecución de juntas.

## 1.2 Razón de ser

Al llevar a cabo una búsqueda de bibliografía técnica se han observado una serie de faltas para el entendimiento del HRC con óxido de cal como adición expansiva. En la mayoría de los artículos leídos, se deja patente las mejoras en cuanto a disminución de la retracción que presentan estos hormigones. En la mayoría de los casos se muestra el gráfico de la figura 1.2 donde se representa del concepto del HRC, 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.

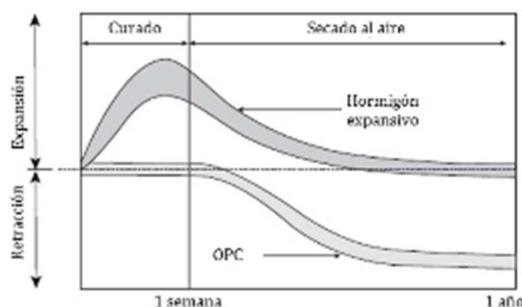


Figura 1.2 - Cambios dimensionales de un hormigón convencional y de un HRC (ACI Commitee, 2010; Mehta & Monteiro, 2006)

Referente a la bibliografía consultada, la mayoría de investigaciones describen el comportamiento de un HRC en cuanto a expansión y resistencia, y definen el fenómeno por el cual produce la expansión. Un ejemplo de ello lo define Chatterji (Chatterji, 1995), en cuya investigación

explica el fenómeno por el cual la adición de CaO y MgO generan expansiones en materiales con base de cemento Portland. Según Chatterji, el mecanismo de expansión se basa en la presión que ejercen los cristales durante su formación. También lo relaciona con la solubilidad de los cristales de hidróxido y la difusión de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ . Min *et al* (Min *et al.*, 1995) concluyen también que la expansión se debe a la cristalización *in situ* del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Resultados referentes a resistencias y expansión pueden encontrarse en las investigaciones llevadas a cabo por Troli *et al* (Troli & Collepardi, n.d.) en la que se ensayan tres dosificaciones con distintos materiales (figura 1.3). En dicha figura se observa como el hormigón con adición de CaO obtiene valores mayores de resistencia que el hormigón convencional. Según Troli *et al* este aumento de la resistencia puede ser debido a la reducción de la relación a/c por parte del CaO. Dicho de otra manera, el agua se reduce por la hidratación del CaO y la resistencia aumenta debido a que el material es más compacto.

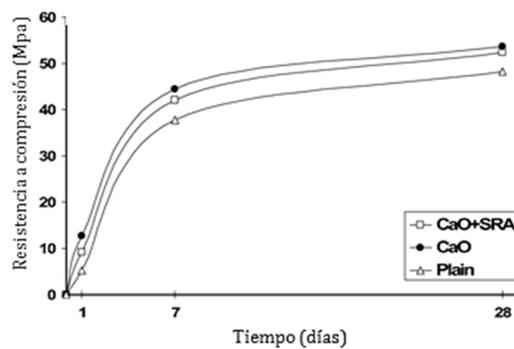


Figura 1.3 – Comparación de resistencias HRC vs. OPC (Troli & Collepardi, n.d.)

Para el caso específico de los HRC, en la mayoría de los casos se usa, además de la adición expansiva, un aditivo reductor de retracción (SRA). Por ejemplo, en la investigación llevada a cabo por Collepardi *et al* (M. Collepardi, Troli, Bressan, Liberatore, & Sforza, 2008) se basa en una experiencia real de ejecución de una losa de  $900\text{m}^2$  sin curado. La conclusión del estudio es que existe una sinergia entre el CaO y el SRA que mejora mucho las prestaciones finales referentes a expansión remanente. Otro caso del uso de este tipo de HRC es el que se usó para la realización del “*Museo nazionale delle arti del XXI secolo*” (MAXXI) de Roma. En base al diseño arquitectónico se requerían muros de 20m de altura y 60m de largo en forma sinuosa y sin juntas de retracción. El estudio realizado por Troli *et al* (Troli & Collepardi, n.d.) concluyó que un HRC basado en CaO-SRA era la opción que mejores prestaciones daba. En ambos estudios se muestra el gráfico de la figura 1.4 para dejar patente la mejora en cuanto a expansión remanente que se genera.

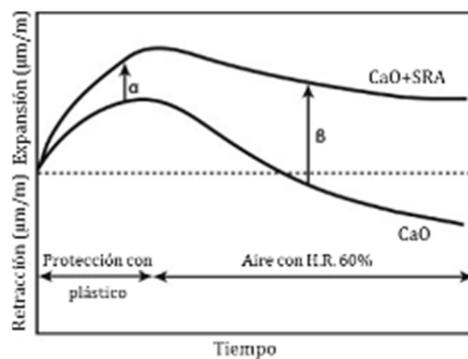


Figura 1.4 – Deformación de un HRC con adición de CaO o con adición de CaO y un SRA (M. Collepardi *et al.*, 2008; Troli & Collepardi, n.d.)

En el caso de las propiedades finales del material con alguna adición de CaO o derivados se han encontrado en la bibliografía las siguientes investigaciones. Por ejemplo, para el caso de morteros con adición de pasta de cal o cal hidratada encontramos la investigación realizada por Cizer *et al* (Cizer, Balen, Gemert, & Elsen, 2008). En este documento se definen las reacciones de endurecimiento y su relación con el desarrollo de la resistencia. También se definen aspectos de microestructura y porosidad de estos morteros. En el caso del estudio de la estructura porosa y de las propiedades mecánicas de estos morteros se encuentra también la investigación llevada a cabo por Arandigoyen *et al* (Arandigoyen & Alvarez, 2007).

Por otra parte, el método de medición de expansiones de la UNE 80113 (AENOR, 2013) se centra en determinar la expansión en autoclave de cementos que no contengan adiciones. Esto representa un problema para el caso que nos ocupa, ya que se usan adiciones expansivas y es en las primeras 24h cuando interesa entender el comportamiento de este fenómeno. En relación con las normas para determinar la expansión de hormigones de retracción compensada, las americanas (ASTM, 1995, 1996, 2009) o italianas (UNICEMENTO, 2008b) consultadas son la únicas que dan métodos de ensayo más acordes a la finalidad de este proyecto.

En resumen, existe una carencia de bibliografía referente al conocimiento de las mezclas cemento-cal, es decir, a la posible sinergia que se da al mezclar ambos compuestos, y la influencia de las fases de cada uno de ellos en la mezcla conjunta. En cuanto a las mezclas de cemento y cal se encuentran mayoritariamente temas referentes a morteros de reparación, ya que la cal presenta muy buena afinidad con materiales históricos. En el caso de HRC suelen basarse mayoritariamente en cementos expansivos (tipo K, S o M (Mather, 1970)) o con aditivos reductores de retracción (SRA). Todos estos casos resultan muy interesantes pero al mismo tiempo presentan materiales con comportamiento distinto al del HRC que pretende ser objeto de estudio. Es por este motivo que se ha evidenciado una falta de información para poder definir los HRC con adición de CaO como agente expansivo.

El poder entender este material ayudaría a conocer sus características expansivas y de interacción entre el cemento y la cal y mejorar las prestaciones del hormigón, ya que un pavimento de HRC presenta bastantes ventajas con respecto a un pavimento de hormigón convencional. En cuanto a las ventajas se pueden establecer las siguientes como las más importantes:

- Estéticos: en primer lugar, estos pavimentos resultan más agradables a la vista ya que no existen, o se reducen en gran medida, las juntas de retracción. De esta manera se consiguen pavimentos continuos y sin elementos de división en ellos y se eliminarían las fisuras antiestéticas que se observan en la figura 1.5.

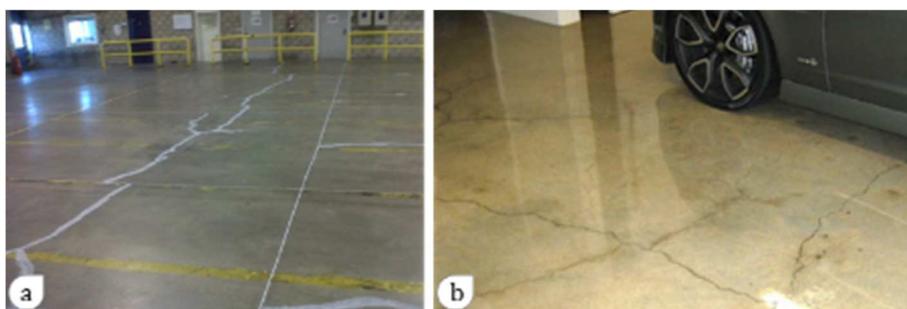


Figura 1.5 – Pavimentos interiores de hormigón; a y b) zonas de aparcamiento

- Mejor percepción por parte del usuario: las personas que normalmente transitan por estos pavimentos tienen más percepción de seguridad y de confort. De igual

manera, en el caso de vehículos que transiten sobre estas superficies, ya sean carros, carretillas, o cualquier otro vehículo, lo harán sin el inconveniente de los baches de las juntas (figura 1.5).

- Menor irregularidad: En relación con el punto anterior, el tránsito de vehículos será más silencioso y sin vibraciones, lo que alargará la vida útil de estos (figura 1.6).

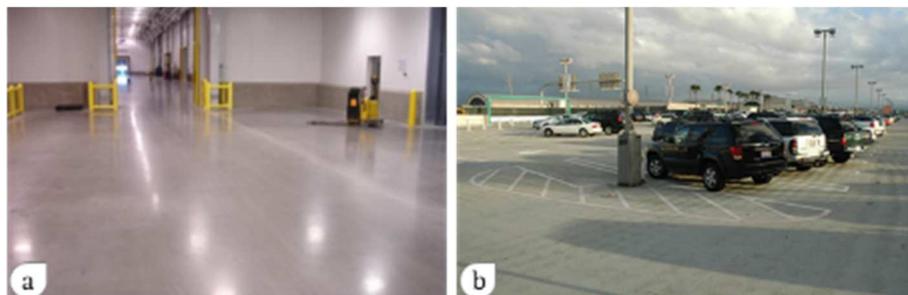


Figura 1. 6 - Pavimentos de HRC; a) pavimento interior; b) pavimento de parquin exterior

- Aumento de la vida útil: la reducción en la cantidad de juntas en el pavimento evitará los desperfectos en estas debidos a la circulación. Normalmente las juntas de las losas suelen presentar desperfectos en cuanto a desaparición del sellado y colmatación de la junta, rotura de los labios, etc. La magnitud de estos desperfectos en las juntas y en zonas adyacentes se observan en la figura 1.7a y en la figura 1.b, respectivamente.

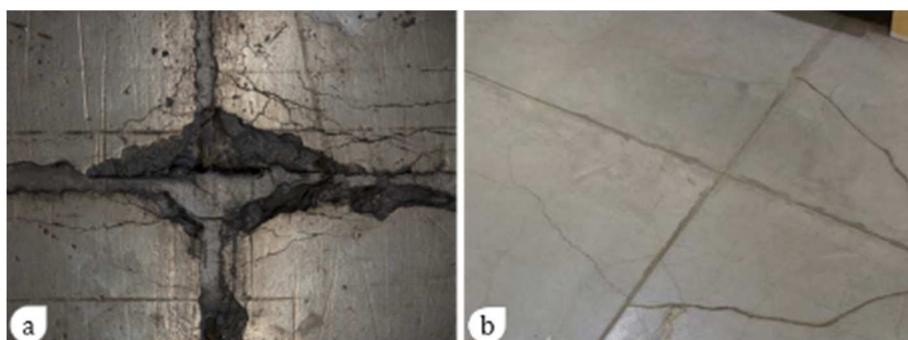


Figura 1. 7 - Lesiones en juntas: a) rotura de labios y desaparición del sellado; b) fisuración alrededor de un cruce de juntas

- Menor coste de mantenimiento: este punto está relacionado con alguno de los anteriores. En primer lugar, una menor cantidad de juntas implica menos metros lineales a mantener. En segundo lugar, los metros lineales de junta pueden reducirse hasta un 70% (Mehta & Monteiro, 2006), por lo que el coste de reparación se reduciría mucho.
- Reparaciones: en el caso de tener que reparar un pavimento de HRC podría eliminarse una parte de este, para rellenarlo posteriormente con el mismo material. Este nuevo hormigón, al ser también expansivo, evitaría que las juntas entre ambos hormigones fuera evidente. La figura 1.8 muestra un ejemplo de contacto del hormigón con un elemento externo, siendo el material "a" un hormigón convencional, y el "b" un HRC.

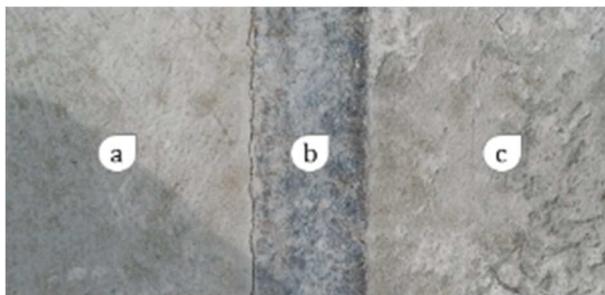


Figura 1. 8 – Retracción por secado; a) H. convencional; b) elemento de acero; c) HRC

- Más resistentes: Como ya se ha mencionado anteriormente (Troli & Collepari, n.d.), los HRC son hormigones más resistentes que un hormigón convencional. Esto se debe principalmente a la formación de etringita o portlandita por parte de las adiciones expansivas introducidas en la mezcla. Estos compuestos, además de generar las expansiones, se encargan de rellenar los poros del hormigón, y por consiguiente, se obtiene un material más compacto.

### 1.3 Objetivo general

El objetivo principal de esta tesis doctoral es entender las interacciones entre el cemento y la cal durante las primeras etapas del proceso de hidratación y evaluar su influencia en el comportamiento a corto y largo plazo del material. Con esto se pretende desarrollar herramientas y aportar conocimiento que permitan diseñar, de forma optimizada, materiales con retracción compensada. Más específicamente, se pretende obtener materiales con una retracción inferior que permitan reducir la cantidad de juntas de dilatación a realizar y, por consiguiente, reducir los tiempos de ejecución y aumentar la durabilidad del material. Finalmente, será necesario evaluar las consecuencias derivadas de la acumulación de tensiones en situación confinada. Este objetivo principal se alcanza a partir de los objetivos específicos planteados en el apartado siguiente.

### 1.4 Objetivos específicos

Con tal de determinar la viabilidad de la adición de CaO se plantearon una serie de procesos mediante los cuales se pretendía entender el comportamiento de los materiales de manera individual, así como en la mezcla. Los objetivos específicos planteados se listan a continuación.

#### a) Conocer las características físico-químicas de los materiales de partida de diferentes tipos de cales empleados en pavimentos

- Determinar las fases de que están compuestos el cemento y la cal

#### b) Caracterizar microestructuralmente los procesos de hidratación

- Determinar la influencia del contenido de cal
- Determinar la influencia de la aditivación de la cal
- Determinar la influencia de la superficie específica de la cal

- Determinar la existencia o no de una sinergia entre el cemento y la cal

c) Desarrollar sistemas para la caracterización de la expansión en condición libre y la tensión generada en condición generada

- Evaluar las propiedades expansivas de los morteros y hormigones mixtos
- Evaluar el comportamiento de materiales cementicios con retracción compensada en ambientes controlados
- Evaluar en situación real, en elementos tipo pavimentos, el comportamiento de diferentes mezclas del hormigones de retracción compensada

d) Modelizar los procesos de generación de expansión a partir de los resultados obtenidos

## 1.5 Organización de la tesis doctoral

La tesis se divide en ocho capítulos y un documento de anejos en los que se adjuntan gráficos, imágenes e informes complementarios para el correcto entendimiento de la tesis. En la figura 1.9 se muestra un esquema de los capítulos de que consta esta tesis y de la relación existente entre ellos.

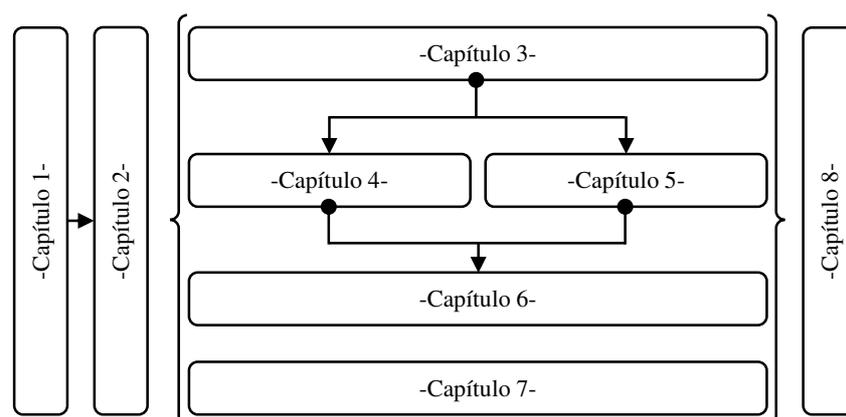


Figura 1. 9 – Esquema de contenido de la tesis

El capítulo actual denominado **Capítulo 1**, presenta el tema de la tesis, así como los objetivos y la metodología usada para alcanzar dichos objetivos.

En el **Capítulo 2** se muestra un resumen del estado del conocimiento referente al uso de materiales con retracción compensada.

El **Capítulo 3** introduce los materiales y los métodos usados para las campañas experimentales llevadas a cabo. En él se define cada uno de los ensayos llevados a cabo para alcanzar el objetivo general de la tesis.

En el **Capítulo 4** se exponen los resultados y el análisis de los ensayos de caracterización del proceso de hidratación de las pastas. En este capítulo se agrupan todos los resultados relativos a la evolución de los procesos químicos resultantes de la interacción del cemento y la cal. Principalmente ensayos de calorimetría y difracción de Rayos-X (DRX).

En el **Capítulo 5** también se exponen resultados de ensayos, en este caso referentes a la caracterización del proceso expansivo de pastas y morteros de cemento y cal. Se muestran los resultados obtenidos de los ensayos normalizados así como la evolución del método de caracterización del material en base a los resultados obtenidos. En este capítulo se plantea una nueva metodología de ensayo específica para la caracterización de materiales expansivos.

En el **Capítulo 6** se presenta una aproximación a un modelo numérico de predicción de la tensión de un mortero con adición de cal a partir de los resultados obtenidos en los Capítulos 4 y 5.

En el **Capítulo 7** se exponen los resultados obtenidos de las experiencias reales del uso de la adición de cal en hormigones. Se realiza un resumen general de los datos obtenidos así como unas conclusiones parciales de la experiencia en la puesta en obra de este material. El resumen mencionado se realiza en base a los resultados de las 23 experiencias realizadas, cuyas características específicas se muestran en el Anejo 2.

En el **Capítulo 8** se presentan las conclusiones de la tesis, así como las futuras líneas de investigación.

Finalmente, se adjunta la información complementaria a la tesis en los Anejos 1 y 2. Estos están compuestos por la información adicional no mostrada en el cuerpo principal de la tesis.

En el **Anejo 1** se muestra la base numérica del ensayo del Método del anillo. Asimismo, se adjuntan también los planos con el despiece y las medias del molde diseñado para el Método del molde mixto.

Finalmente, en el **Anejo 2** se adjuntan las fichas de las características de las obras realizadas en las que se especifican los ensayos llevados a cabo, así como los resultados de los mismos.



# 2

## Revisión de la Literatura

### 2.1 Introducción

Los pavimentos, deben resistir no solo las cargas por flexión, por tráfico y las especificaciones de uso, sino que además deben soportar la retracción inicial debido al secado del hormigón y a las variaciones dimensionales debidas a los efectos térmicos. Esto genera diferentes problemáticas como la reducción de sus propiedades mecánicas, la fisuración, el alabeo, y la 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 (García Alarcón, 2012).

Para la realización de los pavimentos de hormigón existe un gran abanico de posibilidades de ejecución y de empresas especializadas. No obstante, en todas estas opciones se encuentra un denominador común, que es, la ejecución de juntas de retracción (Aguado, Carrascón, Cavalero, Puig, & Senés, 2010). Según la guía técnica del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) la distancia entre juntas ha de ser como máximo de 20 a 25 veces el espesor de la losa (IECA, 2013). En otras palabras, para una losa de unos 20cm de espesor, tendrán que realizarse juntas cada 4-5 metros antes de que empiece a darse el fenómeno de la retracción por secado. Este corte obliga a que las

tensiones desarrolladas durante la retracción fisuren el hormigón en estos sitios permitiendo tener un control de estas fisuras de forma transversal y longitudinal (ACI Committee 360, 2010).

Estos cortes generan otro tipo de problemática en términos de durabilidad del elemento. Las juntas se convierten en zonas de posible infiltración de agua, lo cual podría generar a largo plazo un efecto de bombeo, causando socavación de la base del pavimento y produciendo una progresiva pérdida de apoyo. Adicionalmente, y dependiendo del uso del pavimento, podría producirse penetración de cloruros u otros agentes agresivos 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 desniveles entre dos losas limítrofes, disminuye los esfuerzos en la unión y evita patologías como la pérdida de sección o la fractura de la losa cerca de las juntas. Estos dispositivos de transferencia de carga dificultan el proceso constructivo debido a la complejidad de su colocación en la losa. Estos pasadores deben estar correctamente alineados y centrados en el espesor de la placa.

En general, existen una gran cantidad de variables que intervienen en la construcción de juntas y que podrían disminuir su durabilidad y aumentar el coste, tanto de construcción como de mantenimiento. Debido a esto, se han propuesto otros sistemas que permiten la reducción de la cantidad de juntas en los pavimentos. El hormigón de retracción compensada (HRC), es una alternativa a un hormigón convencional para reducir o eliminar las juntas en los pavimentos. Hasta la fecha se han realizado con éxito losas, forjados, tanques de almacenamiento de agua, y digestores de aguas residuales (Mehta & Monteiro, 2006). El método que usan estos hormigones se basa en la generación de una expansión controlada del volumen, inducida mediante una reacción química entre materiales. Para lograr esa expansión existen distintas posibilidades de las que se hablará en los siguientes apartados.

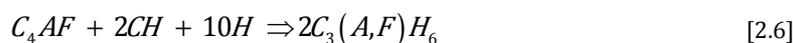
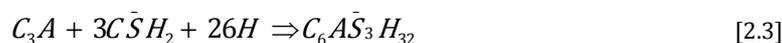
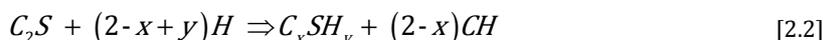
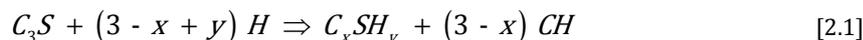
En este capítulo se presenta una revisión general de los aspectos más importantes de los hormigones expansivos con retracción compensada, prestando especial atención a aquellos que se producen mediante el uso de aditivos expansivos y específicamente los aditivos basados en CaO. Por otra parte, se exponen algunas definiciones y factores a tener en cuenta en el momento del diseño de estos hormigones.

## 2.2 Hidratación del cemento Portland

Para entender la influencia de la adición de cal en materiales cementicios, es necesario conocer el proceso de hidratación del cemento Portland. La hidratación del cemento Portland viene dada por las reacciones que tienen lugar entre las fases mayoritarias del clínker ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ ), el yeso presente en el cemento para regular su fraguado ( $CaSO_4 \cdot 2H$ ) y el agua (Hewlett et al., 1988). Es mediante estas reacciones químicas que el cemento adquiere sus propiedades adhesivas al dar paso a la creación de productos con propiedades de fraguado y endurecimiento (Mehta y Monteiro, 2006).

De modo resumido, las principales reacciones químicas de hidratación que tienen lugar cuando los diferentes componentes del cemento entran en contacto con el agua son las reflejadas en las ecuaciones [2.1] a [2.6]. Los compuestos generados mayoritariamente durante el proceso de hidratación son el gel CSH y la portlandita. Además de estos componentes aparecen otra serie de

compuestos, como la etringita (fases AFt), monosulfoaluminatos hidratados (fases AFm) y otros compuestos hidratados.



La mayor parte de las reacciones de hidratación de los componentes del clínker son reacciones exotérmicas, por lo que se produce una liberación de calor a medida que estas tienen lugar. En la figura 2.1 se muestra la variación de temperatura de hidratación de un cemento tipo I 42,5R, con una relación a/c de 0,35. En la citada figura se divide la curva de temperatura de hidratación en cuatro etapas que están relacionadas con los procesos de reacción de los diferentes componentes del cemento.

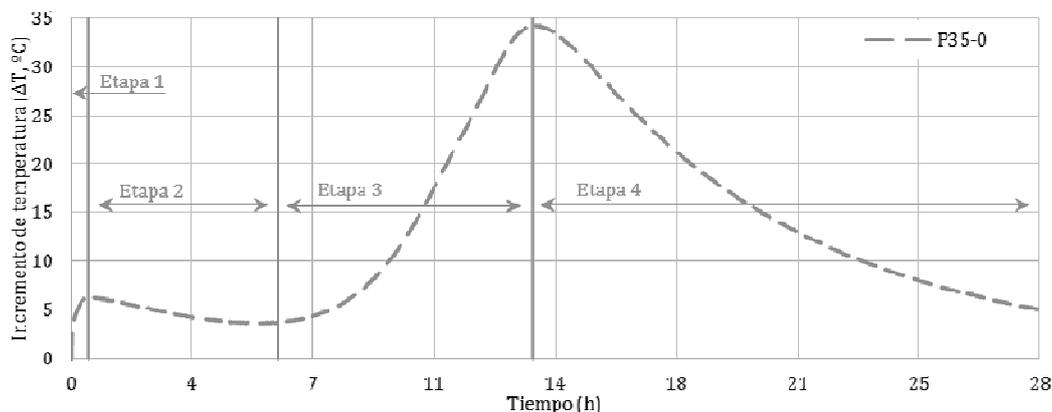


Figura 2. 1 - Variación de temperatura durante la hidratación de una muestra de cemento tipo I, con una relación a/c de 0,35 (elaboración propia)

La primera etapa es debida fundamentalmente a las reacciones del aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) con el yeso y el agua. En esta etapa se da una rápida disolución de los iones en el medio líquido y el inicio de la formación de las fases hidratadas de estos. La Etapa 1 se prolonga durante los minutos siguientes a la adición de agua. El principal compuesto formado durante esta reacción es la etringita (AFt), que se deposita en la superficie de las partículas de  $C_3A$ .

En esta primera etapa tiene también lugar la disolución de los componentes mayoritarios del clínker, los silicatos cálcicos ( $C_3S$  y  $C_2S$ ). A medida que se da la disolución de estos compuestos, se da la formación de una capa inicial de gel CSH, uno de los productos principales de la hidratación de estas fases, en la superficie de las partículas. Esta película dificulta la llegada de agua a la partícula y ralentiza el proceso de disolución, llegándose al denominado un período durmiente tal como se muestra en la Etapa 2.

Durante la Etapa 2 tiene lugar la saturación del medio líquido por iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$ . Esta saturación permite que la portlandita -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  -, el otro producto principal de la hidratación de los silicatos cálcicos, empiece a precipitar y permita la difusión del agua a través de la capa del gel CSH. De esta manera empieza la fase de aceleración representada por la Etapa 3.

La tercera etapa se caracteriza por una rápida reacción de los componentes y por la gran liberación de calor. En este momento se da una rápida hidratación del  $\text{C}_3\text{S}$  y comienza la hidratación del  $\text{C}_2\text{S}$ , lo que conlleva a la generación de gel CSH. Durante esta etapa tiene lugar la precipitación de la portlandita y la disolución total del yeso.

La última etapa mostrada en la figura 2.1, la Etapa 4, se caracteriza por el bajo contenido de materiales anhidros restantes, lo que disminuye el grado de calor de hidratación de la mezcla. La formación de gel CSH continúa, pero se reduce la precipitación de portlandita. Durante esta etapa tiene lugar la conversión de la etringita a monosulfato (AFm) mediante la reacción de esta con los aluminatos no combinados.

En la figura 2.2 y 2.3 se muestra la evolución del consumo de las fases del clínker y la formación de productos hidratados, respectivamente, durante la hidratación del cemento Portland (Hewlett & Massazza, 2003). En ellas pueden apreciarse las diferentes fases mencionadas anteriormente. Así, durante las primeras horas únicamente se consumen las fases  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_4\text{AF}$ , produciendo etringita. El período durmiente se puede apreciar por la estabilización en el consumo de las fases citadas anteriormente, sin que comience la hidratación de los silicatos cálcicos. La Etapa 3 se aprecia por el incremento en el consumo del  $\text{C}_3\text{S}$ .

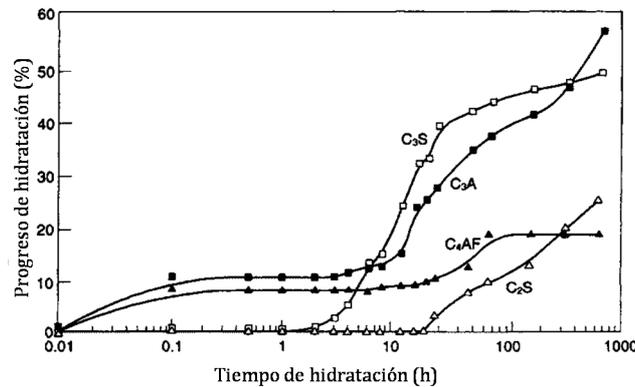


Figura 2.2 - Consumo de las fases del clínker durante la hidratación del cemento Portland (Hewlett & Massazza, 2003)

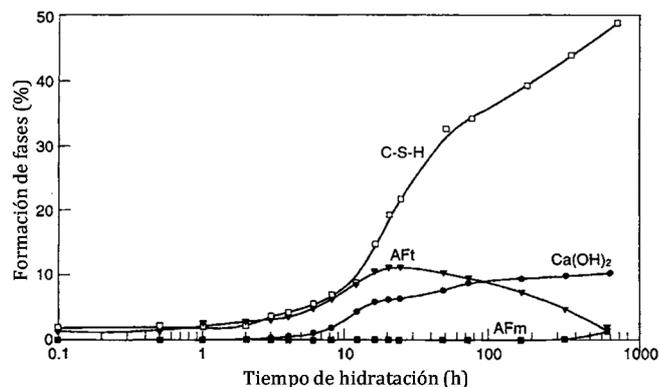


Figura 2.3 - Formación de productos hidratados durante la hidratación del cemento Portland (Hewlett & Massazza, 2003)

### 2.3 Influencia de la adición de cal en la hidratación del cemento Portland

La hidratación del óxido de calcio (CaO) se da mediante las ecuaciones [2.7] y [2.8], que pueden expresarse de manera agrupada por la reacción [2.9]. El producto de la hidratación de la cal es la portlandita, también denominado cal apagada. La portlandita se encuentra en equilibrio con los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$ , como se indica en la ecuación [2.8]. Al igual que para el caso de la hidratación del clínker del cemento, la hidratación del CaO libera calor con un valor aproximado de 155 Kcal/kg CaO (Ecole d'Avignon, 2003).



La reacción [2.9] no sólo es altamente exotérmica, sino que es expansiva. El incremento de volumen que tiene lugar por la transformación del CaO a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es de aproximadamente dos veces el volumen del compuesto inicial. Es por este motivo que se regula el contenido de cal en los cementos y adiciones como las escorias de alto horno (Ministerio de Fomento, 2008).

Hay que tener en cuenta que la adición de cal al cemento generará un aumento de la temperatura de hidratación de la pasta. Esto podría dar lugar a un aumento de la velocidad de las reacciones químicas, ya que estas aceleran su reacción al aumentar la temperatura. En todo caso, hay que tener en cuenta que el tamaño de la partícula de cal o la posible existencia de aglomerados variará la velocidad de hidratación de la cal y, por lo tanto, la temperatura que se generará. Así, a mayor tamaño de partícula podrían darse temperaturas de hidratación menores. En el caso de la reducción del tamaño de la partícula de cal, la reacción se aceleraría, y en el caso de superficies específicas o tamaños de partícula parecidos a los del cemento, podría llegar a darse una competencia por combinarse con el agua de amasado. En este caso, debería considerarse el orden de mezclado de los componentes para mejorar las prestaciones frente a retracción del material final.

Como se aprecia en la ecuación [2.7] la hidratación de la cal libera iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$ , que se sumarán a los generados por la disolución de los componentes del cemento durante la Etapa 1. Este incremento de la alcalinidad del medio puede tener diversos efectos. En primer lugar, podría suceder que la hidratación de los aluminatos se viera impedida, como mostraron Kirchheim *et al.* (Kirchheim, Fernández-Altale, Monteiro, Dal Molin, & Casanova, 2009). El estudio se llevó a cabo mediante la comparación de la hidratación de los aluminatos en presencia de yeso y en presencia de yeso y cal. Por otra parte, un aumento en la concentración de iones generaría que la Etapa 2 se diera en un tiempo menor, ya que la saturación del medio se daría antes. En el caso de la alita y la belita ( $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ , respectivamente), Gallucci *et al.* y Juilland *et al.* (Garrault, Finot, E. Lesniewska, & Nonat, 2005; Patrick Juilland, Gallucci, Flatt, & Scrivener, 2010) determinaron experimentalmente que la concentración de hidróxido cálcico en el medio líquido reduce el ratio de disolución de ambos silicatos.

El CaO ha sido utilizado como adición en morteros y hormigones, por sus características expansivas. En el caso de morteros, el objetivo se basaba en mejorar la estabilidad y durabilidad. Un ejemplo es la investigación realizada por Maltese *et al.* (Maltese *et al.*, 2005) en el que combinan dicho material con productos reductores de retracción (*shrinkage reducing admixtures, SRA*). En dicho estudio observaron que los materiales que contenían óxido de cal mejoraban su comportamiento

cuando se les realizaba un curado por inmersión. Por otra parte, al ser curados a 23° C y 50% de humedad se observaba una baja compensación de la retracción. Finalmente, el uso de SRA generaba una sinergia entre este aditivo y el óxido de calcio que mejoraba en mayor medida el efecto de la expansión del óxido de cal. Según los autores, este fenómeno se produce porque el SRA evita la rápida disolución del hidróxido calcio en el medio líquido lo que permite que se formen cristales de mayor tamaño y, por consiguiente, que se dé una mayor expansión.

En la bibliografía técnica existe un gran número de investigaciones o aplicaciones reales de hormigones de retracción compensada (HRC) mediante el uso de cementos expansivos, siendo los más comunes los tipos K, S o M (Mather, 1970). En el caso de cementos con adiciones expansivas de CaO resulta menos investigado. Sí se ha podido encontrar bibliografía referente a morteros de cal o con adición de cal en donde se investigan las propiedades finales. Por ejemplo, para el caso de morteros con adición de pasta de cal o cal hidratada encontramos la investigación realizada por Cizer *et al.* (Cizer et al., 2008). En este documento se definen las reacciones de endurecimiento y su relación con el desarrollo de la resistencia. También se definen aspectos de microestructura y porosidad de estos morteros.

En el caso del estudio de la estructura porosa y de las propiedades mecánicas de estos morteros se encuentra la investigación llevada a cabo por Arandigoyen *et al.* (Arandigoyen & Alvarez, 2007). El estudio realizado por Fourmentin *et al.* (Fourmentin et al., 2015) se basa en el estudio de la estructura de los poros y de la resistencia el material durante el fraguado en pastas de cemento y cal. Mediante distintos ensayos, entre ellos el de calorimetría isotérmica, los autores determinaron que el período durmiente que se aprecia en la curva de calor de hidratación de un cemento convencional desaparece al añadir cal. Además, observaron que la aceleración del fraguado resulta mínima al superar un umbral en la cantidad de cal añadida.

Con respecto al uso de CaO para el desarrollo de hormigones de retracción compensada, destacan las investigaciones realizadas por Collepari *et al.* (M. Collepari et al., 2008; Mario Collepari, Borsoi, Collepari, Ogoumah Olagot, & Troli, 2005) y por Corinaldesi (Corinaldesi, 2012). Estas investigaciones pusieron de nuevo en evidencia la necesidad de combinar aditivos del tipo SRA junto con aditivos superplastificantes, para mejorar las prestaciones de estos hormigones. La combinación de estos aditivos permitió superar la problemática asociada a la necesidad de un curado cuidadoso en este tipo de materiales

Existen investigaciones que caracterizan la hidratación de la cal en función de su proceso de fabricación, como por ejemplo la investigación llevada a cabo por Shi *et al.* (Shi et al., 2002). En dicho estudio se observó que el proceso de hidratación de la cal se ve reducido con el aumento de la temperatura de calcinación, lo que deriva en distintas propiedades microestructurales. Por otra parte, existen también investigaciones referentes al proceso de hidratación de la cal como el llevado a cabo por Birss y Thorvaldson (Birss & Thorvaldson, 1955) y, algo más recientemente, un modelo químico-mecánico de hidratación llevado a cabo por Chiaia *et al.* (Chiaia, Fantilli, & Ventura, 2012). También el que realizó Miller (Miller, 1960) referente al estudio de la reacción del CaO con el agua. Sin embargo, al menos en la bibliografía consultada, no ha sido posible encontrar un estudio detallado que permita establecer las sinergias e influencias que tienen lugar durante la hidratación conjunta del cemento Portland y el CaO.

En el caso de las expansiones generadas por la adición de CaO se encuentran investigaciones como la que fue llevada a cabo por Ming *et al.* (Min et al., 1995). En dicha investigación concluyen que la expansión en pastas de cemento con adición de cal es debida a la cristalización de cristales de portlandita formados *in situ*. Paralelamente, Chatterji (Chatterji, 1995) propuso un nuevo

mecanismo de expansión retardada de hormigones debido a la presencia de CaO y MgO, que asimismo concluye que la expansión es debida a la presión que ejerce la formación de los cristales de hidróxido cálcico.

En otros estudios se analiza la capacidad expansiva de la cal y el aumento de volumen que esta partícula genera al hidratarse. Es el caso del estudio realizado por Nagataki *et al* (Nagataki & Gomi, 1998) en el que determinan que la partícula de portlandita duplica su volumen con respecto a la cal. Este estudio puede tomarse como base para el cálculo teórico de la deformación que se daría en un material conociendo el peso de la cal añadida. Este cálculo se puede realizar adaptando la ecuación propuesta por J.R. Clifton *et al* y R. Tixier *et al* (Clifton & Pommersheim, 1994; Tixier & Mobasher, 2003) para un ataque por sulfatos. En ambos casos, tanto los sulfatos como la cal generan un proceso de expansión en el material, aunque en el caso de estudio de esta tesis, la expansión generada sería beneficiosa.

Cabe destacar la ausencia de metodologías contrastadas que permitan determinar la expansión generada por estos materiales, así como la tensión remanente. El método de medición de expansiones de la UNE 80113 (AENOR, 2013) se centra en determinar la expansión en autoclave de cementos que no contengan adiciones. Esto representa un problema para el caso que nos ocupa, ya que se usan adiciones expansivas y es en las primeras 24h cuando interesa entender el comportamiento de este fenómeno.

Existen normas a nivel internacional para determinar la expansión de hormigones de retracción compensada, como las ASTM (ASTM, 1995, 1996, 2009) o las italianas (UNICEMENTO, 2008b). Cabe destacar que todas las normas citadas anteriormente determinan la expansión no confinada. Por tanto, no es posible determinar la tensión remanente que queda en el material, y evaluar su capacidad de responder frente a fenómenos de retracción a más largas edades.

Como dato significativo debe hacerse patente la falta de investigaciones acerca del fenómeno de la tensión de confinamiento en este tipo de mezclas. Aunque se ha visto que a nivel de caracterización del proceso de expansión se ha investigado a nivel de elementos finitos, y mediante normativas se pueden conseguir valores aproximados de este parámetro, a nivel de la tensión que es capaz de alcanzar este tipo de mezclas en estado confinado, la bibliografía existente es poca.

## 2.4 El fenómeno de la retracción

La retracción del hormigón está ligada a la pérdida del agua de amasado, traducida en una disminución de volumen y deformación del hormigón. Esta retracción se presenta durante el fraguado y la 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, las cuales se presentan en mayor medida en elementos de gran área, como losas de pavimento y suelos industriales.

### 2.4.1 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 retracción del orden de un 1% con respecto al volumen absoluto de cemento seco. Esta retracción ocurre durante las primeras ocho horas posteriores al amasado (Canovas, 2007). Cuando el hormigón empieza a fraguar, y es expuesto a la atmosfera seca, la superficie en contacto con esta empieza inmediatamente a perder agua. Esta agua es eliminada en un proceso capilar, perdiéndose progresivamente por evaporación e iniciando este proceso por el agua contenida en los poros mayores. En los puntos en los que el agua permanece se desarrollan tensiones capilares, las cuales inducen a tensiones de compresión en el hormigón. Como consecuencia se obtiene la retracción del elemento y, por consiguiente, 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. Esta fisuración suele venir asociada, por un lado, a unas condiciones ambientales extremas (altas temperaturas, bajas humedades y alta velocidad del viento), y, por otra parte, puede estar asociada a las 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, y se recomienda que esta tasa no exceda de  $1 \text{ kg/m}^2$  por hora. Cabe destacar que la evaporación se incrementa cuando la temperatura del hormigón es mucho mayor que la temperatura ambiente; bajo tales circunstancias, la retracción plástica puede ocurrir incluso si la humedad relativa del aire es alta. Es por este motivo que es recomendable proteger el hormigón del sol y del viento inmediatamente después de ser vertido, así como realizar un curado adecuado (Neville, 2011). La fisuración por retracción plástica se presenta generalmente en forma de muchas fisuras próximas que se cruzan entre sí pero que no llegan a alcanzar una gran profundidad. Aparte de su efecto estético, las fisuras permiten la entrada agentes externos que pueden llegar a derivar en patologías por corrosión del armado y disminuir la vida útil del elemento.

### Retracción Autógena

La retracción autógena se define como la 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), 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, se encuentran alrededor de  $40 \times 10^{-6}$  con una edad de 1 mes, y de  $100 \times 10^{-6}$  a los 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 la rotura por tracción (Canovas, 2007). Estas fisuras pueden aparecer antes y después del endurecimiento y siempre que el hormigón se encuentre en un estado de coacción a la deformación. El peligro de la fisuración es generalmente mayor cuanto más rápidamente se

desarrolle la retracción, y disminuye cuanto más prolongado sea el tiempo de que dispone el hormigón para fluir (Ruiz, 2009).

El cambio de volumen experimentado es inferior a la pérdida de volumen de agua evaporada. Al iniciarse el fenómeno se da una pérdida de agua libre que causa una retracción poco significativa. 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 un 1% del tamaño de una partícula de gel, la retracción lineal de la pasta completamente seca sería de  $10.0000 \times 10^{-6}$  (0,01m/m). Como nunca se llega al secado completo, los valores reales podrían alcanzar los  $4.000 \times 10^{-6}$  m/m. A falta de resultados experimentales, se recomienda tomar como valor de retracción del hormigón en masa 0,35 mm/m y para el hormigón armado 0,25 mm/m (Canovas, 2007).

#### Retracción por carbonatación

En el hormigón endurecido se da el fenómeno de la carbonatación, debido a la acción del  $\text{CO}_2$  del ambiente. Este reacciona en presencia de humedad con el  $\text{Ca(OH)}_2$  formando carbonato cálcico. Este proceso provoca una retracción por carbonatación que, aunque no es 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 (Canovas, 2007).

La carbonatación, y por consiguiente 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 100 o al 10%. El efecto de la retracción por carbonatación puede hacerse más evidente en piezas expuestas a ciclos de humedad y secado. Es el caso de los elementos de hormigón situados en zonas de oscilación de mareas y salpicaduras de agua donde puede darse la fisuración superficial de los elementos (Canovas, 2007).

#### **2.4.2 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 este 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. A continuación, se presenta la influencia de los factores más importantes.

#### Relación a/c

La cantidad de agua influye de manera significativa en la retracción. Esta aumenta con la relación a/c a igualdad de cantidad de cemento por  $\text{m}^3$ , es decir, habrá mayor cantidad de agua libre a evaporar (Madrid & Largacha, 1985). En la figura 2.4 (Canovas, 2007) se presenta un gráfico que relaciona la retracción esperada a partir de la cantidad de agua de amasado. Se observa que a mayor contenido de agua, mayor es la retracción obtenida.

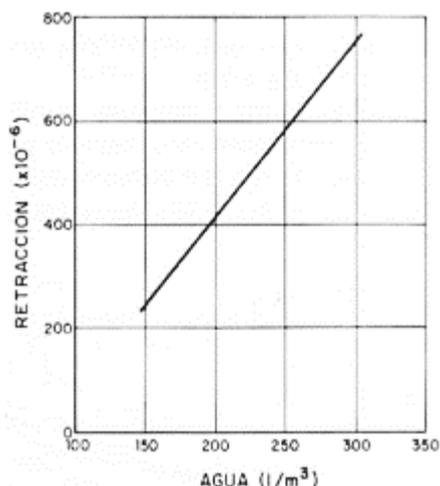


Figura 2.4 – Retracción del hormigón en función del agua de amasado

### 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, coaccionaran las retracción de esta. El tamaño máximo del árido influye en la retracción, ya que cuanto mayor es el volumen de árido menor es el volumen de pasta (Madrid & Largacha, 1985). La naturaleza de los áridos también es un factor influyente, por ejemplo, los hormigones con áridos ligeros presentan mayor retracción ya que el árido tiene menor módulo de elasticidad. Esto implica que es más deformable y ofrecerá menor resistencia a la retracción de la pasta. La influencia del contenido de árido, combinada con la relación a/c se presenta en la figura 2.5. En esta se observa como para una misma relación a/c, la retracción aumenta a medida que la cantidad de árido disminuye (Neville, 2011).

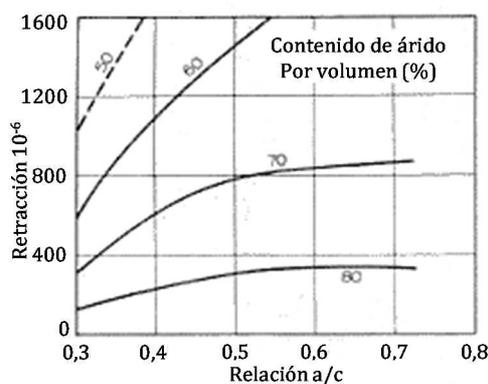


Figura 2.5 – Influencia de la relación A/C y el contenido de árido en la retracción (Neville, 2011)

### Humedad relativa

Al aumentar la humedad relativa del ambiente, la retracción disminuye ya que esta evita que se dé una rápida evaporación del agua de amasado e impide que se creen tensiones durante el endurecimiento. Ha de tenerse en cuenta que en condiciones extremadamente húmedas puede producirse una expansión en el material, por lo cual la pieza debe mantenerse a una humedad en la cual se encuentre un equilibrio hídrico (Madrid & 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 (Canovas, 2007). En la figura 2.6 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.

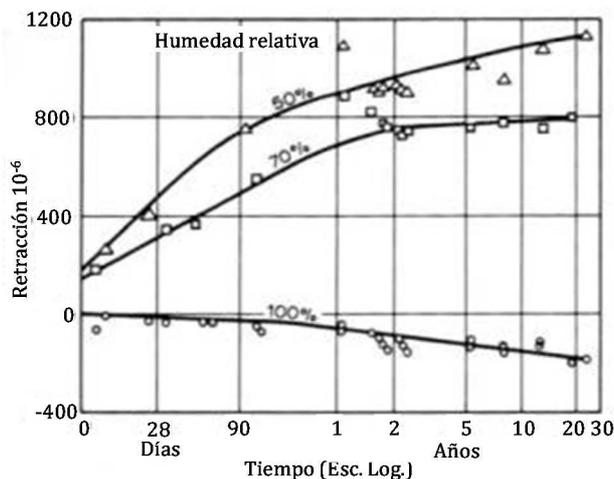


Figura 2.6 – Relación entre la retracción y el tiempo para hormigones almacenados a diferentes humedades relativas (Neville, 2011)

### Edad del hormigón

La pasta de cemento presentará una mayor tendencia a la retracción en las primeras horas posteriores al vertido. Esta retracción es menor en el caso de que se dé un buen curado y conservación del elemento en un ambiente húmedo. Esta tendencia se verá disminuida a partir del momento en el que se completa la hidratación (Madrid & Largacha, 1985). Se ha observado 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 de 4,25 y 6,75 y agua/cemento entre 0,5 a 0,8, curadas entre 28 y 90 días y conservadas posteriormente a 20°C, con una humedad relativa de 50 a 70% (Canovas, 2007).

### Tipo y contenido de cemento

Los cementos ricos en aluminato, presentarán una reacción más fuerte que aquellos que tienen un bajo contenido de esta fase. 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 él por unidad de peso. Por consiguiente, mayor será también la retracción experimentada por la pasta pura de cemento.

Por otra parte, 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 (Canovas, 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. Tal como se observa en la figura 2.7, 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 hormigones con diferentes contenidos de cemento, conservados a 20°C, 50% de humedad relativa y velocidad de viento de 3,6 km/h (Canovas, 2007).

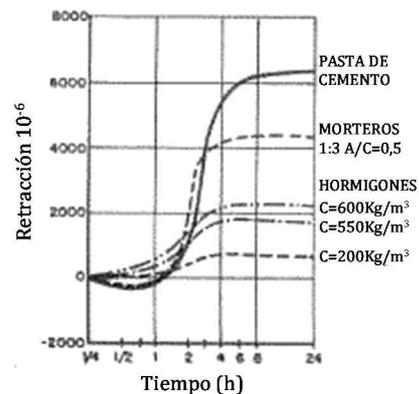


Figura 2. 7 – Influencia del contenido de cemento en la retracción (Canovas, 2007)

### 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 misma edad es inferior en las piezas de mayor tamaño. 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 (Madrid & 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 da 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 2.8 se presenta gráficamente un resumen de los diversos factores que pueden intervenir en la retracción del hormigón.

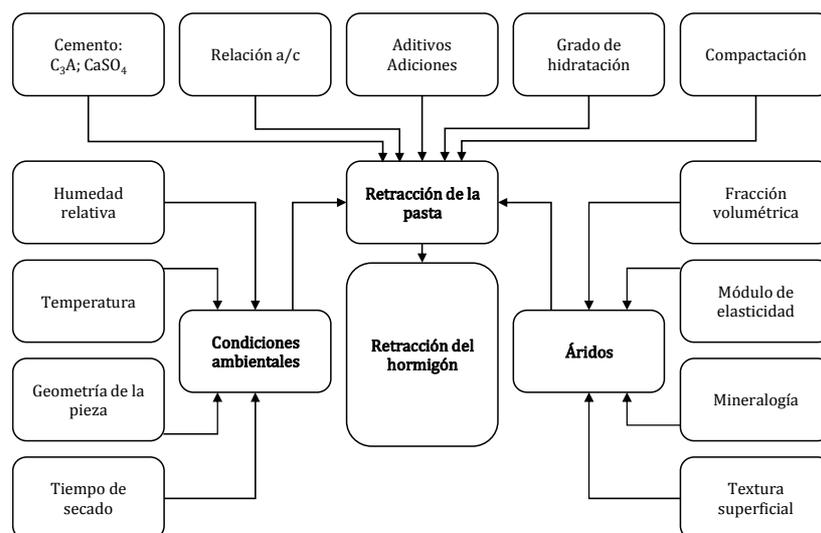


Figura 2. 8 – Variables que interactúan en la retracción del hormigón (Ruiz, 2009)

## 2.5 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 la reducción de la relación agua/cemento, utilizando en su caso fluidificantes para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, uso de líquidos de curado, adiciones de fibras en el hormigón, o la utilización de hormigón con aditivos reductores de retracción (SRA),

El hormigón con retracción compensada, ha ofrecido una buena alternativa en términos de coste-beneficio, por eso esta alternativa ha sido usada de manera efectiva en losas, tanques de almacenamiento de agua, y digestores de aguas residuales, entre otros (Mehta & Monteiro, 2006).

El uso de del HRC es un método efectivo para eliminar o minimizar la fisuración por retracción en elementos de hormigón. El funcionamiento de estos hormigones se basa en la incorporación de una cantidad controlada de compuestos expansivos en la mezcla. Estos compuestos son, principalmente, sulfo-aluminato de calcio y/u óxido de calcio (CaO). La hidratación del primero, juntamente con el OPC genera etringita, mientras que la hidratación del segundo produce hidróxido de calcio (portlandita). El HRC deberá generar una expansión igual o ligeramente superior a la retracción por secado prevista. En la figura 2.9 se representa del concepto del HRC, comparándose el comportamiento entre un hormigón con cemento expansivo y uno con cemento portland normal durante el periodo de curado húmedo y el periodo de secado al aire.

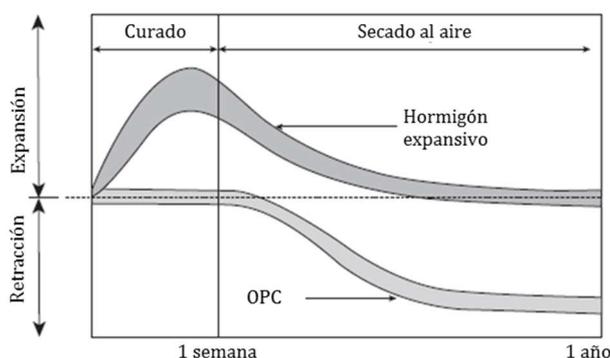


Figura 2. 9 –Comportamiento del hormigón con cemento expansivo (Mehta & Monteiro, 2006)

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 retracción cuando es expuesto al ambiente externo. El HRC, por el contrario, 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 las condiciones de contorno. Esta precompresión desaparecerá o se verá reducida en el momento en que se dé la retracción del elemento.

El uso de estos hormigones puede ser más eficiente en el momento de contrarrestar no solo la retracción por secado a edades tempranas, sino la que se da a largo plazo en las losas de hormigón. El poder solucionar las patologías que se dan en la construcción de pavimentos de hormigón, se

podrían obtener beneficios como una mayor calidad, durabilidad, mayor tamaño de la losa, reducción de juntas y, posiblemente, menores costes en su ejecución. Para esto se debe verificar el comportamiento de dichos hormigones, observando si reaccionan y producen la expansión a los niveles necesarios para alcanzar dicha meta, y así contrarrestar los esfuerzos producidos por la retracción por secado, principalmente. El hormigón con retracción compensada puede obtenerse de dos maneras; mediante el uso de cemento expansivo o de aditivos expansivos.

### 2.5.1 Funcionamiento y descripción

En el esquema que se muestra en la figura 2.10 se describen los distintos caminos posibles para conseguir un hormigón compensador de la retracción. El esquema se divide en 4 bloques. El primero se denomina “Objetivo”, en el que se enmarca el resultado de las posibles combinaciones que siguen. El segundo bloque engloba los distintos productos para llegar al “Objetivo”, es decir, de manera genérica, que tipo de materiales son susceptibles de ser usados para dicha finalidad. Seguidamente se describen los distintos productos que se pueden enmarcar dentro de cada uno de los puntos anteriores. Finalmente, se describen los materiales o componentes de que consta cada producto.

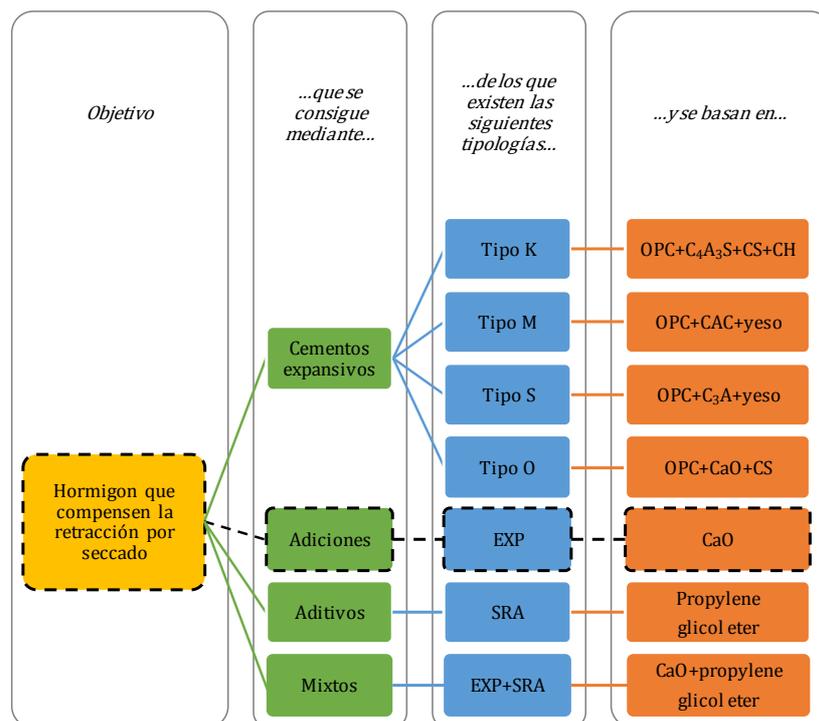


Figura 2. 10 – Esquema para conseguir hormigones compensadores de retracción (Corinaldesi, 2012; Maltese et al., 2005; Mather, 1970; Mehta & Monteiro, 2006; Onoda Cement Company, n.d.)

Para el caso específico de esta tesis se centrará la investigación en los cementos con adiciones expansivas (EXP), donde la expansión se generará mediante óxido de cal (CaO), marcado con líneas discontinuas en la figura 2.10. Para poder entender el esquema, es necesario aclarar una serie de conceptos para tener una idea general de estos hormigones (Mehta & Monteiro, 2006).

- Cementos expansivos: son cementos que a diferencia de un OPC expanden justo después del fraguado.
- Cementos compensadores de retracción: son cementos que generan una expansión pequeña pero suficiente para compensar la de la retracción por secado del mismo.
- “Cementos autotensados”: son los cementos que generan una expansión mayor y pueden ser usados para la ejecución de elementos de hormigón pretensados.
- Aditivos reductores de retracción (SRA): son aditivos que disminuyen la tensión superficial del agua retenida en los microporos del hormigón, reduciendo la tendencia a su evaporación para evitar así retracciones y tensiones internas que podrían causar fisuración del hormigón (BASF, SIKA). Pueden llegar a reducir la retracción por secado del hormigón hasta en un 43% (Videla & Aguilar, 2005).
- Hormigones de retracción compensada (HRC): es un hormigón de cemento expansivo o similar que expandirá en un grado igual o algo superior a la retracción por secado. Estas expansiones serán controladas por el armado o confinamiento y las tensiones que se generarán se verán reducidas durante la retracción por secado posterior. Según Mehta *et al* (Mehta & Monteiro, 2006), la magnitud del pretensado del HRC ha de estar entre 0,1 y 0,7MPa para conseguir este efecto de compensación de la retracción.

## 2.5.2 Factores que influyen en la expansión

La expansión en el hormigón puede verse afectada por diferentes factores, los principales se exponen a continuación (Madrid & 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  $\text{CaSO}_4$  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/cm<sup>2</sup>, 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 afectadas de forma diferente por la temperatura y la disponibilidad de agua de curado. Un curado descuidado puede reducir el nivel de expansión

## 2.6 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 retracción del elemento: En primer lugar, se debe realizar una predicción suficientemente fiable de la retracción 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 requerida: Según ACI 223R, para proporcionar una compensación de la retracción satisfactoria, la expansión requerida en el elemento restringido, debe ser mayor, o por lo menos igual a, la retracción esperada.
- Estimación de la expansión mínima requerida en el ensayo ASTM C878: Esta expansión máxima, se determina mediante las figuras 2.11a y 2.11b dependiendo del tipo de aditivo expansivo utilizado. Las figuras se muestran en la norma ACI 223-10 y están basadas en los datos publicados por Russell (H. G. Russell, Stadler, & Gelhardt, 2002; Henry G. Russell, 1973).

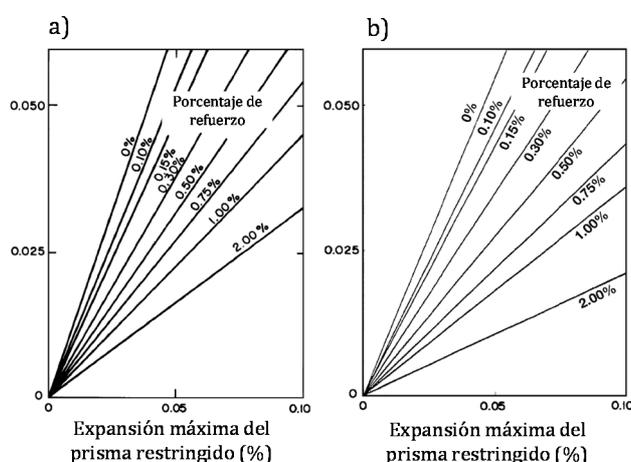


Figura 2.11 – Estimación de la expansión mínima para sistemas basados en la formación de etringita (a) (Henry G. Russell, 1973) y en la formación de hidróxido cálcico (b) (H. G. Russell et al., 2002)

## 2.7 Medición de la expansión en el hormigón

En la actualidad no existe ninguna norma española que defina los métodos de caracterización de los hormigones expansivos con base en cementos o adiciones. En relación con los cementos expansivos únicamente se han encontrado empresas o suministradores que distribuyen este material con la única finalidad de demolición de rocas o estructuras sin explosivos (figura 2.13). Con el fin de poder caracterizar estos hormigones hay que emplear normas extranjeras como las definidas en las normas ASTM o las del ACI.



Figura 2. 12 – Roca rota mediante el uso de morteros expansivos (Fuente: cemento BROKE S.L.)

No obstante, sí que es posible realizar actualmente un hormigón de baja retracción mediante el uso de aditivos que sí están normalizados. Estos se basan en adiciones reductoras de retracción (SRA) que actualmente pueden encontrarse en empresas como BASF y Sika. Los productos SRA que ofrecen se denominan MasterLife SRA 2 y Sika Control 50, respectivamente.

### 2.7.1 Medición de la expansión y diseño

Con la finalidad de poder caracterizar los HRC es necesario hacer uso de normativas extranjeras. Las más conocidas y usadas para la medición de la expansión son las que se encuentran en el ASTM. Por otra parte, existe una normativa que ayuda con el diseño de estos hormigones, y que se encuentra en el ACI. Seguidamente se explicará en que consiste cada una de ellas.

Con tal de caracterizar las expansiones que se producen en un HRC se puede hacer uso de la norma ASTM C878 “*Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete*” (ASTM, 2009). Mediante este método de ensayo se puede determinar la cantidad de material expansivo necesaria para lograr los niveles deseados de expansión en el hormigón, entre otras variables. En relación con esta norma se encuentra la ASTM C845 “*Expansive Hydraulic Cement*” que especifica los ensayos a realizar para la caracterización de los cementos expansivos (ASTM, 1996).

En el caso del diseño de HRC es necesario el uso de la norma ACI 223R-10 “*Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete*” (ACI Committee, 2010). Con base en esta norma, para diseñar un HRC se deben seguir los pasos que se muestran en la figura 2.14.

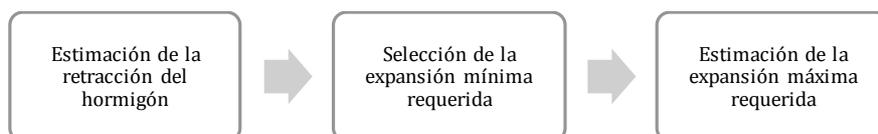


Figura 2. 13 – Diseño de un HRC

Los pasos mostrados en la figura 2.14 se describen de la siguiente manera. En primer lugar, para la estimación de la retracción del hormigón, debe de realizarse una predicción fiable de la retracción. Esta puede calcularse mediante lo especificado en el artículo 39.7 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008). Seguidamente se definirá la expansión mínima requerida, que deberá ser igual o algo mayor a la retracción esperada. Finalmente, se determinará dicha expansión mediante la norma ASTM C878 antes mencionada y en base a los gráficos que pueden encontrarse en el ACI 223R-10.

La determinación de la expansión generada mediante la norma ASTM C878 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 vierte 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 de aproximadamente 290 mm (incluyendo la longitud de las tuercas de la varilla y la tapa). 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 tuercas hexagonales fuera de la jaula. Esta jaula de restricción se muestra en la figura 2.15. El curado y el régimen de medición para los prismas (HRC) son idénticos al de los prismas para mezclas tradicionales de hormigón.

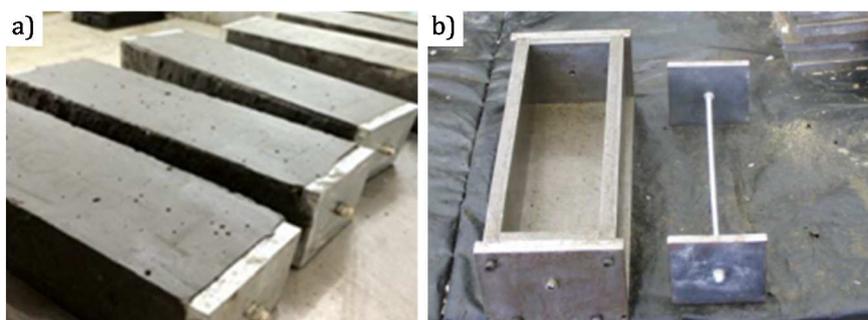


Figura 2. 14 – Molde para medida de expansión restringida (Alarcon, 2012)

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 600x150x150 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 et al., 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 100x10mm. La distancia entre los extremos que constituyen la galga de medida es de 100mm.

Este sistema de medida es ligero y solo ejerce una presión de 0,25KPa sobre la superficie de hormigón.

También se ha utilizado el ensayo de panel restringido, para medir las características de retracción del hormigón en grandes superficies, el cual está formado por un molde metálico de 100x800x800mm. 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 3mm de espesor. La restricción en los extremos se obtiene mediante 3 filas de pernos restringiendo el movimiento en las dos direcciones horizontales.

Además de las normas estadounidenses especificadas, existen otras para la caracterización de retracciones y de expansiones. En primer lugar, la norma italiana UNI 11307 (UNICEMENTO, 2008b) permite caracterizar la retracción de hormigones. Como se ha visto, esto representa el primer paso para poder determinar el grado de expansión final a conseguir. Seguidamente, mediante la norma, igualmente italiana, UNI 8184 (UNICEMENTO, 2008a) se determina el grado de expansión del hormigón. Esta norma es muy parecida, en cuanto a procedimiento, a la americana ASTM C878.

## 2.8 Aplicaciones del hormigón con retracción compensada

Desde mediados de los años 60 y hasta la fecha los HRC han sido usados para diversas aplicaciones. Entre estas aplicaciones se encuentran autopistas, pistas de aterrizaje, tableros de puentes (Gruner & Plain, n.d.; Ramey, Pittman, & Webster, 1999), estructuras hidráulicas, plantas de tratamiento de aguas residuales, estructuras de contención (Eskildsen, Jones, & Richardson, 2009; Hoffman, 1980), estructuras de parquin y losas de pavimentos (Bailey, Barbour, Cupp, Holland, & Knight, 2001; M. Collepardi et al., 2008; Keith, Walker, & Holland, 1996).

Existen también otras posibilidades del uso de este material para el uso de estructuras especiales. Uno de estos casos se encuentra en el museo MAXXI de Italia. En la figura 2.16 se muestran dos imágenes de dicho museo, la primera durante la ejecución y la segunda una vez terminado. De esta experiencia existe un informe de Trolli *et al* donde se resume el porqué del uso de este material (Troli & Collepardi, n.d.). Hay que mencionar que para este caso en especial el hormigón estaba compuesto por un HRC con CaO y un aditivo reductor de retracción (SRA).

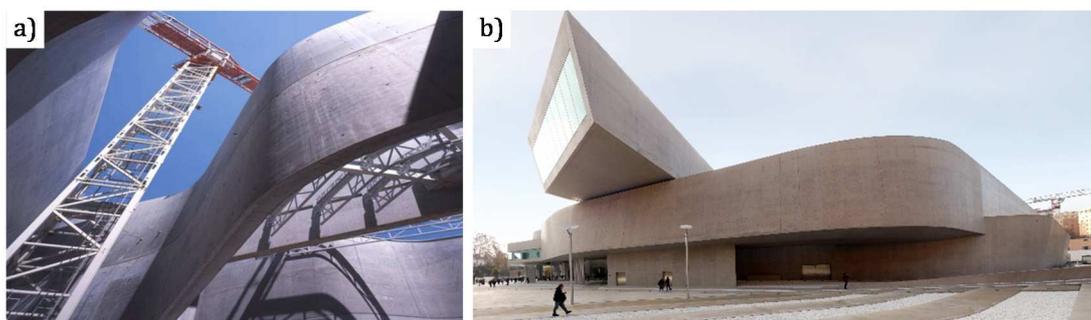


Figura 2. 15 – Museo MAXXI, en Italia, realizado con HRC

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

900m<sup>2</sup>, respectivamente. Como se ha visto anteriormente, esta técnica está basada en una expansión restringida temprana, que ocurre entre el agente expansivo y el agua. Durante la coacción 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.

## 2.9 Conclusiones parciales

Como conclusión del apartado se puede decir que los pavimentos sin juntas son una importante línea de investigación en el área de los hormigones expansivos. Con estos hormigones se pueden mejorar las prestaciones de un pavimento tradicional. En la mayoría de los casos se usa SRA para mejorar las prestaciones como en el caso del museo MAXXI.

En los pavimentos tradicionales existen siempre problemas derivados de las juntas inducidas, del sellado de estas y principalmente, del poco mantenimiento que se les da. La posibilidad de realizar pavimentos continuos o en los que se pueda reducir la cantidad de juntas, disminuiría las lesiones que se derivan de estas y, por consiguiente, el coste del mantenimiento.

A nivel químico no se han encontrado estudios de la interacción entre el cemento y la cal o de las propiedades químicas o mecánicas de la sinergia entre ambos componentes, sino que más bien se centran en el efecto de la adición de cal en el proceso de disolución de alguno de los componentes del cemento. En el caso de la caracterización de la tensión de confinamiento que produce la expansión generada por la cal es necesario investigar y profundizar sobre este tema,

# 3 Programa experimental: planificación de la investigación y caracterización de los materiales

## 3.1 Introducción

La revisión de la literatura expuesta en el Capítulo 2, mostraba las diferentes estrategias que se siguen actualmente para el desarrollo de hormigones de retracción compensada (HRC), así como los estudios existentes sobre la interacción cemento-cal. Si bien hay abundante literatura acerca del empleo de cal y otros aditivos para desarrollar HRC, entre los que destacan los trabajos de Collepari et al (Mario Collepari et al., 2005; Troli & Collepari, n.d.), se pudo verificar la ausencia de estudios sistemáticos sobre la interacción cemento-cal y las posibles sinergias que se establecen entre los procesos de hidratación de ambos materiales.

Por tanto, resulta relevante entender en primer lugar los procesos que tienen lugar durante la hidratación del sistema cemento-cal, para posteriormente relacionarlo con el proceso de expansión que tiene lugar. De este modo, se podrá alcanzar el objetivo principal de la presente tesis doctoral, que es el planteamiento de una metodología de diseño de HRC.

Con este propósito, se ha planteado una campaña experimental que permita abordar de manera integral el estudio de la hidratación del sistema cemento-cal, así como el estudio del proceso de expansión en materiales cementicios con adición de cal. Mediante el proceso de hidratación, y

comparando este con el de un cemento convencional, se puede determinar si la adición genera cambios en la curva de hidratación así como si se trata de un efecto sumado o si por el contrario existe una sinergia entre ambos. Por otra parte, y de manera complementaria, los ensayos del proceso expansivo permitirán entender dicho proceso y las características de este así como relacionarlo con el ensayo de hidratación.

El objetivo del presente capítulo es presentar el planteamiento experimental realizado, las principales características de los materiales empleados, así como describir las técnicas experimentales utilizadas.

## 3.2 Planteamiento experimental

El objetivo principal de la campaña realizada es el estudio de la sinergia entre los procesos de hidratación del cemento y la cal, así como la expansión asociada. Como fin último, lo anterior podría servir de base para el desarrollo de una metodología de diseño de HRC. Para poder lograr este objetivo se han contemplado una serie de ensayos que permitirán entender el comportamiento del material. Con el propósito poder determinar la influencia de la cal, y la interacción de esta con el cemento, se han propuesto cuatro variables para la dosificación, que son: el tipo de cemento, el tipo de CaO, el porcentaje de CaO sobre el peso del cemento y, finalmente, la relación a/c.

La decisión de contemplar estas cuatro variables como punto de partida del estudio de las propiedades de este material se basa en el efecto que tienen en el fenómeno de expansión. En el caso del tipo de cemento se basa en la variación de la finura. Según Madrid *et al* (Madrid & Largacha, 1985) el aumento de la finura de un cemento genera una menor expansión. Así mismo también afirman que la variación de los aluminatos en los cementos influye en la velocidad de formación de etringita y en la cantidad de esta. En el caso del tipo de cal se pretende estudiar el efecto de estas en la mezcla con cemento, partiendo de la base que cada una de ellas tiene un proceso de fabricación y enfriado distinto, y el contenido de CaO y Ca(OH)<sub>2</sub> es distinto entre las distintas cales usadas.

Por otra parte, el porcentaje de CaO con respecto al peso del cemento se establece como variable partiendo de la hipótesis de que a mayor contenido de cal mayor expansión. Esta expansión es debida a la hidratación del CaO y a su aumento de volumen al formarse el Ca(OH)<sub>2</sub>. Finalmente la relación a/c se toma en cuenta como variable al ser un valor que modifica la resistencia (Troli & Collepari, n.d.), así como la expansión generada (Madrid & Largacha, 1985).

En la figura 3.1 se muestra el esquema general de las campañas experimentales llevadas a cabo en esta tesis. El esquema se divide en tres bloques que se diferencian por la finalidad de los ensayos realizados. Estos bloques engloban desde los ensayos que se sitúan en una escala microestructural hasta los que se realizan a escala macro como son las experiencias de campo.

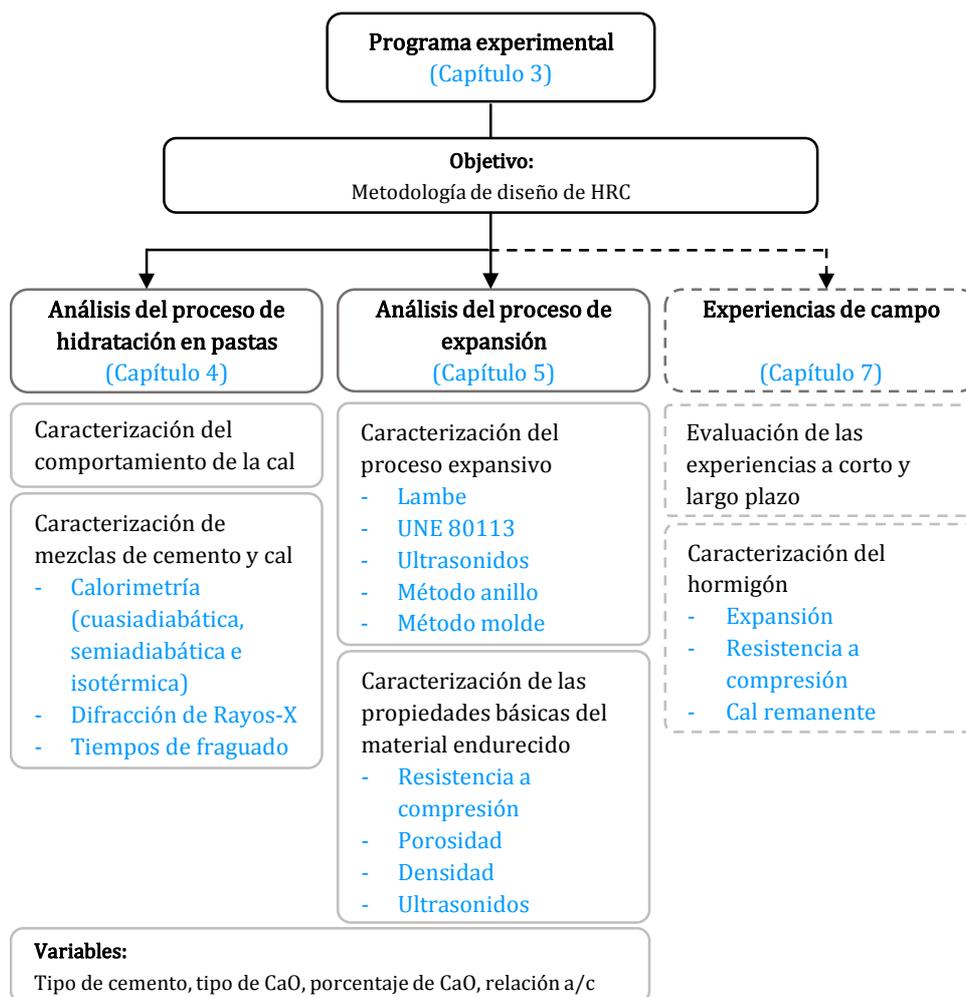


Figura 3. 1 – Esquema de la campaña experimental

Tal como se muestra en la figura 3.1, el primer bloque contempla los ensayos químicos destinados principalmente al estudio del proceso de hidratación de pastas de cemento y cal mediante ensayos de tiempo de fraguado, calorimetría y de difracción de Rayos-X. A partir de estos ensayos se puede relacionar la evolución del proceso de hidratación de las pastas con las fases que se forman y la combinación de estas.

El segundo bloque engloba los ensayos enfocados a caracterizar el proceso de expansión de estos materiales. En este caso se contemplan ensayos propios, así como normalizados. En el caso de los ensayos propios, estos se definirán en el apartado correspondiente. Finalmente, el último bloque contempla los ensayos realizados en obras reales en las que se usó el HRC con adición de cal para hormigonar distintos elementos, en la mayoría de los casos, losas. Este último bloque se describirá en su totalidad en el Capítulo 7.

### 3.2.1 Nomenclatura de las mezclas estudiadas

La introducción de cuatro variables en el sistema de dosificación requirió de una nomenclatura simple y, a su vez, fácil de identificar. La nomenclatura de cada una de las dosificaciones, usando los parámetros y las variables descritas en el apartado anterior, se forma de la manera que se muestra en la tabla 3.1. En dicha tabla se proporciona también algún ejemplo para

facilitar el entendimiento de la misma. La nomenclatura propuesta permite identificar desde el tipo de material fabricado hasta el valor de las variables consideradas en cada caso.

Material final	Material fabricación	Tipo CaO	Relación a/c	% CaO	Ejemplo
- (producto) P (pasta) M (mortero) H (hormigón)	C (cemento)	-		0	
	A (CaO)	1Na			
		2Ad	0,35	1 %	A1Na35-4
		3Ad	0,45	4 %	PB2Ad60-1
	B (CaO)	1Na	0,60	7 %	MA3Ad45-7
		2Ad		14 %	

Tabla 3. 1 - Nomenclatura de las dosificaciones

En la nomenclatura descrita en la tabla 3.1 se identifica en primer lugar el tipo de material de la muestra, ya sea el análisis del material sin mezclar, una pasta, un mortero o un hormigón. En segundo lugar se introducen los materiales de que está formado, es decir, si es únicamente cemento o si contiene CaO y, en este caso, se define también el tratamiento específico de este. En tercer lugar se identifica la relación a/c y, finalmente, el porcentaje de CaO sobre el peso de cemento. Como ejemplos se muestra la nomenclatura para el análisis de una dosificación de cal (A1Na35-4), de una pasta de cemento y cal (PB2Ad60-1) y, finalmente, de un mortero de cemento y cal (MA3Ad45-7).

### 3.3 Análisis del proceso de hidratación

#### 3.3.1 Materiales

A fin de poder investigar la interacción entre el cemento y el CaO se trabajó con dos tipos de cemento y cinco tipos de cales. En cuanto al cemento se usó un cemento Portland tipo I 42,5R suministrado por la empresa Lafarge para la calorimetría cuasiadiabática y semiadiabática y con un cemento Portland tipo I 52,5R suministrado por la empresa Ciments Molins para la calorimetría isotérmica y los ensayos de DRX en continuo.

El CaO fue suministrado por la empresa Cales de Pachs S.A. Con respecto al CaO, se consideraron dos tipologías que se diferencian en el proceso empleado para la cocción del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). En función del proceso seguido, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) residual varía entre el 0,8 y el 1,5%, produciendo por tanto curvas de apagado diferentes para cada CaO. Dentro de cada tipología, se consideró el efecto de emplear un aditivo retardante del proceso de hidratación.

Además de los dos materiales principales se ha usado también un aditivo superplastificante del tipo MC-TechniFlow suministrado por la empresa MC-Bauchemie y agua destilada. Finalmente, hay que mencionar que también se usó filler calizo para la campaña de determinación de la temperatura de hidratación del CaO.

### 3.3.2 Dosificación

Se establecieron dos metodologías de dosificación en función del volumen de material necesario. El primer método se basa en dosificar a partir de la densidad de los materiales, mientras que el segundo se establece a partir de un peso fijo de cemento. La dosificación a partir de la densidad de cada uno de los componentes se usó para las calorimetrías semiadiabáticas, y la dosificación a partir del peso del cemento para los ensayos de calorimetría isotérmica y de difracción de Rayos-X (DRX).

#### a) Dosificación por densidades de los componentes

El sistema de dosificación por densidades se obtuvo de la tesis *El rol físico del agua en mezclas de cemento portland* (Klein, 2012) y se adaptó a los materiales usados en esta campaña. Para este caso, los valores usados son los que se muestran en la tabla 3.2.

	Materiales										
	CEM 42,5R	CEM 52,5R	A1Na	A2Ad	A3Ad	B1Na	B2Ad	Filler	Arena	Super- plastificante	Agua destilada
Densidad	3010	3150	3090	3030	2810	3040	3020	2770	2800	1120	1000

Tabla 3. 2 - Densidades de los materiales empleados (unidades en kg/m<sup>3</sup>)

El peso de cada uno de los componentes se calcula con base a un valor de referencia del cemento (C) o del filler (F). En el caso de la cal y del superplastificante (SP) se calculan sobre el peso del cemento (spc), siendo para la cal una de las variables y para el aditivo SP un 1%. En el caso del agua se realizaron una serie de ajustes con el propósito de introducir en la mezcla la cantidad de agua correcta. Para el cálculo hay que tener en cuenta la relación a/c, el agua estequiométrica necesaria para hidratar el CaO y la fracción líquida del aditivo. Para determinar la cantidad de agua estequiométricamente necesaria se parte de la reacción química de la hidratación del CaO que se muestra en la ecuación [3.1]. Esta establece que por cada mol de CaO es necesario un mol de agua (H<sub>2</sub>O) para producir un mol de portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>). Conociendo los pesos moleculares de cada compuesto (CaO: 56 g/mol; H<sub>2</sub>O: 18 g/mol; Ca(OH)<sub>2</sub>: 74 g/mol) se establece que cada gramo de CaO precisa de 0,3214 g de agua para su hidratación estequiométrica.



$$\text{Agua}(W) = \left[ C \cdot \frac{a}{c} + (L \cdot 0.3214) - (0.7 \cdot \text{SP}) \right] \quad [3.2]$$

Finalmente, tal como se muestra en la ecuación [3.2] el agua se calcula sumando el agua del cemento, la del CaO y restando el porcentaje de agua que contiene el aditivo, que para este caso específico es del 70%. Una vez obtenidos los pesos de cada uno de los materiales intervinientes se procedió a calcular el peso de cada uno de los componentes por metro cúbico de mezcla.

Una vez obtenido el peso por metro cúbico de cada uno de los componentes se ajustaron al volumen del molde del elemento a fabricar. Al realizar este ajuste se consiguió aprovechar mejor el material disponible y reducir las mermas. Los pesos obtenidos mediante este método para las pastas de cemento, las pastas de cemento y cal A1Na y las pastas de filler y cal A1Na son los que se muestran en la tabla 3.3 y 3.4. Los valores expresados en ambas tablas muestran los pesos en kilogramos por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>).

Material	% CaO	Relación a/c		
		0,35	0,45	0,60
C	0%	1493,90	1299,73	1087,68
SP		14,94	13,00	10,88
W		512,41	575,78	644,99
C	1%	1479,64	1288,93	1080,10
L		14,80	12,89	10,80
SP		14,80	12,89	10,80
W		512,27	575,14	643,97
C	4%	1438,46	1257,56	1057,99
L		57,54	50,30	42,32
SP		14,38	12,58	10,58
W		511,88	573,27	640,99
C	7%	1399,50	1227,69	1036,76
L		97,97	85,94	72,57
SP		14,00	12,28	10,37
W		511,51	571,49	638,13

Tabla 3. 3 – Dosificación para pastas de cemento y pastas de cemento y cal A1Na ( $\text{kg/m}^3$ )

Material	% CaO	Relación a/c		
		0,35	0,45	0,60
F	1%	1390,07	1220,42	1031,58
L		13,90	12,20	10,32
SP		13,90	12,20	10,32
W		481,26	544,57	615,04
F	4%	1353,66	1192,26	1011,39
L		54,15	47,69	40,46
SP		13,54	11,92	10,11
W		481,71	543,50	612,76
F	7%	1319,10	1165,38	991,97
L		92,34	81,58	69,44
SP		13,19	11,65	9,92
W		482,13	542,48	610,56

Tabla 3. 4 – Dosificación pastas de filler y cal A1Na ( $\text{kg/m}^3$ )

#### b) Dosificación por peso de cemento

El sistema de dosificación por peso de cemento se estableció para los ensayos de determinación del calor de hidratación y de análisis de evolución de las fases mediante difracción de Rayos-X (DRX). En ambos ensayos la cantidad de material necesaria se reducía a pocos gramos debido a los límites de medición del calorímetro, así como a las dimensiones de los portamuestras para los ensayos de DRX.

Las dosificaciones usadas para la calorimetría isotérmica son las que se presentan en la tabla 3.5. En dicha tabla se muestran los pesos en gramos (gr) para las dosificaciones de pastas de cemento (0% CaO) y para las dosificaciones con cal (1, 4, 7 y 14%). Se observa que para el caso del porcentaje de cal del 14% el peso del cemento se redujo a 6 gr. Este cambio se debe al calor de hidratación que generan tanto el cemento como la cal cuyo valor puede llegar a superar los límites de medición del calorímetro isotérmico.

Material	% CaO	Relación a/c		
		0,35	0,45	0,60
C		11,00	11,00	11,00
SP	<b>0%</b>	0,11	0,11	0,11
W		3,77	4,87	6,52
C/F		11,00	11,00	11,00
L	<b>1%</b>	0,11	0,11	0,11
SP		0,11	0,11	0,11
W		3,81	4,91	6,56
C/F		11,00	11,00	11,00
L	<b>4%</b>	0,44	0,44	0,44
SP		0,11	0,11	0,11
W		3,91	5,01	6,66
C/F		11,00	11,00	11,00
L	<b>7%</b>	0,77	0,77	0,77
SP		0,11	0,11	0,11
W		4,02	5,12	6,77
C/F		-	6,00	-
L	<b>14%</b>	-	0,84	-
SP		-	0,06	-
W		-	3,93	-

Tabla 3. 5 – Dosificación para calorimetrías isotérmicas para pastas de cemento y pastas de cemento, o filler, y cal (gr)

Paralelamente al ensayo de las dosificaciones con cemento fue necesario establecer la curva de calor de hidratación que producía la cal de manera independiente. En este caso se ensayaron las dosificaciones A1Na45-7, A2Ad45-7, A3Ad45-7, B1Na45-7, B2Ad45-7, B1Na45-14 y B2Ad45-14 en las que se sustituyó el cemento por filler (F). Los pesos de cada una de estas dosificaciones ya se muestran también en la tabla 3.5.

La dosificación usada para las muestras de DRX se basa en el mismo cálculo que el caso anterior. Para este caso, las muestras estudiadas se redujeron a las dosificaciones: PC45-0; PA1Na45-7; PA2Ad45-7; PA3 Ad45-7; PB1Na45-7; PB2Ad45-7; PB1Na45-14 y PB2Ad45-14. Los pesos de los materiales usados en estas dosificaciones son los que se muestran en la tabla 3.6.

Material	% CaO	Relación a/c
		0,45
C		3,00
SP	<b>0%</b>	0,03
W		1,33
R		0,60
C		3,00
L	<b>7%</b>	0,21/0,42*
SP		0,03
W	<b>14%*</b>	1,40/1,46*
R		0,60

Tabla 3. 6 - Dosificación para DRX para pastas de cemento y pastas de cemento y cal (gr)

Tal como se observa en la tabla 3.6 aparece un nuevo material denominado con la letra “R” y que corresponde con el Rutilo (TiO<sub>2</sub>). Este material se usó para poder determinar de manera semicuantitativa el porcentaje de cada una de las fases cristalinas existentes en la mezcla para cada período de tiempo analizado. El porcentaje de este se estableció en un 20% del peso del cemento. Hay que mencionar que este componente no reacciona con el resto de fases por lo que siempre existirá la misma cantidad de este en la mezcla y permitirá la comparación de los diagramas a distintas edades.

### 3.3.3 Caracterización de los materiales base

Como primer paso de las campañas experimentales planteadas se realizó la caracterización de los materiales base, principalmente de los CaO anhidros. El principal objetivo de esta determinación era establecer las características físico-químicas de los diferentes tipos de cal empleados.

La caracterización de del CaO anhidro permitió determinar las propiedades físicas de las diferentes muestras estudiadas (densidad, superficie específica y tamaño de partícula), conocer su composición química y mineralógica (FRX, DRX y ATD-TG) y por último, determinar su reactividad potencial (reactividad frente al ácido cítrico). En este apartado se describirán de manera específica cada uno de los ensayos llevados a cabo durante este proceso de caracterización.

#### a) Densidad real

La densidad de las muestras fue determinada mediante un picnómetro de Helio (AccuPyc 1330 V2.01). La medida de la densidad mediante esta técnica se basa en la aplicación de los gases ideales, descrita por la ecuación [3.3], donde  $P$  es la presión del gas (en atm),  $V$  el volumen que ocupa (en L),  $n$  el número de moles,  $R$  es una constante ( $0.085 \text{ atm}\cdot\text{L}/\text{mol}\cdot^\circ\text{K}$ ) y  $T$  la temperatura absoluta (en  $^\circ\text{K}$ ):

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad [3.3]$$

La ley de Boyle-Mariotte es una ley derivada de la anterior, la cual establece que mientras se mantenga constante la temperatura, el volumen es inversamente proporcional a la presión, cómo se expresa en la ecuación [3.4].

$$P \cdot V = k \quad [3.4]$$

El picnómetro de Helio mide la caída de presión producida cuando a un gas sometido a una presión conocida en el interior de una cámara junto con la muestra estudiada (cámara o célula portamuestras) se le permite fluir a otra cámara (cámara o célula de expansión), ambas de volumen conocido, como se muestra en la figura 3.2. Esta caída de presión es proporcional al volumen de la muestra estudiada.

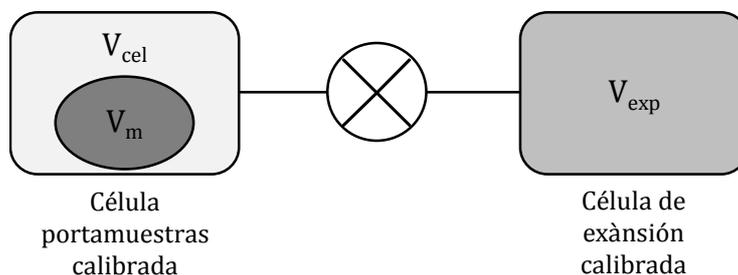


Figura 3. 2 - Esquema del interior de un picnómetro de Helio

#### b) Superficie específica (BET)

La determinación de la superficie específica de las muestras se realizó mediante la metodología BET. El ensayo se basa en la determinación de las isothermas de adsorción de un gas

sobre el sólido del cual se quiere determinar la superficie específica. En este caso concreto se empleó  $N_2$ . Para la realización del ensayo se empleó un equipo Micromeritics Tristar 3000.

#### c) Tamaño de partícula

La determinación del tamaño de partícula y la distribución de estas se realizó mediante un equipo de determinación por láser (Beckman Coulter LS 13 320). De manera previa a la realización del análisis, la muestra fue dispersada mediante un baño de ultrasonidos, durante 5 minutos, en una solución de etanol como medio portante.

La dispersión del láser determina el volumen de las partículas. Esto significa que, con ayuda de la dispersión del láser, el resultado de una medición permite saber qué porcentaje del volumen total de la muestra tiene partículas más pequeñas de un tamaño determinado. Por norma general, este índice característico se conoce como  $Q_3(x)$ . También se puede saber qué porcentaje del volumen total de la muestra tiene partículas situadas dentro de un intervalo de tamaños determinado. Este índice característico se conoce como  $dQ_3(x)$ .

#### d) Fluorescencia de rayos-X (FRX)

Para determinar el porcentaje de óxidos de las muestras estudiadas se realizaron análisis de fluorescencia de rayos-X (FRX). Para ello se empleó un espectrofotómetro secuencial de rayos-X por dispersión de longitud de onda (WDXRF) Philips PW2400. La concentración de óxidos en la muestra se determina a partir de la excitación de esta con una fuente de radiación. Los fotones que se disipan de este proceso permiten determinar la concentración de los óxidos por comparación frente a un patrón.

#### e) Difracción de rayos-X (DRX)

El estudio de las fases mineralógicas presentes en las distintas muestras se realizó mediante análisis de difracción de rayos-X, en un difractómetro PANalytical X'Pert PRO MPD Alpha1 con geometría Bragg-Brentano  $\theta/2\theta$ . Los ensayos fueron realizados empleando la radiación de  $Cu K_{\alpha 1}$  ( $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ), mediante un barrido desde  $4$  hasta  $100^\circ 2\theta$ , con un paso de  $0.017^\circ$  y tiempo de medida de 50 segundos. La identificación de las diferentes fases cristalinas se realizó empleando el programa X'Pert Highscore Plus y la base de datos PDF-2 del ICCD (*International Centre for Diffraction Data*). Los portamuestras usados el ensayo son de medida estándar de 16mm de diámetro y 1.5mm de altura, que son los que se muestran en la figura 3.3.

La figura 3.3 muestra el proceso de preparación de muestras para ensayo de DRX de materiales anhidros. Los números que se observan en dicha figura se definen como: (1) base del portamuestras; (2) tapa del portamuestras; (3) aparato para la fijación del molde y preparación del ensayo y (4) pincel para eliminar el material sobrante del enrasado.

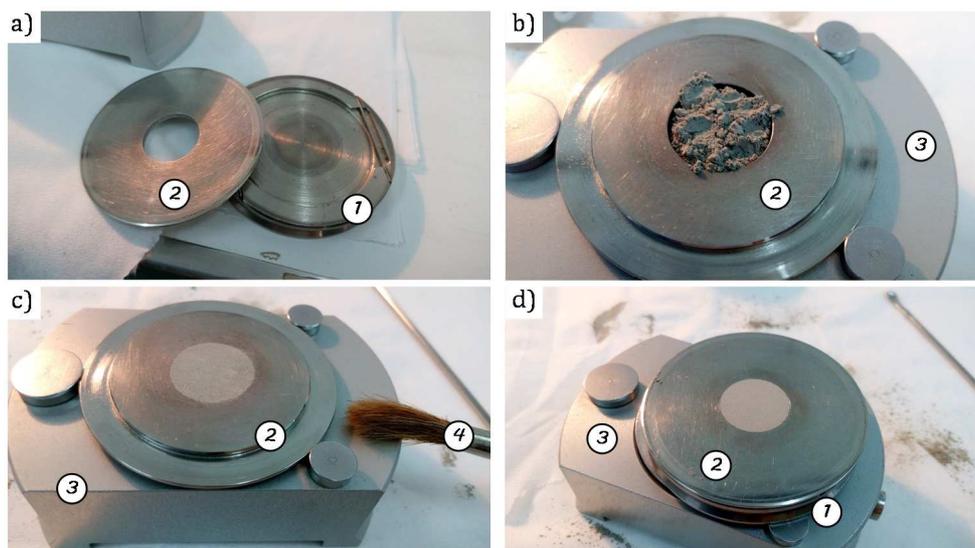


Figura 3. 3 – Proceso de preparación del cemento anhidro para ensayo de DRX. a) portamuestras estándar; b) introducción del polvo a analizar; c) enrasado del material y d) final de la preparación

#### f) Análisis térmico diferencial – Termogravimetría (ATD-TG)

Los análisis ATD-TG permiten caracterizar las muestras mientras estas son sometidas a un procedimiento de calentamiento. De este modo se puede evaluar los procesos de deshidratación/descarbonatación, así como posibles transiciones de fase. El análisis se realizó mediante un equipo SDT Q-600 de TA Instruments, empleando aproximadamente 30 mg de muestra. Las muestras fueron inicialmente estabilizadas a una temperatura de 40°C, para posteriormente ser calentadas hasta 1400°C con una rampa de calentamiento de 10°C/min. Los análisis fueron realizados tanto en atmósfera de aire como de N<sub>2</sub>, con un caudal de gas de 50mL/min.

#### g) Reactividad frente al ácido cítrico

La reactividad potencial de la cal anhidra fue determinada mediante la realización del ensayo del ácido cítrico. Este ensayo se emplea, de manera general, para determinar la reactividad del óxido de magnesio (MgO). El fundamento del ensayo está en la reacción de una masa conocida de muestra (2 g) frente a un volumen conocido de ácido cítrico (100 mL) de concentración 10 N. Mediante el registro de la variación del pH durante el tiempo es posible conocer la actividad de la muestra ensayada. En la figura 3.4 se muestran 3 fases del ensayo. Los números que se muestran se definen como: (1) agitador magnético tipo AREX de la marca VELP SCIENTIFICA; (2) vaso con disolución de agua y CaO y (3) máquina para medición del pH (pH-metro o peachímetro).

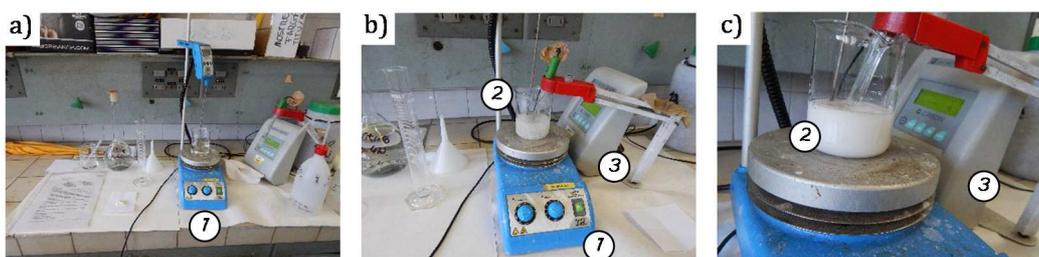


Figura 3. 4 – Ensayo de reactividad frente al ácido cítrico

### 3.3.4 Ensayos para la caracterización de pastas

#### a) Calorimetría cuasiadiabática – CEM 42.5R – Laboratorio externo

El procedimiento de ensayo se basó en una adaptación del ensayo para el control de calidad de cales realizado por la empresa. Los materiales necesarios en este caso son los que se muestran en la figura 3.5. En la figura 3.5a se observa el calorímetro cuasiadiabático tipo Dewar (1); el agitador (2); el agua destilada (3) y la cal (4), mientras que en la figura 3.5b se muestra el software para la adquisición de los datos (5).

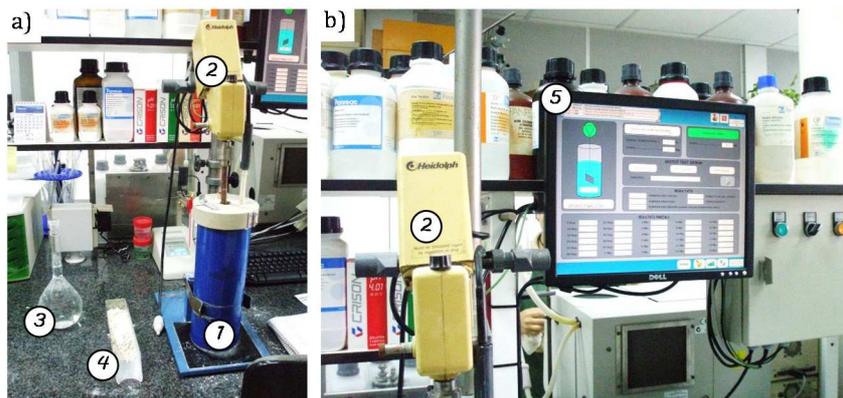


Figura 3. 5 - Ensayo de calorimetría cuasiadiabática; a) materiales y calorímetro; b) software de adquisición

El procedimiento seguido para la realización del ensayo estándar es el que se describe a continuación. Primeramente se pesan 600 ml de agua destilada, que ha de estar a  $20\text{ °C} \pm 0,5$ , y 150gr de CaO, que para el caso se usó del tipo A3Ad. Una vez pesados los materiales, se vierte el agua en el calorímetro y se pone en marcha el agitador. Cuando la temperatura se estabiliza dentro del recipiente se vierte el CaO y simultáneamente se pone en marcha el programa de adquisición de datos que los almacena cada minuto.

El ensayo modificado se realizó añadiendo cemento al ensayo base en 4 porcentajes distintos con respecto al peso del CaO. Las dosificaciones usadas para dicho ensayo contemplan los pesos de cemento en las proporciones 1 % (1,5 gr), 5 % (7,5 gr), 10 % (15 gr) y 20 % (30 gr). En todos los casos el peso de CaO se mantuvo constante para poder determinar la influencia del cemento en la mezcla base. El procedimiento de ensayo en los cuatro casos en los que se añadió cemento fue el mismo que para el ensayo base de agua y CaO con una pequeña modificación. En este ensayo se siguió el mismo procedimiento para el agua pero el cemento y la cal se introdujeron al mismo tiempo en el calorímetro. Para ello, se pesó primeramente los 150 gr de CaO en el recipiente y, después de tararlo, se pesó el cemento en el mismo recipiente. De esta manera ambos estaban en las mismas condiciones.

#### b) Calorimetría semiadiabática – CEM 42.5R

Uno de los procedimientos usados para la determinación de la temperatura de hidratación de mezclas de cemento/CaO y de CaO/filler, fue la calorimetría semiadiabática. El objeto de este ensayo es caracterizar el proceso de hidratación de las diferentes mezclas, a partir de la determinación de la variación de temperatura de las muestras. Dadas las características específicas del proyecto, se diseñó un calorímetro para la realización de los ensayos.

El calorímetro consta de dos láminas de poliestireno expandido, de 10 cm de espesor, que forman la base y la tapa del aparato en el que se puede medir un total de 8 muestras a la vez. Cada uno de los portamuestras presenta las dimensiones y la distribución que se muestran en la figura 3.6. Las partes sombreadas en dicha figura representan los huecos donde se introducen los portamuestras, que en este caso fueron recipientes desechables de plástico. Se eliminó la mitad de la altura de los vasos en cada uno de los paneles para evitar que en una de estas partes tuviera más espesor de aislamiento que en la otra.

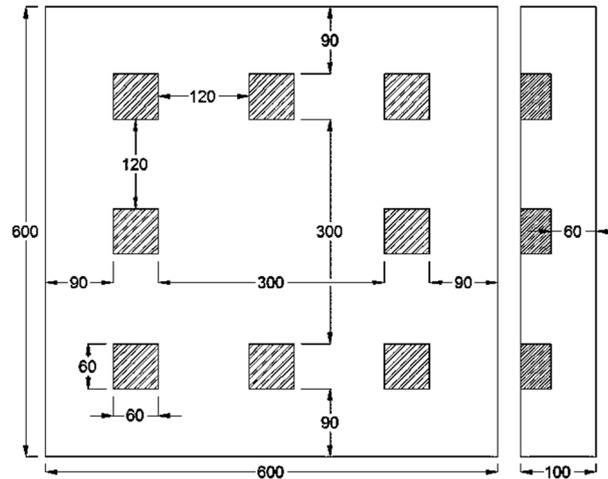


Figura 3. 6 - Dimensiones y distribución de las muestras en el calorímetro (mm). Planta y sección.

Las sondas de medida de la temperatura se introdujeron por un hueco realizado en la tapa (figura 3.7a), que permitió a su vez que la sonda quedara centrada en el recipiente (figura 3.7b). De esta manera se consiguió que todas las sondas estuvieran situadas en la parte central de los vasos y a la misma profundidad.

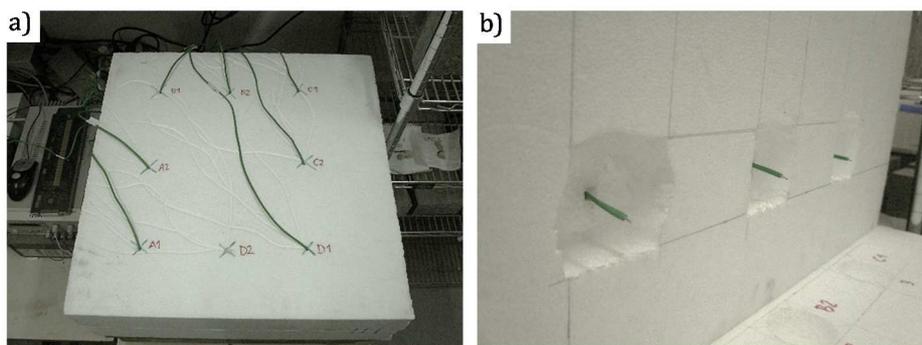


Figura 3. 7 - Detalle de colocación de los termopares en la tapa del calorímetro. a) tapa superior con las sondas; b) detalle del termopar antes de introducirse en la muestra

Una vez introducidas las muestras en el calorímetro, se dispuso en la superficie de este un encofrado de madera que se fijó mediante dos sargentos de apriete al encofrado inferior. Mediante la presión ejercida en ambas superficies del calorímetro se minimizan las pérdidas de calor del sistema por la junta de los paneles. En la figura 3.8a se muestra el calorímetro con las sondas conectadas al sistema de adquisición de datos y en la figura 3.8b se muestra calorímetro en funcionamiento. La duración del ensayo en promedio fue de 48 horas.

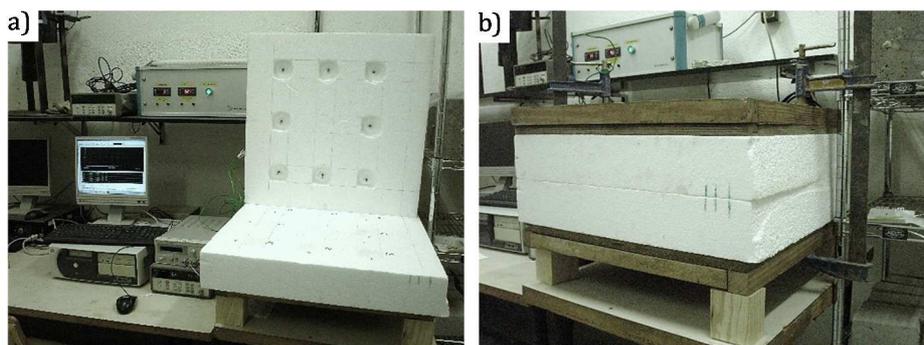


Figura 3. 8 - Detalle del calorímetro. a) calorímetro y data logger; b) calorímetro en funcionamiento

Una vez preparado el calorímetro se procedió a pesar los materiales por separado. En primer lugar se pesó el cemento directamente en el recipiente de mezclado. Seguidamente se pesó la cal y se añadió al cemento y, finalmente, se pesó el agua y el plastificante. Los tiempos de mezclado son los que se muestran en la tabla 3.8.

Material	Proceso	Tiempo
Cemento y CaO	Remover	2:00 min
H <sub>2</sub> O con aditivo	Añadir y mezclar	1:30 min

Tabla 3. 7 – Tiempos de mezclado para ensayo de calorimetría semiadiabática

Una vez finalizado el proceso de mezclado se rellenaron los recipientes de ensayo. Para asegurar que el volumen de muestra era el mismo en todos los recipientes, se realizó una marca de aforo a una altura determinada. De cada muestra de ensayo se realizaron dos réplicas para asegurar la repetitividad de las medidas realizadas. En todos los casos se realizaron determinaciones de peso de manera previa a la introducción de las muestras en el calorímetro, estableciéndose una diferencia máxima de  $\pm 0.5$  g entre las dos repeticiones. Al contener todos los recipientes el mismo volumen de material se consiguió que todas las dosificaciones realizadas fueran comparables entre sí. En la figura 3.9 se muestran los portamuestras con la marca de aforo (3.9a), la pasta de cemento endurecida con la sonda (3.9b) y las muestras ensayadas simultáneamente (3.9c).



Figura 3. 9 – Portamuestras para ensayo de calorimetría isotérmica; a) Portamuestras con marca de aforo; b) final de ensayo a 48h; c) total de muestras ensayadas simultáneamente

### c) Calorimetría isotérmica – CEM 52.5R

El ensayo de calorimetría isotérmica se realizó también para poder obtener los datos del calor de hidratación de las mezclas. Este calorímetro, con respecto al anterior, obtiene valores más precisos ya que se trata de un instrumento normalizado.

El calor de hidratación de las pastas se midió mediante un calorímetro isotérmico I-Cal 4000 de la marca CALMETRIX. El modelo de calorímetro usado puede realizar cuatro mediciones simultáneas en las que el inicio de la medición es un factor independiente. Los ensayos se realizaron a una temperatura de 20°C a excepción de las calorimetrías usadas para los análisis de DRX, cuya temperatura ambiente se estableció en 26 °C. El tiempo de ensayo se estableció en 45h ± 3. Los datos se tomaron cada 2 segundos durante las primeras 2 horas y 30 minutos y a partir de ese momento cada minuto hasta el final del ensayo.

Los materiales se pesaron en una báscula de precisión del tipo Mettler Toledo AB204-S con una precisión de ±0.001gr. El orden de pesado fue: cemento, cal, aditivo y agua. Una vez pesado el cemento se introdujo en un recipiente estanco con una capacidad aproximada de 15ml. Seguidamente se pesó la cal y se introdujo en el recipiente del cemento. Posteriormente, y directamente en los botes propios del calorímetro, se pesó el aditivo y seguidamente el agua. Finalmente, mediante un mortero de ágata, se mezcló el cemento y la cal para evitar que apareciesen grumos. Una vez listas las cuatro dosificaciones los recipientes con los materiales se introdujeron dentro del contenedor del calorímetro durante un mínimo de 24h. De esta manera todos los materiales partían de una temperatura de 20°C.

Al inicio del ensayo se extrajeron una por una las dosificaciones a mezclar y se inició la medición de la celda correspondiente. El tiempo de amasado se inició en el momento en que se vertían los sólidos en el recipiente que contenía el agua con el aditivo. Se mezcló mediante un vortex durante 45 segundos. En este momento se paró y se removió manualmente la mezcla mediante una espátula de plástico para deshacer grumos y recoger el material de los bordes del recipiente. Seguidamente se siguió mezclando con el vortex hasta el minuto 1:55. En ese momento se limpió rápidamente el exterior del recipiente y se introdujo en la celda del calorímetro a los 2 minutos del inicio del amasado. Una vez terminado el proceso se limpió la espátula y se procedió de la misma manera para el resto de las dosificaciones.

Una vez finalizados los ensayos fue necesario realizar un tratamiento de datos con el propósito de que los resultados fueran comparativos. Para esto, y previo al inicio del ensayo, se pesaron los materiales para cada una de las dosificaciones, así como los recipientes de mezclado con tapa ( $P_{r,i}$ ). De igual manera, una vez finalizado el ensayo se volvió a anotar el peso del recipiente ( $P_{r,f}$ ). De esta manera se ajustó el peso de los materiales iniciales debido a la pasta que se perdía durante el mezclado al remover con la espátula. El cálculo se realizó según la ecuación [3.5].

$$P_{\text{ajustado}} = \frac{(P_{r,f} - P_{r,i}) \cdot P_n}{\Sigma(P_n)} \quad [3.5]$$

donde  $P_n$  corresponde con cada uno de los pesos iniciales de los materiales y  $P_{\text{ajustado}}$  corresponde al peso de cálculo de los materiales mezclados. Una vez determinado el peso ajustado de los materiales se procedió a calcular el flujo de calor y la energía generada en relación a los gramos de cemento. El cálculo del Flujo de calor normalizado ( $Q_n$ ) se calculó según la ecuación [3.6] y la energía normalizada ( $E_n$ ) según la ecuación [3.7].

$$Q_n = \frac{Q \cdot 1000}{P_{\text{ajustado, cem}}} \text{ (mW/g}_{\text{cem}} \text{)} \quad [3.6]$$

$$E_n = \frac{E}{P_{\text{ajustado, cem}}} \text{ (J/g}_{\text{cem}} \text{)} \quad [3.7]$$

d) Difracción en continuo (DRX) – CEM 52.5R

El ensayo de DRX se planteó como un complemento a las calorimetrías isotérmicas. El objetivo principal de este ensayo es obtener información de la evolución de las fases químicas a medida que se da la hidratación de la pasta. Para este ensayo se modificaron algunos de los parámetros de medición ya mencionados en el apartado “Caracterización de los materiales base”. En este caso, la geometría Bragg-Brentano fue de  $\theta/2\theta$  de 240 mm de radio, la radiación de Cu  $K_{\alpha 1}$  se modificó a  $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ , realizando un barrido desde 5 hasta  $55^\circ 2\theta$ , con un paso de  $0.026^\circ$  y tiempo de medida de 20 segundos. La temperatura de ensayo es de  $26^\circ\text{C}$ . En total se realizaron 240 ciclos de mediciones consecutivas para cada una de las muestras analizadas en continuo, con un intervalo de medición de 15 minutos aproximadamente. Los portamuestras usados en este ensayo son de tipo PW1815/40 y se cubrieron con una lámina de kapton de 7.5 micras de espesor.

La metodología seguida para pesar y mezclar los materiales es la misma que la usada para los ensayos de calorimetría isotérmica. La única variación introducida es la adición del Rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) como patrón de referencia interno cuyo cálculo se muestra en el apartado 3.3.2 Dosificación. En este caso el rutilo se mezcló con el cemento y la cal mediante un mortero de ágata. El análisis de los datos se realizó, igualmente, con el software X’Pert Highscore Plus y la base de datos PDF-2 del ICCD. Los ficheros de medición usados para el software son los que se muestran en la tabla 3.8.

Fase	Fórmula	Código ICSD
Alita	$\text{Ca}_3 (\text{SiO}_4)\text{O}$	94742
Aluminato cúbico	$\text{Ca}_9 (\text{Al}_2\text{O}_6)_3$	1841
Etringita	$\text{Ca}_6\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 (\text{OH})_{12} (\text{H}_2\text{O})_{26}$	155395
Calcita	$\text{Ca} (\text{CO}_3)$	79673
Ferrita	$\text{Ca}_2 (\text{FeAl})\text{O}_5$	9197
Óxido de cal	$\text{CaO}$	75785
Portlandita	$\text{Ca} (\text{OH})_2$	15471
Yeso	$\text{Ca} (\text{SO}_4) (\text{H}_2\text{O})_2$	15982
Monosulfato	$\text{Ca}_6\text{Al}_3 (\text{OH})_{18} (\text{SO}_4) 1.5(\text{H}_2\text{O})_9$	24461
Rutilo	$\text{TiO}_2$	44881

Tabla 3. 8 – Fases para el ensayo de DRX

e) Vicat

El ensayo de Vicat se realizó según la norma UNE EN 196-3 (AENOR, 2009b) para la determinación del tiempo de inicio y final de fraguado de las pastas de cemento y cemento y cal. En este caso el aparato de medición empleado fue automático del tipo E044N Vicatronic de la marca MATEST que es el que se muestra en la figura 3.10.

Para la realización del ensayo primero se pesaron los materiales siguiendo el orden cemento-cal-agua-aditivo. En primer lugar se mezcló el cemento con la cal durante 2 minutos. A continuación se añadió el agua y el aditivo y se mezcló durante 1 minuto y medio. Finalmente se introdujo la pasta en el recipiente de ensayo, se enrasó y se inició la medición. Para que todos los ensayos se iniciaran al mismo tiempo, se contaron 5 minutos desde el inicio del amasado para iniciar la medición.

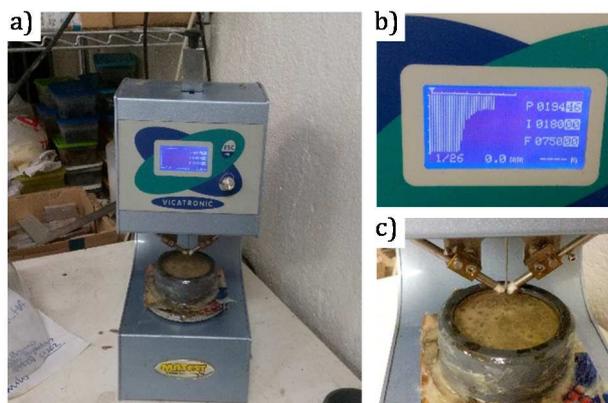


Figura 3. 10 – Ensayo inicio y final de fraguado (UNE-EN 196-3)

### 3.4 Análisis del proceso de expansión

#### 3.4.1 Materiales

Los materiales usados en este bloque son los mismos que se han usado en el bloque anterior. Además de estos materiales se usó la arena normalizada CEN para la realización de los morteros. La figura 3.11 muestra la curva granulométrica de dicha arena.

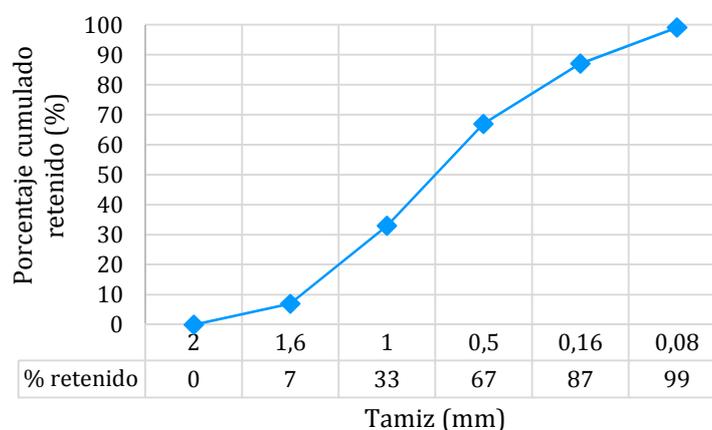


Figura 3. 11 – Curva granulométrica del árido normalizado CEN (0-2mm)

#### 3.4.2 Dosificación

El cálculo de las dosificaciones usadas en esta etapa es el sistema de dosificación basado en la densidad de los componentes descrito en el apartado 3.3.2 Dosificación. Para el caso de los morteros hay que añadir la arena al sistema de dosificación en una relación 1:3, siendo la ecuación de cálculo la [3.8].

$$S = C \cdot (C:S)_{\text{ratio}} \quad [3.8]$$

En la tabla 3.9 se muestran los valores de los pesos de los materiales de cada una de las dosificaciones usadas. Los valores se expresan en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Material	% CaO	Relación a/c		
		0,35	0,45	0,60
S	0%	1723.33	1629.71	1506.92
C		574.44	543.24	502.31
SP		5.74	5.43	5.02
W		197.03	240.65	297.87
S		1716.97	1624.02	1502.05
C	1%	572.32	541.34	500.68
L		5.72	5.41	5.01
SP		5.72	5.41	5.01
W		198.15	241.55	298.51
S		1698.16	1607.18	1487.64
C	4%	566.05	535.73	495.88
L		22.64	21.43	19.84
SP		5.66	5.36	4.96
W		201.43	244.21	300.43
S		1679.76	1590.69	1473.50
C	7%	559.92	530.23	491.17
L		39.19	37.12	34.38
SP		5.60	5.30	4.91
W		204.65	246.82	302.31
S		1679.76	1590.69	1473.50

Tabla 3. 9 - Dosificación para morteros con cal A1Na y sin cal ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

### 3.4.3 Ensayos para la caracterización del proceso expansivo

#### a) Lambe

El ensayo 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 intentó adaptar para medir la expansión del óxido de calcio. El aparato está compuesto por un marco de reacción, un anillo porta muestra, un anillo guía y una placa superior perforada (figura 3.12). Además, el aparato posee un anillo de carga que permite medir la carga generada durante la hidratación de la muestra. Para poder medir la expansión de la cal durante el proceso de hidratación se sustituyó el anillo de carga por un sensor de desplazamiento (LVDT).

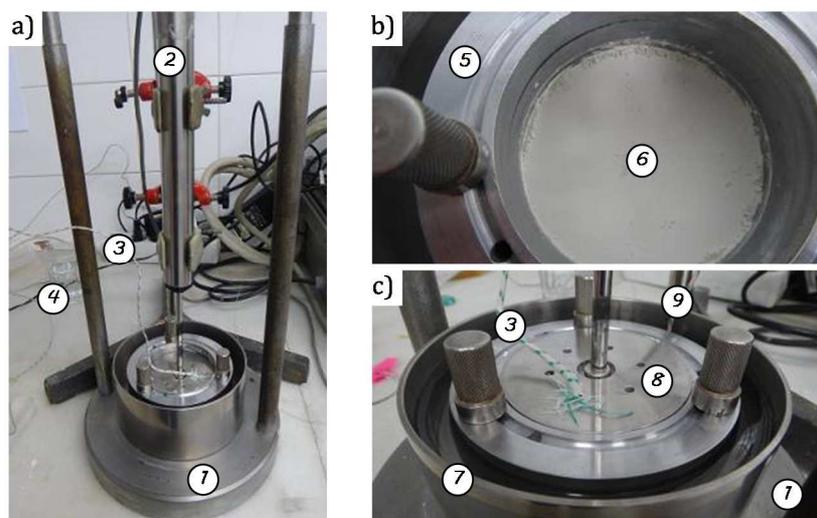


Figura 3. 12 - Ensayo Lambe modificado para CaO

Para la ejecución del ensayo se pesaron 24 gr de CaO y 169 gr de agua. La muestra fue compactada con una presión conocida de 50 Kg medida mediante una célula de carga. Una vez colocado el dispositivo en el lugar de ensayo, se puso en contacto la célula de medida con el agua. Para evitar pérdidas de material, se colocó un papel de filtro entre la placa superior perforada y la muestra, que permitió el paso de agua pero impidió la salida de material. En la figura 3.12 se muestra la adaptación del ensayo para la medición de la expansión mediante un LVDT.

Los números mostrados en la figura 3.12 se definen de la siguiente manera: (1) aparato Lambe; (2) LVDT; (3) sonda para la temperatura de la muestra; (4) vaso con agua para control de temperatura externa; (5) portamuestras; (6) CaO prensado; (7) anillo externo dónde queda contenida el agua del ensayo; (8) tapa superior del portamuestras desde donde mide el LVDT y, finalmente, (9) representa la sonda de temperatura del agua del ensayo.

### b) Expansión en probetas según norma UNE 80113

Otro ensayo considerado para evaluar la expansión de las pastas fue el establecido por la norma UNE 80113. Esta norma describe la metodología para determinar la retracción por secado en pastas. El ensayo consiste en la confección de probetas de dimensiones 25x25x287 mm. Estas probetas llevan instalados en sus extremos unos pernos que permiten realizar medidas de longitud mediante un reloj comparador. En la figura 3.14 se muestran los moldes y probetas utilizadas, así como la medida de longitud mediante reloj comparador.

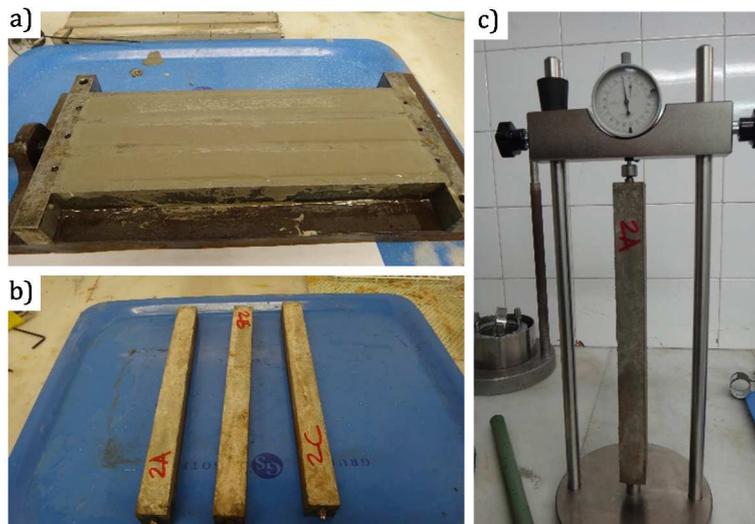


Figura 3. 13 – Procedimiento de ensayo UNE 80113; a) moldeado de las probetas; b) probetas desmoldadas; c) proceso de medición

La preparación de muestras se realizó de acuerdo con la norma UNE-EN 196-1 (AENOR, 2005). En algunos casos fue necesario sellar las juntas de los moldes con silicona, para evitar la pérdida de material, dado que las dosificaciones eran excesivamente fluidas. La medida de la longitud de las muestras se llevó a cabo mediante un reloj comparador digital (Sylvac S 229).

Las probetas permanecieron en los moldes y almacenadas en la cámara climática durante 24 horas. Durante ese período de tiempo las probetas se cubrieron con un plástico para evitar la pérdida de agua. A las 24 horas se desmoldaron y se almacenaron en la cámara húmeda en condiciones controladas de humedad y temperatura ( $95\% \pm 5\%$  HR;  $20^\circ \pm 5^\circ$  C). Durante los primeros 7 días se realizaron determinaciones de longitud cada día. Llegados a esa edad, se espaciaron las medidas cada

2 o 3 días, hasta llegar a la estabilización de las medidas. Las probetas permanecieron en la cámara húmeda hasta el momento de medida, sacándose en grupos de tres probetas. De este modo se evitó la presencia de ciclos mojado-secado o fenómenos de retracción por secado.

### c) Ultrasonido en continuo

El objetivo de este ensayo es la determinación del proceso de endurecimiento de una pasta o mortero mediante la medición de ondas ultrasónicas (P-wave). El ensayo se planteó acorde al realizado por H.W. Reinhardt y C.U. Grosse (Reinhardt & Grosse, 2004) ampliando la cantidad de material analizado. Las dimensiones modificadas para este ensayo son las que se muestran en la figura 3.14.

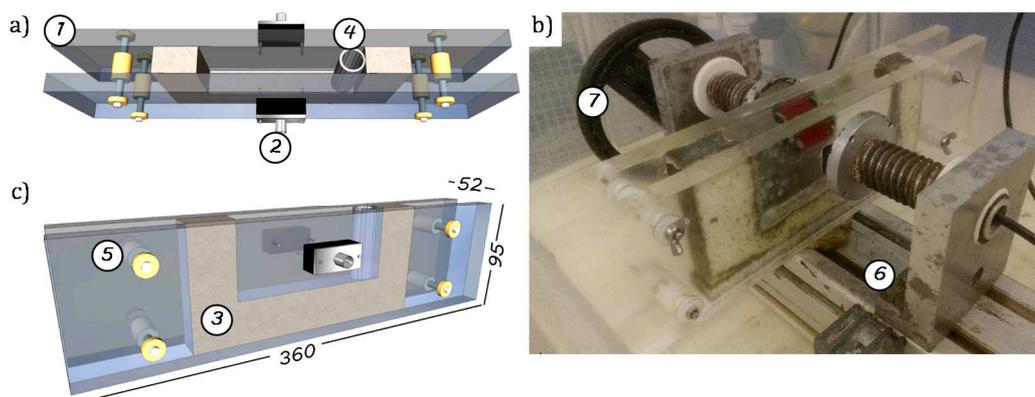


Figura 3. 14 - Sistema de medición de US en continuo

El ensayo consiste en dos placas de metacrilato (1) entre las que se introduce el mortero a analizar. Este mortero se contiene en su parte inferior y lateral por una pieza de goma (3) en forma de "U". La medición de los ultrasonidos se realiza a través de dos transductores (2) fijados mecánicamente a las placas de metacrilato. La frecuencia de los transductores es de 500kHz. La fijación de las piezas de metacrilato se realizó mediante cuatro barras roscadas con una pieza intermedia que delimitaba el espesor de la pasta (5). La temperatura y humedad de la mezcla, así como del ambiente del contenedor, se midieron mediante sensores SHT15 de la compañía Sensirion. Finalmente, todo el sistema se ensamblaba en una subestructura de soporte (6) a la que se fijaba mediante un tornillo sin fin (7).

Las ondas ultrasónicas se generaron mediante un mote inalámbrico denominado WilTempUS desarrollado por G-CARMA (Aparicio et al., 2012). La medición de los ultrasonidos se realizó cada minuto durante 48 horas. El análisis posterior de los datos se efectuó mediante el software Matlab y el postproceso se ajustó mediante Excel y Origin.

### d) Anillo de expansión

De manera complementaria a los ensayos mostrados anteriormente, se planteó el diseño de un sistema de ensayo que permitiera medir tanto la expansión como la tensión remanente del material generado por la adición de CaO. De este modo se planteó realizar los ensayos de expansión bajo confinamiento, empleando para ello un anillo de acero inoxidable de tipo AISI 316L, instrumentado mediante dos puentes de medición, formados por dos galgas en tracción directa y dos en compresión en Poisson, colocados diametralmente. La instrumentación del anillo fue realizada de

tal modo que no se viera afectada por las condiciones de humedad de la cámara, para ello se encargó el montaje a la empresa UTILCELL. Mediante la deformación del anillo, y conociendo sus características, se determinó la tensión que generaba la expansión del material en función del tiempo. Las características del sistema se muestran en la tabla 3.10.

Propiedad	Valor
Módulo de Young (E, GPa)	200
Coefficiente de dilatación ( $\alpha$ , °C <sup>-1</sup> )	$1,20 \cdot 10^{-5}$
Módulo de Poisson ( $\nu$ )	0,28
Diámetro ( $\emptyset$ , mm)	220
Espesor (e, mm)	1
Altura (h, mm)	40
Factor de galga (GF)	2,11

Tabla 3. 10 - Características del sistema desarrollado para determinar la expansión de morteros

En la figura 3.15 se muestra un detalle del anillo empleado, con la instrumentación del mismo. Los ensayos de expansión fueron realizados dentro de la cámara húmeda, cubriendo todo el sistema de medida con un plástico para evitar un aporte externo de agua al material.



Figura 3. 15 - Anillo para ensayo de expansión

En la figura 3.15 se describen los distintos elementos que componen el sistema de ensayo. Los números mostrados se definen como: (1) anillo de acero inoxidable sin juntas; (2) galga extensiométrica protegida; (3) cable de alimentación y adquisición de datos de las galgas; (4) caja de plástico para ambiente húmedo; (5) tapa; (6) plástico para evitar el contacto del agua de la caja con el anillo; (7) sondas de temperatura tipo K. Cabe destacar que la caja se llenaba de agua hasta el límite de altura del anillo para que la temperatura exterior de este fuera lo más constante posible.

Paralelamente a la medición de la deformación del aro, se midió también la temperatura de la mezcla en el centro del anillo y en el perímetro en contacto con el acero. De esta manera, se pudo determinar la influencia de la temperatura en la deformación del aro y restarla de la propia del mortero. En la figura 3.16 se muestra el sistema de adquisición usado para la obtención de los datos. En el caso de las galgas se obtuvieron medidas de deformación a partir del aparato denominado HBM MGCPlus AB22A ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) (1) y para la temperatura se usó un equipo Agilent 34970A (°C) (2). El sistema de medición se ubicó en el exterior de la cámara húmeda y los cables de medición se pasaron a través de un agujero (4) hasta el punto de ensayo. El software de adquisición de datos es el denominado Agilent BenchLink Data Logger.

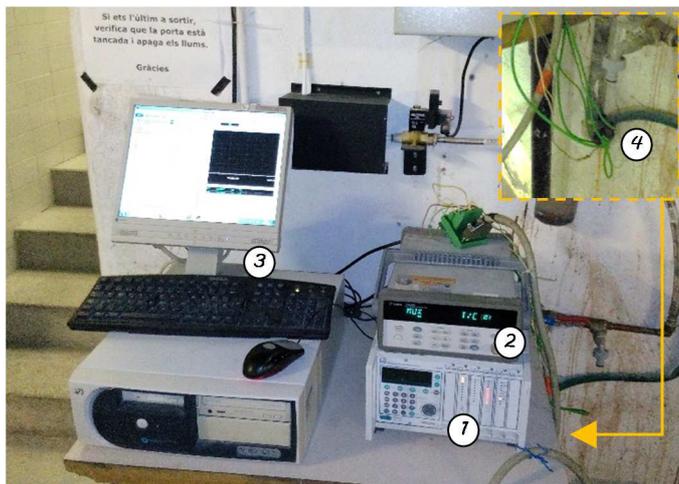


Figura 3. 16 - Adquisición de datos de las galgas y de las sondas de temperatura

Para este ensayo se usó el sistema de dosificación basado en las densidades de los materiales. Las mezclas empleadas en este caso fueron morteros con relación cemento arena de 1:3. La relación a/c de las mezclas se fijó en 0,45 para lograr una consistencia adecuada para el moldeo de las muestras en el anillo y, así mismo, evitar que la mezcla fuera tan fluida que se perdiera material por las juntas. Se estudió únicamente un porcentaje de contenido de CaO – 7% spc – para estudiar el efecto máximo de esta variable. El árido empleado para fabricar los morteros fue arena normalizada de naturaleza silíceas, de granulometría 0–2mm. Las muestras de CaO estudiadas fueron la A3Ad, B1Na, B2Ad.

Una vez pesados los materiales se introdujeron en la amasadora normalizada de la norma UNE EN 196-1 pero variando el sistema de mezclado. En primer lugar se introdujo el agua con el aditivo para evitar que quedara cemento sin hidratar en la base. Seguidamente se introdujo el cemento y la cal y se mezcló durante 2 minutos a velocidad baja. Se introdujo la arena y se mezcló durante 1:30 minutos a velocidad baja. Se paró la amasadora durante 30 segundos y se volvió a poner en marcha a velocidad alta durante 1 minuto. Una vez finalizada la mezcla esta se introdujo en el anillo y se enrasó. Seguidamente se introdujeron las sondas para medir la temperatura y finalmente se cubrió con un plástico y se tapó la caja para evitar el aporte extra de agua en el mortero. La base teórica de este ensayo, queda recogida en el Anejo A1.

#### e) Expansión libre y tensión de confinamiento

Este ensayo se planteó como alternativa al ensayo del anillo metálico. Las dimensiones de la probeta a ensayar se basan en las ya establecidas en la norma para morteros UNE EN 196-1:2005 (40x40x160mm) (AENOR, 2005). A partir de estas se diseñó un molde rígido mediante el cual fuera posible la configuración de dos ensayos, el de medición de la tensión de confinamiento y el de medición de la expansión libre. En la figura 3.17 se muestran las dimensiones generales del molde, así como las piezas de que consta, el resto de dimensiones se adjuntan en los planos contenidos en el Anejo A1.

Los números mostrados en la figura 3.17 se definen como: (1) Pieza para fijación de instrumentos de medición; (2) Cavidad para los instrumentos de medición; (3) Pieza móvil; (4) Cavidad para el material; (5) Base del molde; (6) Piezas de confinamiento lateral; (7) Pieza de extremo. Las piezas del molde se realizaron en su totalidad con aluminio y se fijaron mediante

tornillos de acero inoxidable M6 tipo Allen. El diseño se realizó de tal manera que pudieran llevarse a cabo ambos ensayos modificando únicamente el sistema de medición.

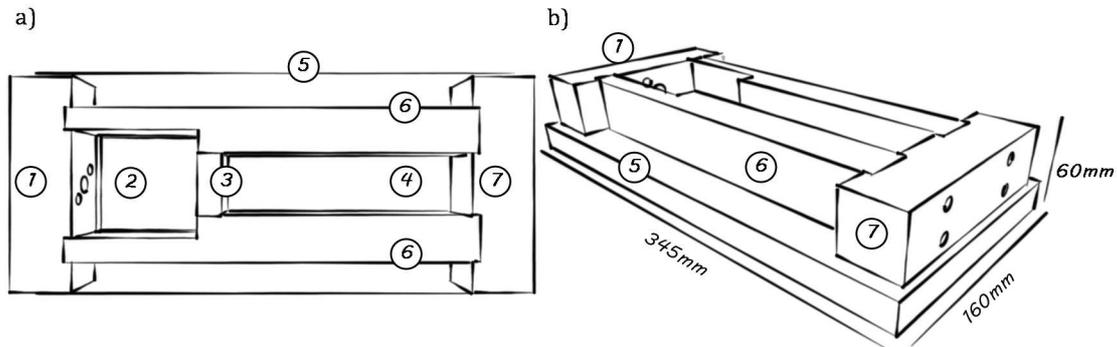


Figura 3.17 - Croquis de las piezas del molde en planta (a) y dimensiones generales (b)

En el caso del ensayo para la determinación de la tensión de confinamiento se introduce una célula de carga en la cavidad 2 (figura 3.17), de tal manera que mediante una pieza complementaria de aluminio se pueda mantener la zona de medición de la célula perpendicular a la pieza 3. En la figura 3.18 se muestra dicha pieza complementaria, su ubicación y su función en el molde.

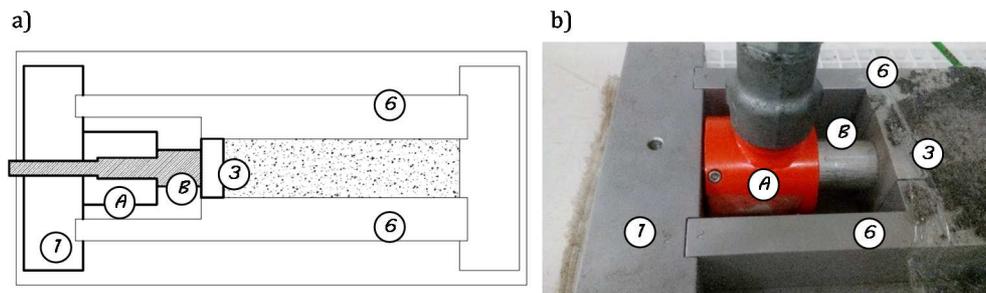


Figura 3.18 - Detalle de colocación de la célula de carga para el ensayo de tensión de confinamiento

En la figura 3.18 se muestran los dos elementos necesarios para realizar el ensayo de medición de la tensión de confinamiento. La pieza *A* hace referencia a la célula de carga, mientras que la pieza *B* es el elemento de soporte de la célula que permite realizar la medición siempre en la misma posición. El funcionamiento del sistema se basa en la medición de la fuerza que ejerce el mortero sobre la pieza 3, que a su vez se transmite mediante la pieza *B* a la célula de carga. Tal como se observa en la figura 3.18a, el tramo central de la pieza *B* (el que discurre por el interior de la célula de carga) es inferior a la longitud de la célula, lo que evita que esta pueda reducir el rango de medición del sistema.

En el caso del ensayo de deformación libre se sustituyen las piezas *A* y *B* por las piezas *X*, *Y* y *Z* tal como se observa en la figura 3.19. La pieza *X* es un tornillo M6 tipo Allen que fija el LVDT para que este no pueda desplazarse libremente, el LVDT se muestra como la pieza *Y*. Finalmente, las piezas *Z* tienen la función de fijar la pieza 3 durante el vertido y proceso de compactación del mortero. Una vez se ha rellenado la cavidad 4 (figura 3.17), se ha compactado y enrasado, se procede a liberar dichas piezas, de esta manera se da inicio a la medición por parte del LVDT.

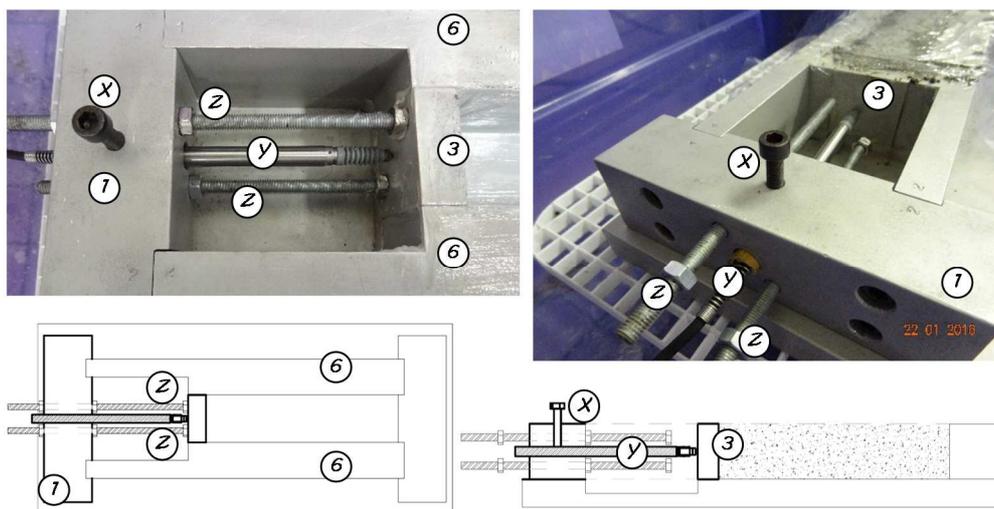


Figura 3. 19 – Detalle de colocación del LVDT para el ensayo de deformación libre

Ambos ensayos se realizaron en la cámara climática del Laboratorio de Estructuras (LTE) de l'Escola de Camins de Barcelona. A diferencia del ensayo del anillo de deformación, estos ensayos no pudieron llevarse a cabo en condiciones de mayor humedad relativa por los sistemas de medición que fueron empleados. En este caso se realizó el ensayo dentro de una caja de plástico en la que se introdujo agua en la base para aumentar la humedad relativa del ambiente hasta un 90%. Paralelamente al agua de la base, el mortero se cubría con un plástico (tipo cocina) para mejorar el curado. Para llevar a cabo ambos ensayos fueron necesarios los componentes que se muestran en la figura 3.20.

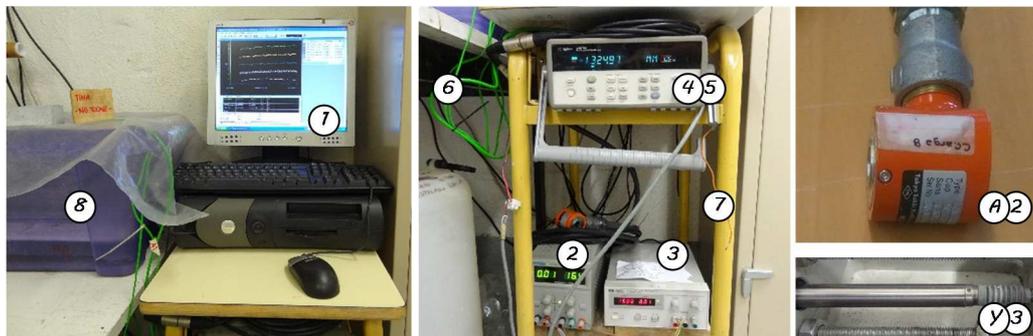


Figura 3. 20 – Componentes necesarios para el ensayo de tensión de confinamiento y deformación libre

donde (1) es el ordenador, (A) la célula de carga (KCM-50KNA) y (2) su alimentación (Matrix, MPS-6003D; 5V), (Y) es el LVDT (Solartron AX/5/S) y (3) su alimentación (HP, E3610A; 15V), (4) es la adquisición de datos para la célula de carga, el LVDT y las sondas de temperatura (HP-Agilent 3490A). El sistema de adquisición incorpora una tarjeta multiplexor de 20 canales (5) donde se conectan los cables de adquisición de datos de los elementos anteriores, así como las sondas tipo K (6) para la temperatura del mortero y de la caja (8) y la sonda tipo J (7) para la temperatura exterior. El software para la adquisición de datos usados fue el Agilent BenchLink Data Logger. En la tabla 3.11 se muestra la configuración del software usada para la adquisición de los datos y en la tabla 3.12 las características de la célula de carga y del LVDT.

ID	Channel		Measurement				Scaling (Mx+B)			
	Scan	Name	Function	Range	Resolution	Advance	Scale	Gain (M)	Offset(B)	Label
101	<input checked="" type="checkbox"/>	Célula	DC Volts	Auto	5.5 digits	Default	<input checked="" type="checkbox"/>	6191950.46	280	N
102	<input checked="" type="checkbox"/>	T.Amb.I	(Type K)	-	-	Default	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0	C
103	<input checked="" type="checkbox"/>	T.Amb.I	(Type K)	-	-	Default	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0	C
104	<input checked="" type="checkbox"/>	T_Mort	(Type K)	-	-	Default	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0	C
105	<input checked="" type="checkbox"/>	T.Amb.E	(Type J)	-	-	Default	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0	C
106	<input checked="" type="checkbox"/>	LVDT	DC Volts	+/- 10V	5.5 digits	Default	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5	0.0	mm

Tabla 3. 11 - Tabla del software y datos necesarios

En la tabla 3.11 se observa que para el canal 101, es decir, el de la célula de carga se modificó los valores referentes a las columnas *Gain (M)* y *Offset (B)*. Al introducir estos valores se obtuvo el resultado directamente en Newtons. El valor de la columna *Gain (M)* se obtuvo mediante la ecuación [3.9] cuyos valores se toman de la tabla 3.12 para la célula de carga. El valor de la columna *Offset (B)* se obtiene al iniciar el programa y observar cual es el valor de la célula de carga cuando no tiene ninguna fuerza aplicada.

$$\text{Gain} = \frac{Q_{\text{máx}}(\text{N})}{\text{Sensibilidad} \left( \frac{\text{V}}{\text{V}} \right) \cdot \text{Voltaje\_excitación}(\text{V})} \quad [3.9]$$

Aparato	Dato	Valor
	Carga máxima célula (kN)	50
Célula de carga	Sensibilidad (mV/V)	1.615
	Voltaje excitación (V)	5
	-----	
LVDT	Desplazamiento máx. (mm)	10
	Voltaje excitación (V)	15

Tabla 3. 12 - Datos de la célula de carga y LVDT

El sistema de amasado de los materiales se realizó de la siguiente manera. Los materiales se pesaron en una báscula con una precisión de  $\pm 0,1\text{gr}$ . El cemento y la cal se introdujeron en el mismo recipiente, la arena en otro y el agua con el plastificante en otro. Inicialmente se mezcló el cemento y la cal durante 2 minutos para evitar la aparición de grumos. El tiempo de amasado se inició en el momento de mezclar el agua con el cemento. La pasta se mezcló durante 1 minuto y 30 segundos, deteniéndose el mezclado en este momento durante 30 segundos. A los 2 minutos del inicio se introdujo la arena en el recipiente y se mezcló durante 2 minutos más. Al finalizar el mezclado se introdujo el mortero en el molde compactándolo por capas, dos en total, con 20 golpes por capa. Finalmente, se enrasó el mortero, se eliminó el restante y se cubrió con un plástico transparente de cocina para mejorar el curado. La compactación se realizó mediante el pisón de compactación del ensayo normalizado UNE-EN 12350-5:2009 (AENOR, 2009a). Los tiempos descritos quedan resumidos en la tabla 3.13.

	Material	Duración	Períodos
1	C + L	2'	-
2	(1) + W+SP	1' 30"	00:00 - 01:30
3	Stop	30"	01:30 - 02:00
4	(2) + S	2'	02:00 - 04:00

Tabla 3. 13 - Tiempos de mezclado manual

### 3.4.4 Ensayos para la caracterización de las propiedades básicas del material

Para complementar los resultados de deformación libre y de tensión de confinamiento y poder observar las diferencias entre las probetas resultantes de cada ensayo, se plantearon tres ensayos complementarios. Estos ensayos son: resistencia a compresión, porosidad y. Los tres ensayos mencionados se llevaron a cabo con partes de la probeta resultante del ensayo de deformación y tensión. Para poder realizar los ensayos hubo que cortar la probeta de tal manera que se obtuvieran dos réplicas, como mínimo, por ensayo. Las dimensiones de los cortes son las que se muestran en la figura 3.21.

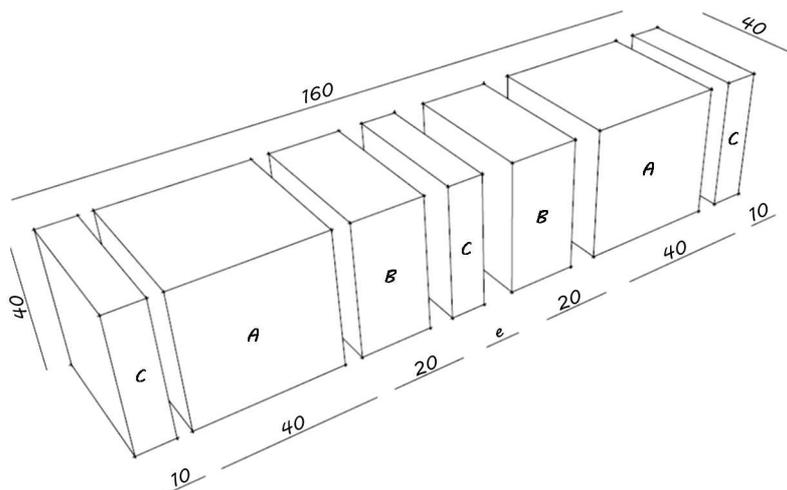


Figura 3. 21 - División de probeta normalizada para ensayos complementarios

En total se realizaron seis cortes por probeta, iniciando la medición desde los extremos hasta llegar a la parte central denominada "e" (figura 3.21), cuyo espesor varía en cada caso debido al grosor del corte de la sierra. Esta pieza denominada "C", juntamente con las de los extremos se congelaron por si fuera necesario realizar algún tipo de ensayo posterior. Las piezas denominadas "A" se ensayaron a compresión y se les realizaron mediciones ultrasónicas (US) y, finalmente, las piezas "B" se usaron para los ensayos de densidad y porosidad. Todas las piezas se cortaron a las 48 horas de la finalización del ensayo principal. A continuación se detalla el procedimiento de ensayo en cada uno de los casos.

#### a) Resistencia a compresión (Rc)

Una vez cortadas las probetas, se eliminaron los restos de material en los cortes y se almacenaron hasta los 7 días de edad en la cámara climática. Pasado este tiempo se procedió a romper ambas piezas a compresión según se especifica en la norma UNE EN 196-1 (AENOR, 2005).

### b) Porosidad

El ensayo de porosidad se realizó acorde a la norma ASTM C 642-06 (ASTM, 2006). La primera medición que se obtuvo fue el peso seco, por lo que se introdujeron ambas piezas en el horno a 60°C hasta peso constante. Seguidamente se introdujeron en un recipiente con agua hasta conseguir saturarlas. Una vez se estabilizó el peso se obtuvo el peso en inmersión y el peso saturado con superficie seca. Al igual que para el caso anterior, el ensayo se inició 7 días después del amasado.

### c) Densidad en seco

La densidad se obtuvo de las mismas probetas que para el ensayo de porosidad. Se tomaron medidas de las mismas con peso seco y se determinó la densidad mediante la norma ASTM C642-06 (ASTM, 2006).

### d) Ultrasonidos

Se realizaron mediciones de ultrasonidos en las probetas destinadas al ensayo de resistencia a compresión. Dicho ensayo se realizó en dos caras perpendiculares de la probeta, siendo estas las que se encuentran en contacto con el molde y las que corresponden con la sección de corte. En la figura 3.22 se muestra una representación gráfica de las caras de medición (figura 3.22.a), así como de la colocación de los palpadores (figura 3.22.b (2)). El ensayo se llevó a cabo con un equipo tipo Pundit PL-200 de la marca Proceq y con palpadores de 0,5 MHz de frecuencia.

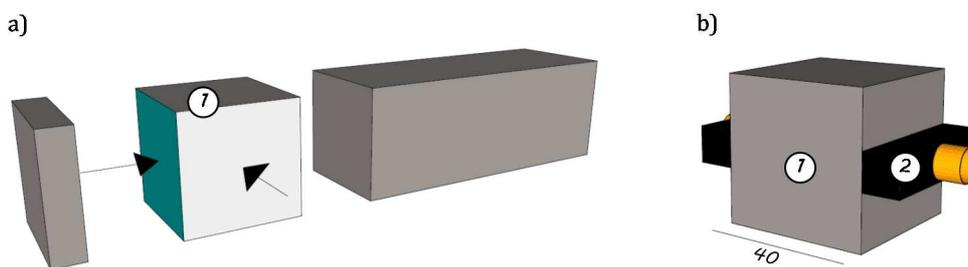


Figura 3. 22 – Representación de la metodología de medición de US en probetas cúbicas

# 4

## Parte I: Análisis del proceso de hidratación en pastas

### 4.1 Introducción

El comportamiento mecánico de los morteros con adición de cal está relacionado con fenómenos químicos que suceden al mezclar el cemento y la cal. En consecuencia, es necesario realizar ensayos químicos a diferente escala con tal de conocer la interacción de ambos materiales.

Este capítulo tiene como objetivo caracterizar y evaluar la interacción a nivel químico de diferentes dosificaciones de cemento y cal introduciendo tres variables en el análisis. Esto servirá para determinar posteriormente la idoneidad del uso de una u otra variable para obtener un mayor rendimiento en los ensayos mecánicos. Las variables que serán motivo de estudio son: el porcentaje de cal añadido a la pasta, el tipo de cal usado y la relación agua/cemento de la mezcla. Los objetivos principales del uso de estas variables son:

- Analizar la influencia de la cal en el proceso de hidratación normal de un cemento e identificar la variación en el comportamiento de las fases presentes en el cemento con la presencia de cal.

- Dentro del punto anterior, se pretende determinar la influencia del tipo de cal usado, así como de la relación a/c.

Con tal de alcanzar el objetivo se llevó a cabo una campaña experimental que contemplaba el uso de un tipo de cemento, cinco tipos de cales, con tres porcentajes de estas sobre el peso del cemento y, finalmente, tres relaciones a/c. Se obtuvo un total de 45 dosificaciones de pastas de cemento con cal y tres dosificaciones patrón en las que variaba la relación a/c. Con estas 48 dosificaciones se estudió la influencia de la cal en las pastas de cemento para poder determinar la idoneidad de cada una de las cales usadas, así como del resto de variables usadas. Con los resultados obtenidos en este capítulo se establecen las dosificaciones óptimas para el estudio de las propiedades mecánicas en el siguiente capítulo.

Con tal de llevar a cabo la campaña experimental se usaron pastas, ya que a nivel de estudio de la interacción de la cal con las fases del cemento, no es necesario contemplar el árido. Por otra parte, los ensayos de DRX y calorimetrías usan pequeños volúmenes de pasta para su análisis.

## 4.2 Caracterización de los materiales base

### 4.2.1 Propiedades físicas

En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos en la determinación de la densidad real ( $\rho$ ), la superficie específica ( $S_{esp}$ ) y el tamaño de partícula ( $\phi$ ) de cada una de las muestras. Con excepción de la muestra A3Ad, el resto de muestras presentan valores similares de densidad ( $\approx 3,04$  g/cm<sup>3</sup>) y un mismo tamaño de partícula. La superficie específica de las muestras presenta mayor dispersión en sus valores, lo cual puede ser debido a cuestiones puntuales de agregación de las muestras o un efecto diferente del proceso de aditivación en cada una de ellas. Así mismo, podría considerarse que la diferencia entre los valores de la superficie específica está relacionada con las características intrínsecas de cada una de ellas, debido, por ejemplo, a su proceso de fabricación.

Tipo de cal	Propiedad física		
	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Sesp (m <sup>2</sup> /g)	$\phi$ ( $\mu$ m)
A1Na	3,09	2,27	6,29
A2Ad	3,03	2,00	-----
A3Ad	2,81	2,77	4,96
B1Na	3,04	2,12	-----
B2Ad	3,02	2,55	6,29

Tabla 4.1 – Propiedades físicas de las muestras de cal anhidra

En la figura 4.1 se muestran las distribuciones de tamaño de partícula de las muestras de cal analizadas. Las curvas presentadas corresponden al tamaño de partícula de las cales A1Na, A2Ad, B1Na y B2Ad, definido en el gráfico como “Finura normal”, y la segunda curva corresponde a la cal A3Ad. En ambos casos presentados, se aprecia una distribución bimodal, con dos picos claramente diferenciados. Esta distribución podría estar indicando la presencia de aglomerados de partículas de cal, que serían los responsables del pico de mayor tamaño. Como se comentó anteriormente la mayoría de las muestras presentan una finura normal, con la excepción de la muestra A3Ad cuyo tamaño de partícula es menor. Esta cuestión puede apreciarse claramente en la curva de la muestra A3Ad, que se desplaza ligeramente hacia tamaños de partícula más pequeños.

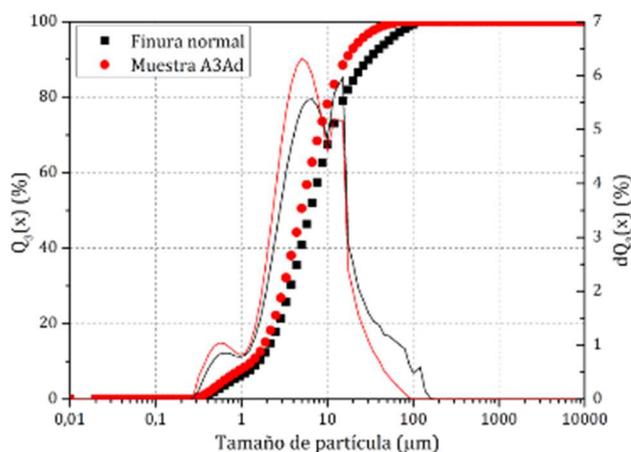


Figura 4. 1 - Distribución de tamaños de partícula de la muestra de cal A3Ad

### 4.2.2 Composición química y mineralógica

En la tabla 4.2 se presentan los contenidos de óxidos principales, determinados mediante FRX en las diferentes muestras de cal. La muestra A3Ad no fue caracterizada, al ser idéntica a la A2Ad, pero con mayor finura de molido, lo cual no influye en la composición química. Los resultados mostrados en la citada tabla permiten comprobar que las diferentes muestras de cal están compuestas de manera mayoritaria por CaO.

Óxido	Composición (%)			
	A1Na	A2Ad	B1Na	B2Ad
CaO	94,98	93,92	91,46	92,15
MgO	1,24	1,25	1,20	1,27
<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>0,74</b>	<b>0,78</b>	<b>2,70</b>	<b>2,71</b>
SiO <sub>2</sub>	0,23	0,30	0,44	0,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<	0,12	0,17	0,13
LOI	2,56	3,48	3,81	3,06

Tabla 4. 2 - Composición química de las diferentes muestras de cal analizadas

La diferencia más significativa entre las muestras se encuentra en los contenidos de SO<sub>3</sub>. Con respecto al contenido de SO<sub>3</sub>, las diferencias se deben al proceso y al sistema de cocción de las cales. El combustible usado en los hornos para la fabricación de ambas cales es coque de petróleo que contiene aproximadamente entre un 4 y un 8% de azufre y que es captado por las partículas de cal.

En el caso de las cales tipo A, estas proceden de los productos calcinados de mayor tamaño, de manera que existe mayor cantidad de producto que no ha estado en contacto directamente con los gases del horno. Por el contrario, las cales B se fabrican con la porción más fina del producto calcinado, por lo que al tener mayor superficie de contacto con los gases de cocción, las partículas captan más azufre. Por otra parte, cabe destacar que las cales tipo B están sobre cocidas con un CO<sub>2</sub> que proviene de una recarbonatación y no de carbonato sin calcinar.

### a) Difracción de Rayos-X materiales base

El último ensayo planteado para la caracterización de las propiedades químicas de las pastas es el de difracción por Rayos-X (DRX).

La figura 4.2 muestra los DRX de las diferentes muestras de cal anhidra estudiadas. La cal A3Ad no se analizó debido a que procede de la cal A2Ad. En todos los casos se encontraron las mismas fases cristalinas, siendo la mayoritaria el CaO (ficha 00-043-1001). Junto con esta fase se encontraron picos correspondientes a la portlandita (ficha 01-081-2041), calcita (ficha 01-083-0578), periclusa (ficha 01-077-2179) y anhidrita (ficha 01-072-0503).

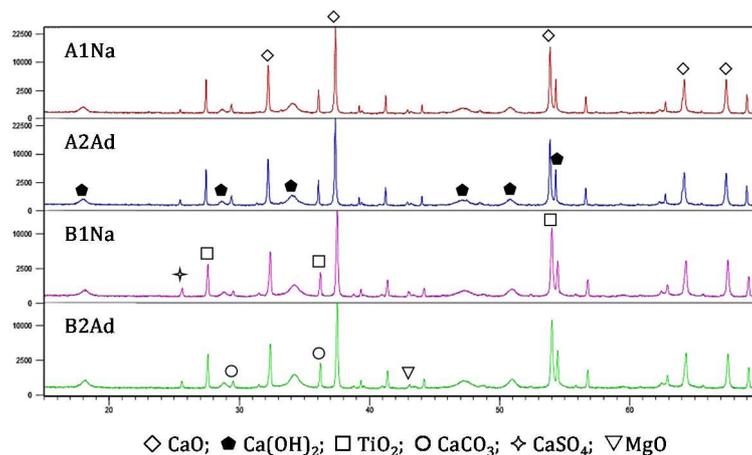


Figura 4. 2 - Patrones de DRX de las cales anhidras

En la tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis por Rietveld de los valores de las fases presentes en las cales. De las cuatro cales analizadas se observa que el contenido de CaO se encuentra por encima del 50%, siendo la de mayor contenido la A1Na (65,13%) y la de menor contenido la B2Ad (49,63%). Por otra parte, el porcentaje de portlandita presente en las cales obtiene valores mínimos para la cal A1Na (19,91%) mientras que el máximo se obtiene para la cal B2Ad (25,55%). En el caso de la anhidrita y el yeso, cabe destacar que los resultados confirman los obtenidos para el ensayo de FRX (tabla 4.2). Además, se observa que la forma en que aparecen los sulfatos en las cales es principalmente anhidrita. En este caso el contenido de yeso pasa a ser una fase secundaria.

Fase	Fórmula	Código ICSD	Rietveld			
			A1Na	A2Ad	B1Na	B2Ad
Óxido de calcio	CaO	75785	65,13	57,75	54,23	49,63
Portlandita	Ca(OH) <sub>2</sub>	15471	18,91	20,21	20,75	25,55
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	79673	2,76	1,89	1,37	1,86
Periclusa	MgO	104844	0,74	0,70	0,88	0,69
Anhidrita	Ca(SO) <sub>4</sub>	40043	0,85	1,39	2,74	2,25
Yeso	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	151692	0,53	0,20	0,49	0,49

Tabla 4. 3 - Valores de las fases analizadas en las cales

Igualmente, en la tabla 4.4 se muestran los valores en porcentaje de cada una de las fases obtenidas del análisis del cemento anhidro. Los valores se presentan en orden descendente en función del porcentaje del compuesto presente en la muestra. Hay que mencionar que los contenidos inferiores al 1% quedan englobados dentro del margen de error del sistema de medición empleado.

Fase	Fórmula	Código ICSD	Rietveld
Alita	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	94742	62,47%
Ferrita	Ca <sub>2</sub> AlFeO <sub>5</sub>	9197	10,97%
Belita (ortorrómbico)	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	81097	9,35%
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	79673	6,11%
Tenardita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2895	2,87%
Syngenita	K <sub>2</sub> Ca(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	157072	2,12%
Aluminato tricálcico(cúbico)	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1841	2,00%
Belita (monoclínico)	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	79550	1,12%
Aluminato tricálcico (ortorrómbico)	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1880	0,87%
Yeso	CaSO <sub>4</sub>	151692	0,75%
Portlandita	Ca(OH) <sub>2</sub>	15741	0,62%
Periclasa	MgO	104844	0,50%
Cal	CaO	75785	0,25%

Tabla 4. 4 – Valores de las fases analizadas en el cemento anhidro por orden de contenido

### 4.2.3 Determinación de la reactividad potencial

La determinación de la reactividad potencial de cada una de las muestras de cal anhidra, se expresa en función de la variación del pH con el tiempo tras su exposición a una disolución de ácido cítrico de características conocidas. En la figura 4.3 se muestran los resultados para cada una de las muestras estudiadas. Así mismo, en el gráfico se muestran los valores de tiempo, en minutos, que tarda cada una de las cales en alcanzar un pH de 12, que a su vez está representado en el gráfico con una línea horizontal.

En la figura 4.3 se aprecia el comportamiento claramente diferenciado de las muestras aditivadas A2Ad y B2Ad. En el caso de estas dos cales, se produce un retraso de la curva con respecto al resto a partir de los 2 minutos aproximadamente o cuando el pH se encuentra entre 3 y 4. A partir de este momento se observan dos tendencias, mientras que las cales A1Na, A3Ad y B1Na alcanzan un pH de 11 a los 3 minutos, las cales A2Ad y B2Ad lo hacen a los 12 minutos. Destacar en este sentido que la muestra A3Ad, también aditivada, presente un comportamiento similar a las muestras no tratadas. Este hecho puede explicarse por el menor tamaño de partícula y mayor superficie específica de esta muestra de cal. Esto quiere decir que el aumento de la superficie específica de la muestra compensaría el efecto del retardante por la aceleración de la reacción de hidratación que produce tener un tamaño de partícula menor.

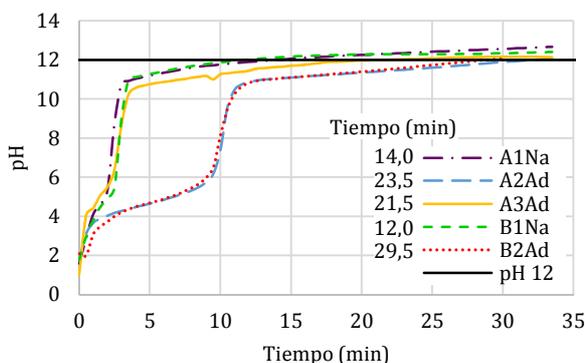


Figura 4. 3 – Determinación de la reactividad potencial de las diferentes muestras de cal anhidra

### 4.3 Evaluación del incremento de la temperatura en función del contenido de cemento

Con la intención de verificar la existencia de diferencias en las curvas de hidratación de pastas de cemento y cal se llevó a cabo un primer ensayo para evaluar en condiciones cuasiadiabáticas la variación de temperatura que se produce al añadir una cantidad variable de cemento a una cantidad fija de cal. A partir de la curva base de hidratación de la cal en disolución se establecieron las variaciones de la curva al añadir el cemento. La figura 4.4 muestra las curvas de hidratación de la cal, junto con las curvas de cemento y cal del tipo A3Ad, con contenidos que varían del 0 al 20% de adición de cemento sobre el peso de la cal. Así mismo, se han definido puntos y parámetros de referencia que servirán para determinar las diferencias entre las mezclas analizadas. Los parámetros denominados P1, P2 y P3 corresponden con la pendiente de cada uno de los tramos rectos, mientras que los dos puntos corresponden con el valor en que las pendientes anteriores intersecan.

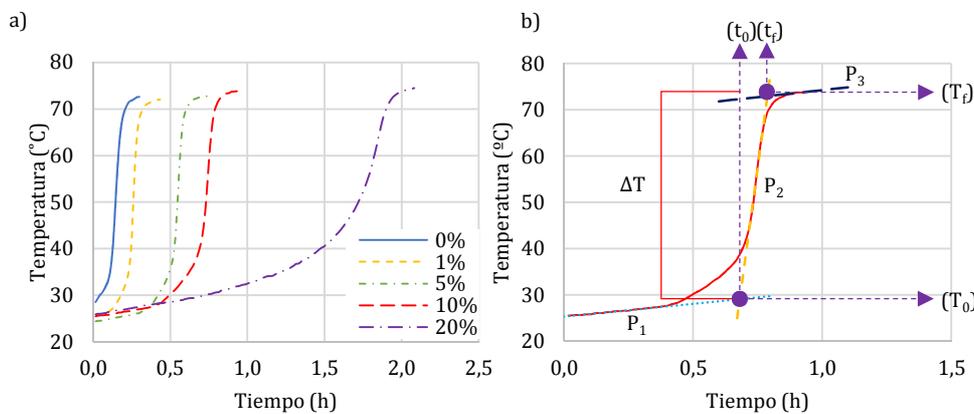


Figura 4. 4 – Resultados de la calorimetría cuasiadiabática y valores analizados para mezclas de cemento y cal del tipo A3Ad

Las curvas obtenidas del ensayo cuasiadiabático de la figura 4.4a muestran que en un primer momento se da un incremento lento de la temperatura y a continuación una aceleración de la reacción que produce un aumento del valor de la temperatura en pocos minutos. A continuación, el avance se estabiliza y se da una desaceleración de la reacción lo que produce que el incremento de temperatura sea más lento y parecido a los primeros minutos de mezcla.

La incorporación de cemento produce un retraso en el inicio de la liberación de calor derivado del contacto de las mezclas con el agua, sin embargo, para contenidos comprendidos entre 1% y 10%, a pesar de producirse un retraso inicial en la liberación de temperatura, la cinética una vez aumenta la temperatura es similar para todos los contenidos. En cambio, para el caso del 20% de adición de cemento, se produce una alteración en el inicio de la curva, dándose una cinética más lenta. Para evaluar los resultados se ha realizado un esquema (figura 4.4b) que describe la localización de los parámetros que se muestran en la tabla 4.5.

En los valores de P1, que corresponden a la pendiente del primer tramo, se observa que esta decrece a medida que aumenta el contenido de cemento, fenómeno que se repite para P2. Esto implica que al añadir cemento a una cantidad fija de cal, este retrasa las reacciones químicas del proceso de disolución del CaO en el medio líquido. Se podría argumentar que existe una competencia

entre ambos materiales para disolverse en el medio. Por otra parte, aunque la pendiente es menor se observa un incremento del calor total alcanzado a medida que aumenta el porcentajes de cemento añadido. Esto implica que aunque el cemento reduce la velocidad de disolución de la cal, su adición genera una sinergia con la cal que permite alcanzar temperaturas finales mayores. En el caso de P3, que corresponde al último tramo, no se observan variaciones entre los resultados, puede decirse que el proceso de estabilización es muy similar.

Dosificación	Cemento (%)	P1	P2	P3	T0 (°C)	t0 (h)	Tf (°C)	tf (h)	ΔT (°C)	Δt (h)
1	0	51,0	558,0	15,0	30,6	0,1	67,9	0,2	44,1	0,28
2	1	11,5	584,4	9,0	27,8	0,2	70,8	0,3	46,6	0,42
3	5	6,8	482,4	9,0	27,6	0,5	71,4	0,6	48,5	0,73
4	10	5,5	409,2	3,0	29,1	0,7	73,3	0,8	48,3	0,92
5	20	5,8	127,3	9,0	35,2	1,6	73,1	1,9	48,6	2,07

Tabla 4. 5 – Valores obtenidos de las curvas de calorimetría cuasiadiabática de la figura 4.4

En cuanto a los puntos de intersección de las pendientes (t<sub>0</sub>,T<sub>0</sub>) y (t<sub>f</sub>,T<sub>f</sub>) se observa que el tiempo del primer punto aumenta a medida que lo hace el porcentaje de cemento (tabla 4.5). Esto indica una cinética más lenta del inicio de la curva. En el caso de la temperatura para este primer punto, los valores son algo más dispersos, aunque sí que se observa una tendencia a aumentar la temperatura al añadir cal. En el caso de la cal sin adición de cemento, este valor es mayor que para las dosificación que van del 0 al 10% de adición. Para el segundo punto se dan resultados similares a los del primero, es decir, tanto los tiempos como la temperatura del punto aumentan a medida que lo hace el contenido de cemento.

Finalmente, en la figura 4.5 se observa que la variación de temperatura medida entre el inicio y el final del ensayo muestra que existe un incremento de temperatura al añadir cemento a una cantidad fija de cal. Este aumento se observa hasta el 5% de adición, y a partir de este momento se produce una estabilización del incremento de la temperatura. Así mismo los tiempos aumentan siguiendo una curva de segundo orden,

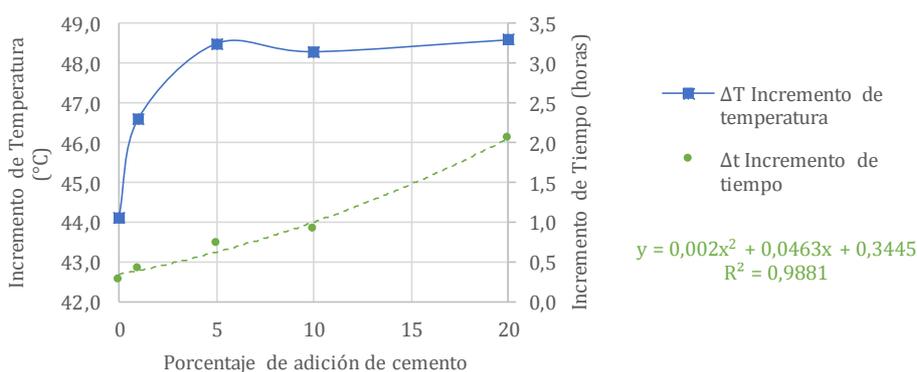


Figura 4. 5 – Evolución de la temperatura y del tiempo a medida que aumenta la adición de cemento en una cantidad fija de cal A3Ad

#### 4.4 Estudio de los resultados del ensayo de calorimetría semiadiabática

En este apartado se analizan los resultados obtenidos del ensayo de calorimetría semiadiabática. A partir de los datos obtenidos en la campaña experimental se analizará la influencia de la relación a/c, del contenido de cal, su finura y la presencia de aditivos retardantes en la evolución temporal de las temperaturas, las cuales reflejan de manera indirecta las reacciones químicas que tienen lugar.

Además de comparar los comportamientos de las curvas de evolución de la temperatura, también se definirán puntos clave que marcan un cambio de tendencia en las mismas con el fin de facilitar el análisis de los resultados. En la figura 4.6 se muestran las curvas tipo de evolución de temperatura para una muestra de pasta de cemento con y sin cal (PA3Ad35-7 y PC35-0 respectivamente), indicando los principales puntos considerados. En la figura 4.6a se muestra una vista completa de ambas curvas durante el intervalo de tiempo comprendido entre las 0 y las 20 horas, en la que se identifica el punto 4-S. Por otra parte, en la figura 4.6b se muestra una ampliación del período comprendido entre las 0 y las 7 horas, donde se aprecian los puntos 1-d, 2-L y 3-S.

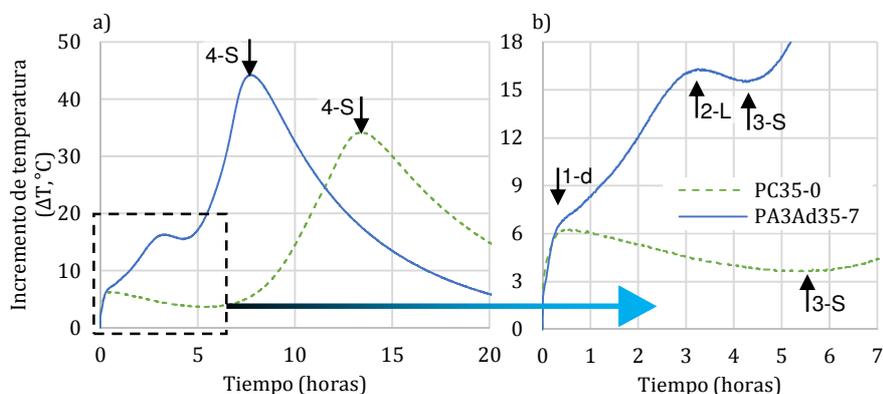


Figura 4.6 – Puntos significativos en las curvas de temperatura de hidratación

Cada uno de los puntos marcados en la figura 4.6 está formado por dos valores que corresponden al tiempo en el que han tenido lugar y a la temperatura que se ha alcanzado. Los picos marcados en la figura 4.5 se definen de la siguiente manera.

- 1-d: Corresponde con el proceso inicial de disolución de todos los componentes del cemento en el agua, es decir, en sus compuestos iónicos. Cabe destacar que este punto marca el inicio del período durmiente que se observa en la curva de hidratación del cemento.
- 2-L: Corresponde a un pico de temperatura que se observa únicamente en algunas de las curvas que contienen cal (L). Se enmarca dentro del período durmiente de un cemento convencional.
- 3-S: Corresponde al valle que marca el final del período durmiente del cemento y el inicio de la etapa de aceleración de la reacción de los silicatos y la formación de CSH.
- 4-S: Corresponde al pico de calor máximo de temperatura alcanzado al final de la etapa de aceleración, y se relaciona con el final del período de rápida reacción de los silicatos. Esto quiere decir, que a partir de este momento, aunque la reacción de los silicatos continúa, esta es más lenta y, por consiguiente, no libera la misma cantidad de calor.

En los gráficos mostrados en la figura 4.6 se observa claramente que la adición de cal al cemento genera una variación en la forma de la curva de temperatura de hidratación de la pasta. Para este caso concreto, con el mayor contenido de cal, se observa que ésta genera un aumento en los valores de los picos de temperatura, la desaparición de la fase durmiente del cemento y una reducción de los tiempos en que se da la hidratación de la pasta.

Para evaluar las interacciones entre la cal y el cemento, se realizó la superposición de las curvas de temperaturas medidas para diferentes mezclas (figura 4.7). En ella se presentan las curvas correspondientes a la mezcla de referencia (PC35-0), a la mezcla de cemento con un 4% de cal (PA3Ad35-4) y a la mezcla de filler y cal (A3Ad35-4). Esta última tiene el mismo contenido de cal que la dosificación PA3Ad35-4 pero sin la incorporación del cemento, con lo cual la evolución de temperatura medida responde únicamente a la reacción de la cal con el agua.

Teniendo esto en cuenta, se calculó la curva teórica a través de la suma algébrica ponderada de la curva de referencia y la de la mezcla de filler y cal. Por el principio de la superposición de efectos, si no existieran interacciones entre las reacciones de la cal y del cemento, la curva teórica calculada debería coincidir con la obtenida para la mezcla de cemento con un 4% de cal (PA3Ad35-4). En caso contrario, se apreciarían diferencias que servirían para identificar las interacciones negativas - en las que hay un efecto de ralentización fruto de la combinación de materiales - e interacciones positivas - en las que hay un efecto de aceleración.

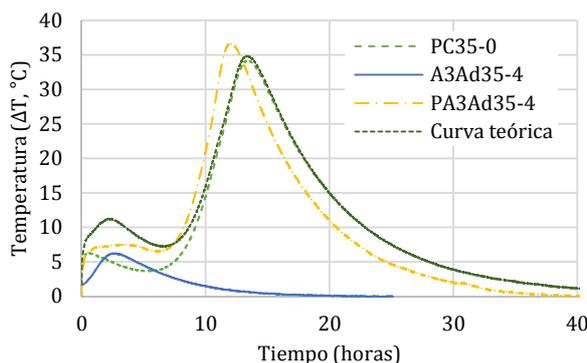


Figura 4. 7 – Curvas de temperatura de hidratación de 3 pastas juntamente con una curva teórica

En la figura 4.7 se aprecia que la curva teórica no coincide con la real obtenida para PA3Ad35-4. Ello pone de manifiesto que existen interacciones entre la cal y el cemento durante los procesos de hidratación. Dichas interacciones son negativas para las etapas 1 y 2, con lo cual se produce una ralentización de las reacciones. En cambio, las interacciones son positivas en la etapa 3, de modo que la combinación de cal y cemento produce una aceleración de las reacciones.

En la figura 4.8 se muestran las curvas de temperatura de hidratación para la pasta de referencia sin cal PC35-0, para la pasta PA3Ad35-7 con un 7 % de cal y la curva referente a una mezcla de filler y cal (A3Ad35-7), con una composición que simula a la anterior. Tal y como se ha realizado en la figura 4.7, se calcula la curva teórica a través de la suma ponderada de las curvas de la pasta de referencia y de la pasta de filler y cal.

En la figura 4.8 se observa que las interacciones negativas en el caso de la mezcla con cal analizada se producen tan solo durante la primera etapa y en parte de la etapa durmiente. Durante la mayor parte del período durmiente y en la etapa de aceleración, las interacciones son positivas, indicando que existe una sinergia fruto de la combinación de cemento y cal.

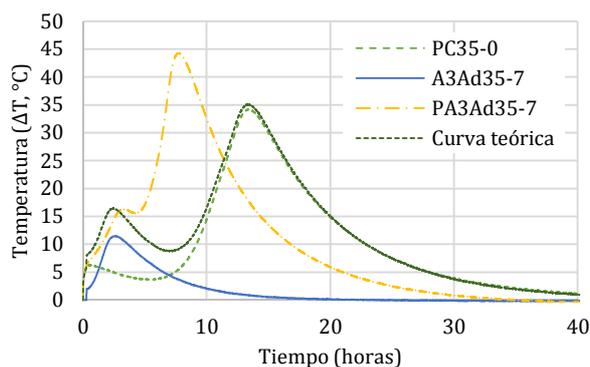


Figura 4.8 – Curvas de temperatura de hidratación de 3 pastas juntamente con una curva teórica

Los resultados mostrados en las figuras 4.7 y 4.8 evidencian la existencia de una sinergia entre el cemento y la cal cuando son mezclados. Con base a este resultado será necesario determinar que influencia tiene cada una de las variables establecidas para el estudio de estos materiales. En los apartados que siguen se mostrarán los resultados obtenidos para cada una de las variables.

#### 4.4.1 Influencia del contenido de cal

La primera variable a analizar será la influencia del contenido de cal añadido sobre el peso del cemento (1, 4 y 7%). En la figura 4.9 se muestra la comparación entre las pastas de referencia y las pastas con un 1% de adición de cal en cuanto a las temperaturas y los tiempos de los puntos característicos de las curvas de calorimetría (figura 4.6). Las líneas horizontales incluidas en los gráficos indican los valores obtenidos para las pastas de referencia. A manera de ejemplo, solo se incluyen los resultados referentes a las pastas con relación a/c 0,35 dado que las tendencias son similares para las demás relaciones a/c.

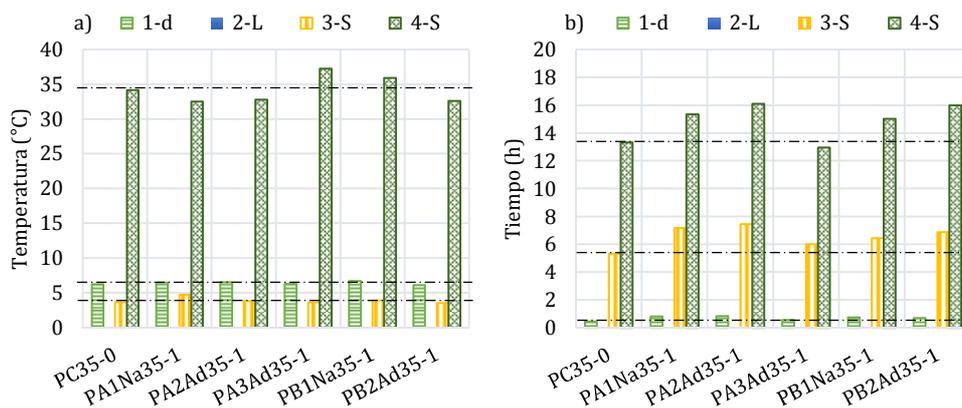


Figura 4.9 – Valores de a) temperatura y b) tiempo para los picos 1-d, 2-L, 3-S y 4-S de pastas con un 1% de cal y relación a/c 0,35

En la figura 4.9a se aprecia que, pese a la adición de un 1% de cal en una pasta de cemento, las temperaturas alcanzadas para los puntos 1-d y 3-S son muy similares a los de la pasta de referencia. Variaciones ligeramente más significativas se aprecian para el pico 4-S. No obstante, no existe una tendencia clara en base a los resultados obtenidos.

Por otra parte, en la figura 4.9b se muestra el valor de los tiempos para cada uno de los puntos característicos. En este gráfico sí que se observa una tendencia clara fruto de la adición de cal. De manera general, se observa un aumento en el tiempo de los puntos 1-d, 3-S y 4-S al compararlos con la pasta de referencia. Otro dato importante a remarcar es que para este porcentaje de cal el pico 2-L no se aprecia para ninguna de las pastas de cemento analizadas.

El aumento en los tiempos de los picos podría estar relacionado con un efecto de competencia entre el cemento y la cal a edades iniciales cuando se incluye un bajo contenido de esta última. En este contexto, la cal podría contribuir a aumentar rápidamente el pH del medio, reaccionando con el agua y limitando la solubilización de los aluminatos y de los silicatos del cemento. No obstante, el contenido limitado de CaO disponible no es suficiente para producir la saturación del medio con la consecuente finalización del período durmiente. Por consiguiente, se retrasan los tiempos de los puntos 3-S y 4-S. En el caso de las pastas de referencia, la ausencia de cal favorece la disolución de los aluminatos y los silicatos del cemento, generando tiempos durmientes y períodos de aceleración ligeramente más cortos.

En los gráficos de la figura 4.10 se muestran los valores de temperatura y tiempo de los cuatro picos estudiados para las pastas que contienen un 4% de cal con respecto al peso del cemento. En la citada figura se muestran, así mismo, los valores para la pasta de referencia. En la figura 4.10a se observa que un contenido del 4% de cal en las pastas de cemento produce un aumento en la temperatura de todos los picos con respecto a la de la pasta de referencia. Este fenómeno es más evidente para los picos 3-S y 4-S. Cabe destacar que las cales no aditivadas (-Na) son las que obtienen valores de temperatura mayores para el pico 4-S. Esto puede estar relacionado con la reactividad de estas frente a las que presentan un comportamiento retardado, ya que tanto la cal A1Na como la B1Na son las que presentaron una mayor rapidez de disolución, y por consiguiente, las que alcanzaron a una edad más temprana el pH de referencia del ensayo de cítricos (figura 4.3).

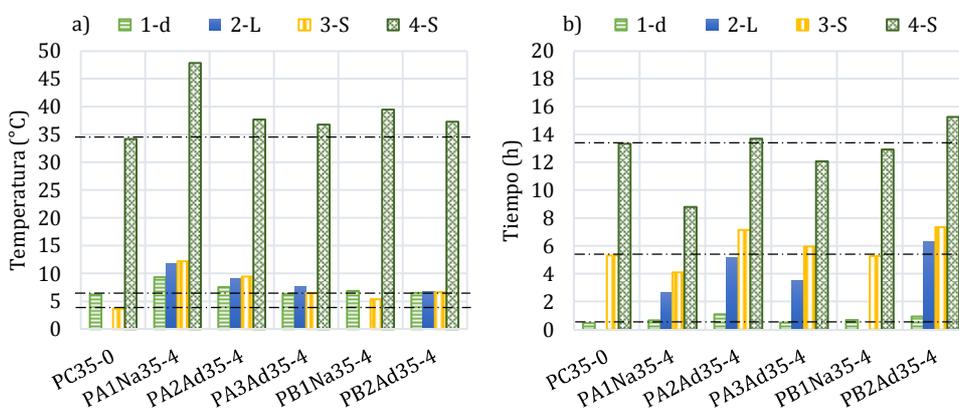


Figura 4. 10 – Valores de a) temperatura y b) tiempo para los picos 1-A, 2-L, 3-S y 4-S de pastas con un 4% de cal

En todos los casos, el aumento del contenido de cal genera un aumento del calor liberado durante la hidratación de los componentes, lo que se traduce en un aumento general de la temperatura con respecto a la pasta de referencia. A diferencia de las pastas con el 1% de cal, en este caso ya se observa la aparición del pico 2-L, fruto de la reacción exotérmica entre la cal y el agua.

En la figura 4.10b se aprecia que los tiempos en los que se producen el pico 1-d se retrasan con la incorporación de cal, de manera similar al observado para las mezclas con el 1% de adición. Ello se debe a la reacción de la cal, que se extiende durante un período más amplio que la disolución

de los aluminatos y los silicatos anhidros en las pastas de referencia. Se observan valores, en general, más altos en las mezclas con cal aditivadas, es decir, estas calces tardan más tiempo en alcanzar el pico de temperatura con respecto al cemento. En este último caso, el aumento del contenido de cal podría ser suficiente para favorecer una saturación más rápida del medio con iones  $\text{Ca}^{2+}$ . Ello promovería el fin de la etapa durmiente e inicio de la etapa de aceleración, con la consecuente reducción de los tiempos referentes a los puntos 3-S y 4-S.

En la figura 4.11 se muestran los resultados de temperatura y tiempo para los cuatro puntos característicos para la pasta de referencia y las que contienen un 7% de cal. En el gráfico de la figura 4.11a se observa que todos los valores de temperatura para las pastas de cemento y cal son superiores a los obtenidos para la pasta de cemento de referencia. Ello se debe al aporte de calor generado a raíz de la reacción de la cal. Por la misma razón, en prácticamente todas las mezclas con cal se aprecia la aparición del pico adicional 2-L durante el período durmiente. La presencia de este pico sugiere que, si bien las reacciones de hidratación del cemento se han reducido durante el período durmiente, la cal sigue reaccionando y aportando iones al medio. Cabe destacar que la aparición de 2-L enmascara el período durmiente, dificultando la determinación precisa del punto 3-S que debería marcar el inicio del período de aceleración. Este fenómeno de enmascaramiento ya fue observado por M. Fourmentin *et al* (Fourmentin *et al.*, 2015) cuyos resultados concluyeron que las pastas de cemento y cal no tienen período durmiente ya que durante todo el proceso de hidratación existen reacciones químicas.

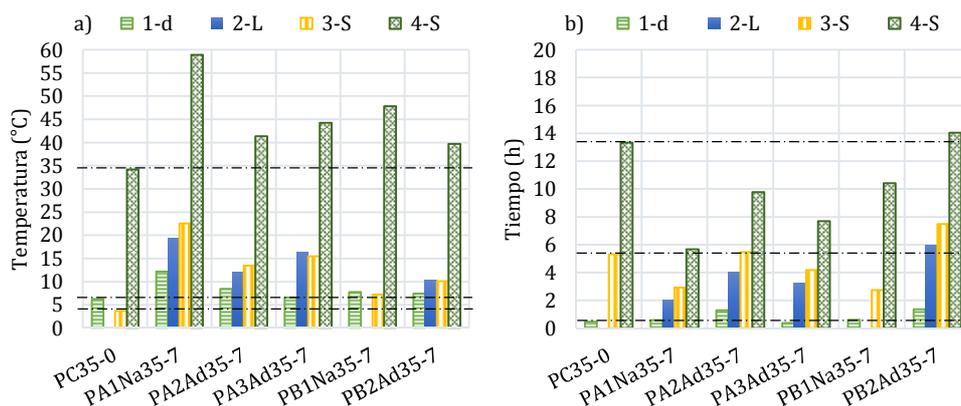


Figura 4.11 - Valores de temperatura y tiempo para los picos 1-d, 2-L, 3-S y 4-S de pastas con un 7% de cal

De manera similar a lo observado en las mezclas con 1% y 4% de cal, los tiempos referentes al punto 1-d aumentan con la incorporación de la cal a raíz de su reacción más extendida en el tiempo durante la primera etapa (figura 4.11b). En cuanto al punto 3-S, se observa una reducción del tiempo durmiente para las muestras de cal no aditivadas, mientras que para la mayoría de las muestras aditivadas los tiempos son más largos que en las pastas de referencia. Ello se debe al mayor potencial de liberación de iones  $\text{Ca}^{2+}$  por parte de las muestras de cal no aditivadas, lo cual podría reducir el período durmiente al contribuir a una más rápida saturación del medio. Por otra parte, a excepción de la pasta B2Ad35-7, todas las demás presentan una reducción del tiempo necesario para alcanzar el punto 4-S en comparación con lo observado en las pastas de referencia.

Se observa que la repercusión de la incorporación de la cal es más evidente en el tiempo referente al punto 4-S que en el referente a 3-S. En otras palabras, la pendiente de la curva en la etapa de aceleración tiende a ser más alta en las mezclas con cal. Esto indica que la presencia de cal no solo

es capaz de eliminar la etapa durmiente al favorecer la saturación del medio, sino que también contribuye a la hidratación de los silicatos cálcicos anhidros del cemento en la etapa de aceleración.

Ello podría deberse a una mayor precipitación de hidróxidos de calcio en las mezclas con cal. Otra posible explicación podría estar relacionada con el efecto de nucleación según el cual los cristales precipitados de hidróxido de calcio servirían como puntos de deposición de los silicatos de calcio hidratado. Ambos fenómenos, producirían una reducción del contenido de iones disueltos durante la etapa de aceleración y, por equilibrio químico, promoverían un aumento de las reacciones de hidratación. El aumento de las temperaturas alcanzadas en las pastas con mayor contenido de cal también podría ser responsable en parte de la aceleración de las reacciones. Cabe destacar que a temperatura más altas se favorecen las reacciones de hidratación del cemento.

Para evaluar con más detalle la influencia del aumento del contenido de cal, en la figura 4.12 se presentan las temperaturas de los puntos característicos para las pastas de cemento con cal. Los resultados ponen de manifiesto que se alcanzan temperaturas más altas en todos los puntos al incrementar el contenido de la adición.

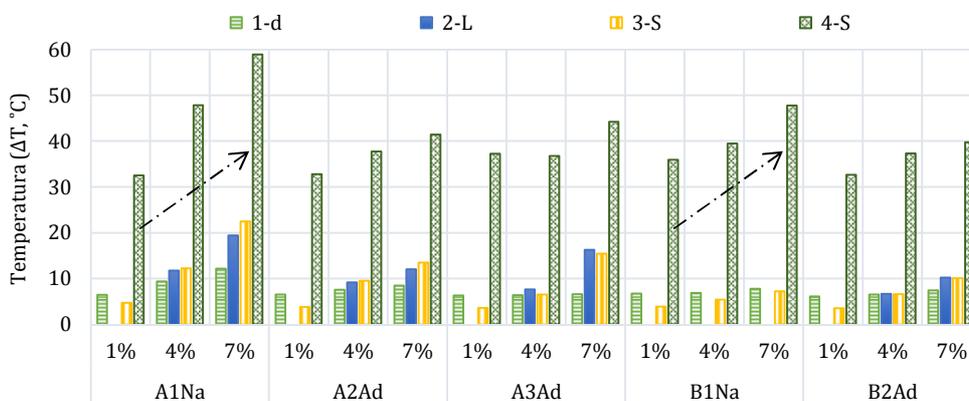


Figura 4. 12 - Temperatura de los puntos característicos para pastas de cemento con los 3 porcentajes de cal (a/c 0,35)

En la figura 4.13 se muestra la misma comparación de la figura 4.12, teniendo en cuenta ahora los tiempos. Con base en los resultados se puede concluir que el incremento del contenido de cal conduce, de manera general, a una reducción de los tiempos referentes a 2-L, 3-S y 4-S. Asimismo, cabe destacar que la aparición del punto 2-L se limita a los contenidos más elevados de incorporación de cal, lo que está relacionado con el potencial calorífico de las pastas con 4% y 7% de adición. También es interesante observar que el punto 2-L no se produce en ningún caso estudiado con la cal B1Na.

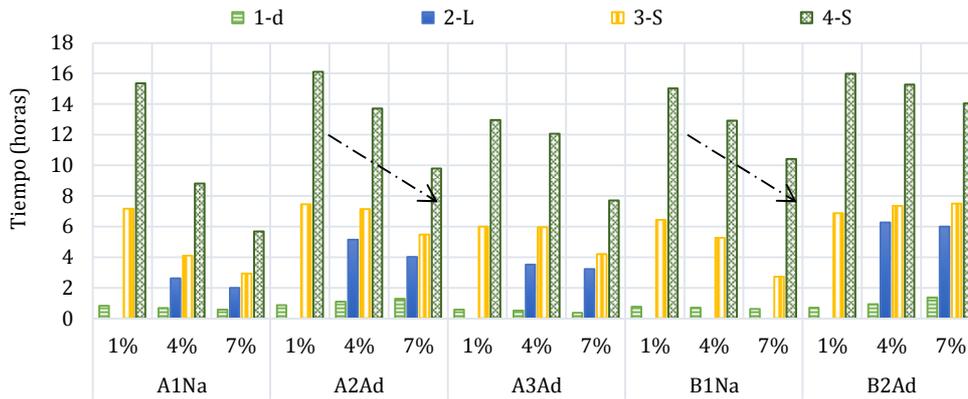


Figura 4.13 – Tiempo de los puntos característicos para pastas de cemento con los 3 porcentajes de cal (a/c 0.35)

Una tendencia distinta se observa al evaluar los tiempos del punto 1-d. En aras de facilitar la comparación de los mismos, en la figura 4.14 se presentan los tiempos medidos para las diferentes mezclas de cemento y cal estudiadas. Se aprecia que el aumento del contenido de la cal sin retardante (-Na) produce una reducción del tiempo del pico 1-d, fruto de la rápida disolución inicial y reacción de la cal. No obstante, en el caso de dos de las muestras de cal con aditivo retardante (-Ad), el aumento de contenido conlleva a un aumento del tiempo del punto 1-d. Si bien para explicar esta tendencia se debería conocer mejor la naturaleza del aditivo retardante usado, posiblemente este último es el responsable por el cambio de tendencia observado. Una vez deja de tener efecto el retardante, se inician las reacciones y se produce el pico 1-d.

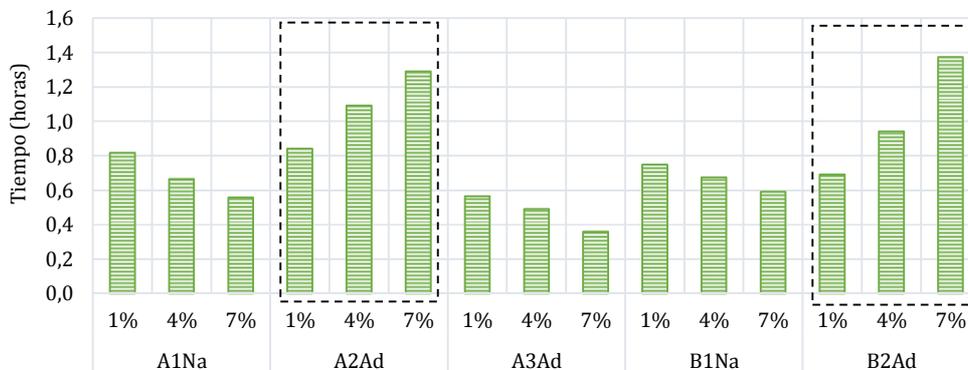


Figura 4.14 – Valores de tiempo del pico 1-d para las 15 muestras estudiadas (a/c 0,35)

#### 4.4.2 Influencia de la finura de la cal o de la superficie específica (BET)

La superficie específica ( $S_{esp}$ ) es uno de los parámetros principales que afectan la velocidad de reacción de un material en el medio líquido. Es ampliamente aceptado que el aumento de la superficie específica, aumenta las zonas de contacto potencial con los reactivos, aumentando así la velocidad de las reacciones. Los valores de  $S_{esp}$  para las cinco cales ensayadas se han mostrado en la tabla 4.1. La influencia de la superficie específica únicamente puede ser comparada para las muestras A2Ad y A3Ad, por tratarse del mismo tipo de cal y que contienen el mismo aditivo retardante. En el gráfico de la figura 4.15 se muestran los valores de temperatura para los 4 picos de la curva de

temperatura de hidratación de las muestras indicadas anteriormente. En dicho gráfico se muestran los resultados según el porcentaje de cal usado y en función de la relación a/c.

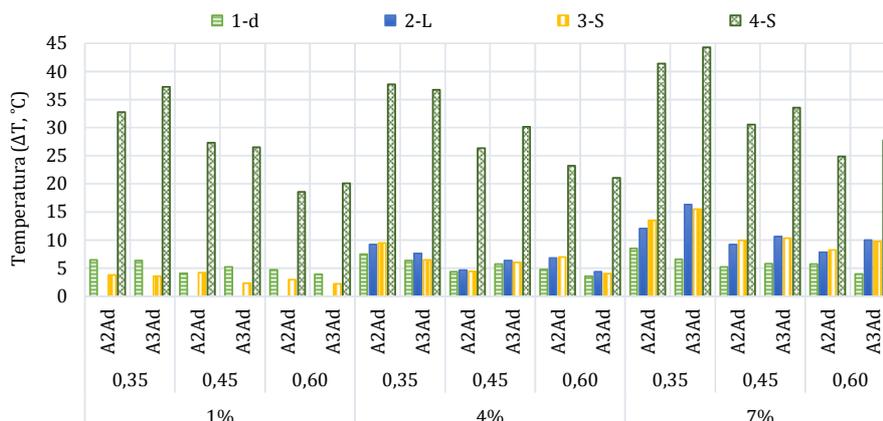


Figura 4. 15 – Valores de temperatura de los cuatro picos estudiados para pastas de cemento y cal (A2Ad y A3Ad) en función de la relación a/c y del porcentaje de cal

Los resultados obtenidos indican que el aumento de la superficie específica aumenta la temperatura de los distintos picos. En algunos casos este fenómeno no tiene lugar, lo que puede ser debido a un error de medición causado por el sistema de medición empleado.

Por otra parte, es necesario también determinar la influencia de la finura de la cal en cuanto al tiempo. En la figura 4.16 se han agrupado los valores de los tiempos de los cuatro picos de la curva de temperatura de hidratación para todas las dosificaciones realizadas con las muestras A2Ad y A3Ad. Se aprecia que la tendencia principal se resume en una reducción de los tiempos al aumentar la finura de la cal. Esta reducción de los tiempos se debería a la mayor interacción que se produce entre el agua y las partículas debido al aumento de la superficie específica de estas últimas. Para este caso se ha visto que el aumento de la superficie específica de la cal genera una reducción media en los tiempos del 55%, 20%, 19% y 16% para los picos 1-d, 2-L, 3-S y 4-S respectivamente.

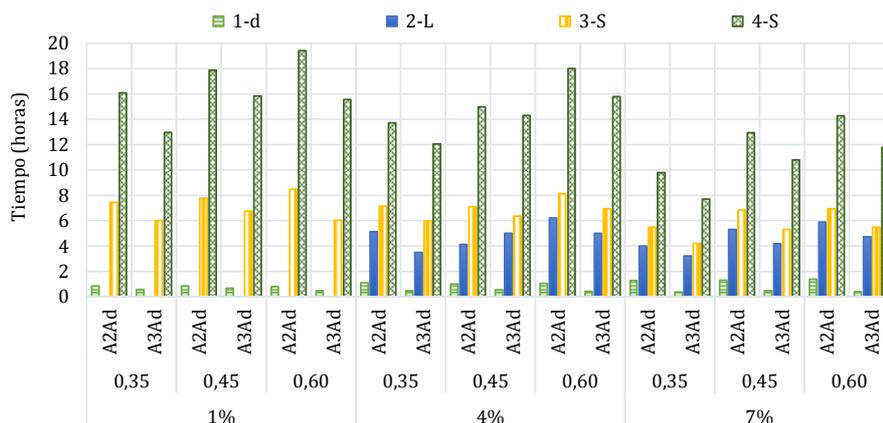


Figura 4. 16 – Valores de tiempo de los cuatro picos estudiados para pastas de cemento y cal (A2Ad y A3Ad) en función de la relación a/c y del porcentaje de cal

#### 4.4.3 Influencia de la aditivación de la cal

Para esta variable se compararan los resultados de las muestras A1NA y B1NA, no aditivadas, con los de las muestras A2Ad y B2Ad. Cabe recordar que estas presentaban reactividades claramente

diferenciadas tras la determinación de su reactividad potencial (figura 4.3). En primer lugar se analizan las diferencias entre las muestras A1Na y A2Ad. Para ello, en la figura 4.17 se presentan los resultados de temperatura de los cuatro picos estudiados de las pastas de cemento y cal. Las pastas se agrupan en función del porcentaje de cal y de la relación a/c, obteniéndose un total de 9 dosificaciones para cada una de las pastas.

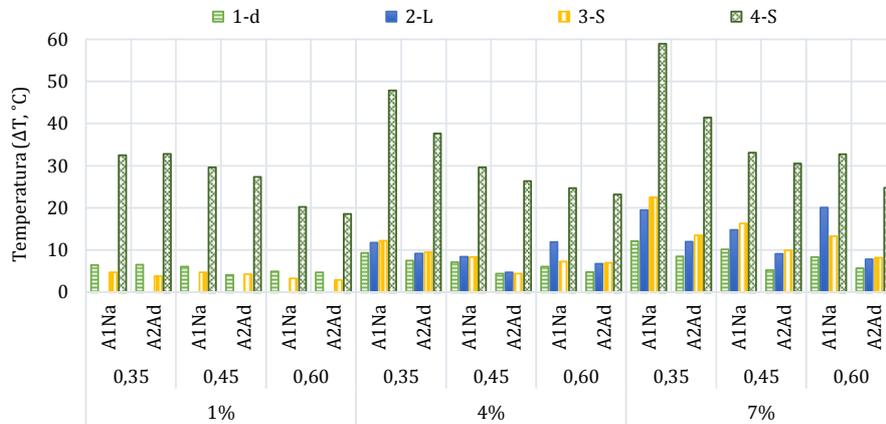


Figura 4. 17 – Temperatura de los cuatro picos estudiados para pastas de cemento y cal (A1Na y A2Ad)

En la figura 4.17 se observa que el aditivo retardante genera pastas cuyos picos obtienen valores de temperatura inferiores a los de las muestras sin aditivar. El efecto del aditivo retardante limita la disolución de la cal en el medio líquido. Este fenómeno retarda la liberación de los iones  $\text{Ca}^{+2}$ , por lo que la extensión de las reacciones químicas será menor, así como los valores de temperaturas.

En el caso del tiempo se han obtenido los resultados que se muestran en la figura 4.18. En la citada figura se aprecia que los tiempos son mayores en las pastas de cemento con la cal A2Ad para todos los picos y para todas las pastas. El aumento en el tiempo se relaciona con el aditivo retardante que contiene la cal A2Ad. Este evita el aumento en la concentración de iones en la solución lo que retarda los distintos procesos de reacciones de los componentes del clinker en comparación con la cal A1Na.

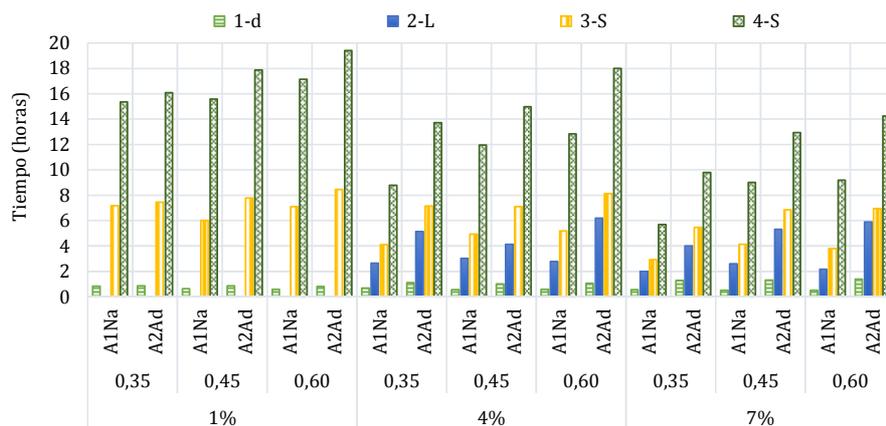


Figura 4. 18 – Valores de tiempo de los cuatro picos estudiados para pastas de cemento y cal (A1Na y A2Ad) en función de la relación a/c y del porcentaje de cal

En apartados anteriores se ha visto que la adición de cal en una pasta de cemento adelanta los tiempos en que se dan los picos, y se reducen los tiempos de las etapas de hidratación de una pasta de cemento. Por lo tanto, una cal con un aditivo retardante generará una curva de temperatura

de hidratación intermedia entre la dosificación con cal no aditivada y la dosificación de referencia sin cal. Esta hipótesis queda confirmada por los resultados mostrados en la figura 4.19 donde se observa claramente como la curva de la dosificación PA235-7 se encuentra entre la de la dosificación PA135-7, que se corresponde con la que no contiene retardante, y la más retardada que corresponde con la de cemento o de referencia (PC35-0). Los resultados obtenidos para las cales B1Na y B2Ad reproducen un comportamiento muy similar al descrito para las muestras A1Na y A2Ad.

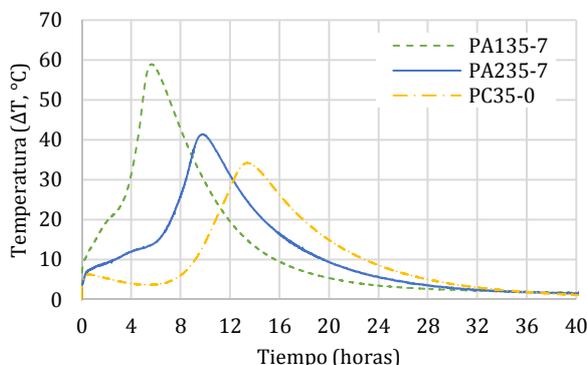


Figura 4. 19 – Curva de temperatura de hidratación en función del tiempo para tres pastas de cemento, en las que dos de ellas contienen cal

#### 4.4.4 Influencia de la relación a/c

##### a) Pastas de cemento de referencia (sin cal)

Con el objetivo de definir la influencia de la relación a/c en las curvas de temperatura de hidratación de pastas de cemento y cal es necesario determinar, en primer lugar, el efecto de esta variable en pastas de cemento sin cal. En la figura 4.20 se muestra un gráfico que corresponde a las curvas de temperatura de hidratación con respecto a tiempo de tres pastas de cemento con distinta relación a/c. En dicha figura se aprecia la influencia de la relación a/c en cuanto a los valores de temperatura alcanzados, así como en el retraso de la curva de calor de hidratación a medida que aumenta el ratio a/c. Con el objetivo de facilitar el análisis, en la figura 4.21a y 4.21b se muestran los valores de temperatura y tiempos de hidratación de los puntos 1-d, 2-L, 3-S y 4-S, respectivamente. Nótese que al no incorporarse cal, las curvas de temperatura no presentan el punto 2-L.

Es interesante observar en la figura 4.20 que tiende a haber una inversión en las temperaturas registradas en la etapa de desaceleración, las cuales pasan a ser ligeramente más altas en las dosificaciones con mayor relación a/c. El mismo fenómeno ha sido descrito por Jiong Hu *et al.* (Hu, Ge, & Wang, 2014) que lo atribuyen a la cantidad de agua presente para la hidratación de los componentes. Dicho de otra manera, a mayor relación a/c mayor cantidad de agua libre para seguir con el proceso de hidratación y, por consiguiente, para seguir generando calor aunque en menor proporción al de las etapas previas.

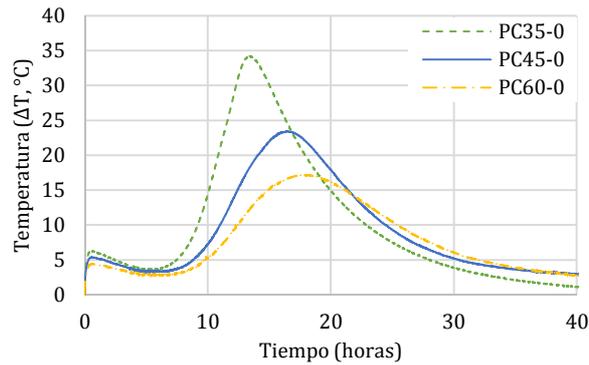


Figura 4. 20 – Curvas de temperatura de hidratación en función del tiempo para pastas de cemento sin cal al variar la relación a/c

En la figura 4.21 se observa que a medida que aumenta la relación a/c el tiempo de los puntos característicos aumenta, mientras que la temperatura alcanzada se reduce. Esta tendencia se produce de manera más evidente en el caso del punto 4-S. Desde el punto de vista físico la presencia de poca agua reduce el contenido proporcional de cemento disponible para reaccionar, y por consiguiente, las fases capaces de generar calor durante la hidratación. El aumento de la porción de agua contribuye además a amortiguar el aumento de la temperatura debido a la obtención de mezclas con mayor calor específico. Todo ello conduce a la reducción apreciada en la temperatura de los puntos característicos con el aumento de la relación a/c.

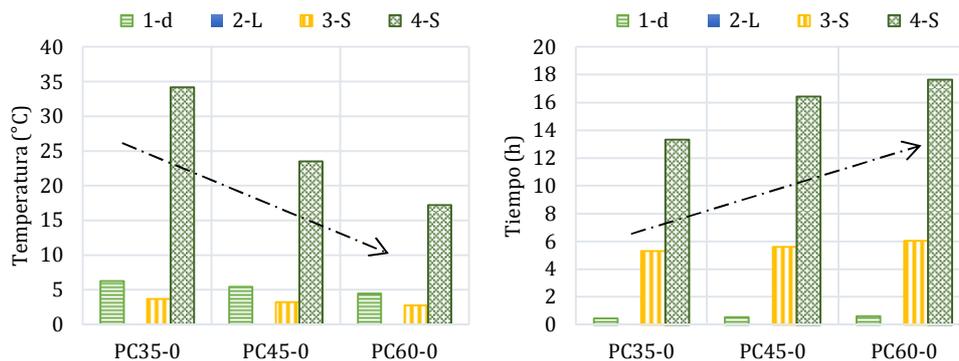


Figura 4. 21 – a) Valores de temperatura y b) tiempos de los puntos 1-d, 2-L, 3-S y 4-S para pastas de cemento

Desde un punto de vista químico, la presencia de más agua requiere una disolución de más cantidad de iones  $\text{Ca}^{2+}$ , aluminatos y yeso necesarios para saturar el medio líquido, esto es, para finalizar la etapa durmiente e iniciar la de aceleración. Esto implica un retraso de los tiempos en que se producen los puntos característicos a medida que aumenta la relación a/c.

## b) Pastas de cemento con cal

Una vez conocido el comportamiento de las pastas de cemento se procederá a analizar la influencia de la relación a/c en pastas de cemento y cal. En la figura 4.22 se muestran las curvas de temperatura de hidratación en función del tiempo de seis pastas, tres sin cal (PC) y tres con cal (PB2). En ambos casos se contemplan las tres relaciones a/c estudiadas. A manera de ejemplo, sólo se incluyen los resultados obtenidos en pastas con un 7% de la cal B2 puesto que se aprecian tendencias similares para las demás muestras de cal y dosificaciones.

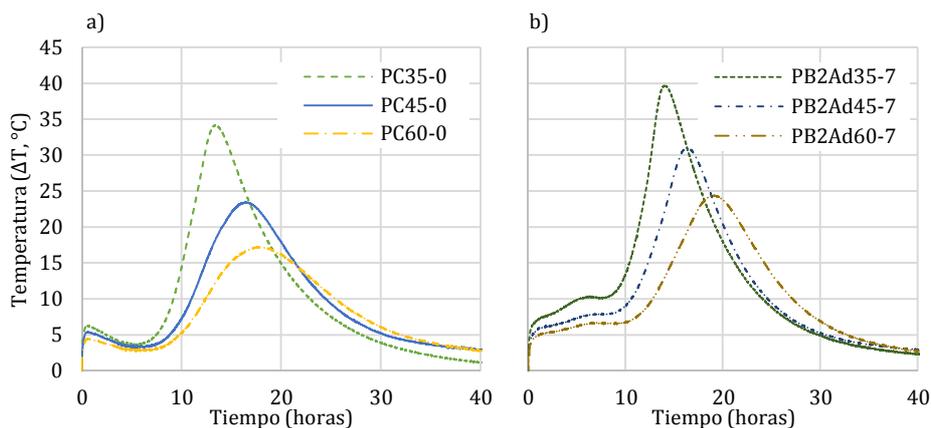


Figura 4.22 - Temperatura de hidratación para pastas con relaciones a/c 0,35; 0,45 y 0,60

Al comparar las dos series de curvas se observa que la tendencia de reducir la temperatura a medida que aumenta la relación a/c se reproduce también para el caso de pastas con cal. Hay que mencionar que esta tendencia se repite de forma generalizada. De igual manera, para este caso el tiempo en que se dan los picos analizados también aumenta a medida que lo hace la relación a/c.

En aras de simplificar el análisis de la influencia de la relación a/c en pastas con y sin cal, se muestra la influencia de este parámetro únicamente para el punto 4-S. En la figura 4.23 se presentan los valores de la temperatura alcanzada en dicho pico, en función de la relación a/c, para todas las muestras de cal y todos los contenidos estudiados. Se aprecia que para cada uno de los bloques mostrados se reproduce la misma tendencia de reducción de la temperatura que para las pastas de cemento, entendiéndose por bloques las pastas que contienen el mismo tipo de cal (A1, A2, etc.). Independientemente del tipo o de la cantidad de cal, la tendencia de reducción de la temperatura se mantiene.

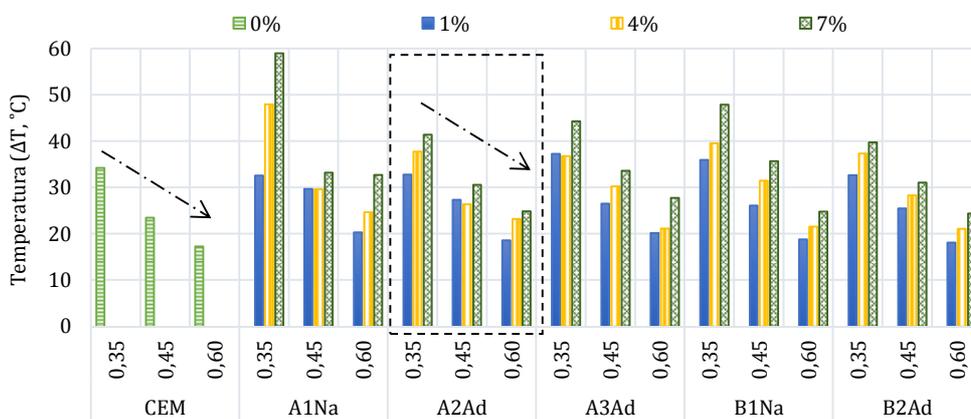


Figura 4.23 - Valores de temperatura del pico 4-S para todas las dosificaciones realizadas

Otro dato a comprobar es el tiempo que se tarda en alcanzar el pico 4-S. En la figura 4.24 se muestran los valores de tiempo para dicho pico de todas las pastas estudiadas, en función de la relación a/c. En la citada figura se aprecia que cada uno de los bloques mencionados anteriormente sigue la misma tendencia que las pastas de cemento, es decir, el tiempo aumenta a medida que aumenta la relación a/c. Para el caso del tiempo la tendencia se mantiene independiente del tipo de cal y de la cantidad de esta.

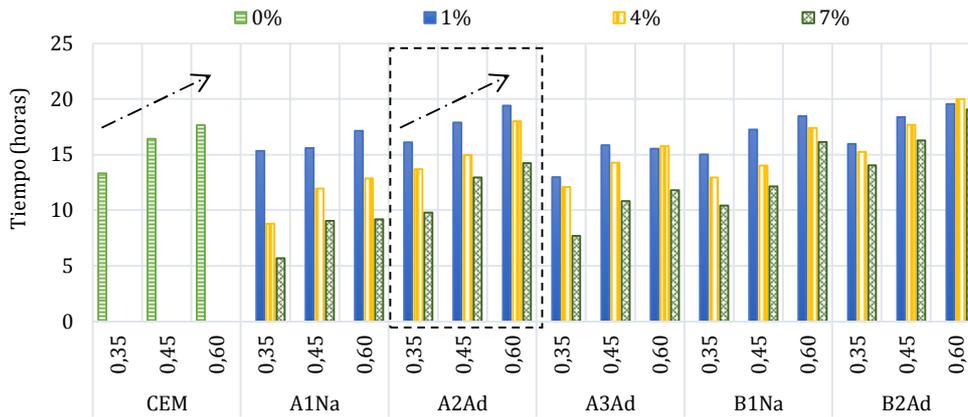


Figura 4. 24 – Valores de tiempo en alcanzar el pico 4-5 para todas las dosificaciones realizadas

En conclusión, los fenómenos químicos y físicos que se aprecian para las pastas de cemento se reproducen igualmente para las pastas de cemento con cal. En el aspecto químico, la cantidad de agua aumenta y, de igual manera que para las pastas sin cal, se requiere mayor cantidad de productos en disolución para saturar el medio y, por consiguiente, para inicial la etapa de aceleración. Esto implica que el tiempo aumente y la temperatura se reduzca. En cuanto a los factores físicos, los calores específicos de las pastas, calculados a partir de una media ponderada de los valores de calor específico de cada uno de sus componentes, también aumentan con la relación a/c. Esto quiere decir que el aumento del contenido de agua genera mezclas en las que se necesita más energía para hacer variar la temperatura. En el caso estudiado, esto se traduce en que los valores de temperatura obtenidos se reducen con el aumento de la relación a/c.

## 4.5 Caracterización de los tiempos de fraguado

El proceso de fraguado es controlado inicialmente por la hidratación del  $C_3S$  (Mindess, Young, & Darwin, 2003; Neville, 2011; Taylor, 1990) y también por la hidratación de los aluminatos o  $C_3A$  (Hewlett et al., 2004; Neville, 2011). En la mayoría de los casos se da por válida la hipótesis de que la formación del C-S-H es la causante del fraguado del cemento. Otros investigadores afirman que el fraguado se da por la recrystalización de los microcristales primarios de etringita en cristales bien desarrollados. Hay que diferenciar entre dos momentos del fraguado de las pastas que son el inicio de fraguado y el final de fraguado. El inicio de fraguado se da al final del período de inducción de la curva de calor de hidratación del cemento y termina en el pico máximo del periodo de aceleración (Mindess et al., 2003), que se establece como el punto de final de fraguado.

A modo de resumen, los resultados obtenidos para los ensayos referentes al tiempo de fraguado son los que se muestran en la figura 4.25. En esta figura se presentan los datos para las dosificaciones realizadas con la cal A1Na ya que es representativa de todas las pastas analizadas. Se observa que la tendencia general ante la adición de cal es la reducción de los tiempos de fraguado. El análisis de las variables estudiadas se muestra en los subapartados que siguen.

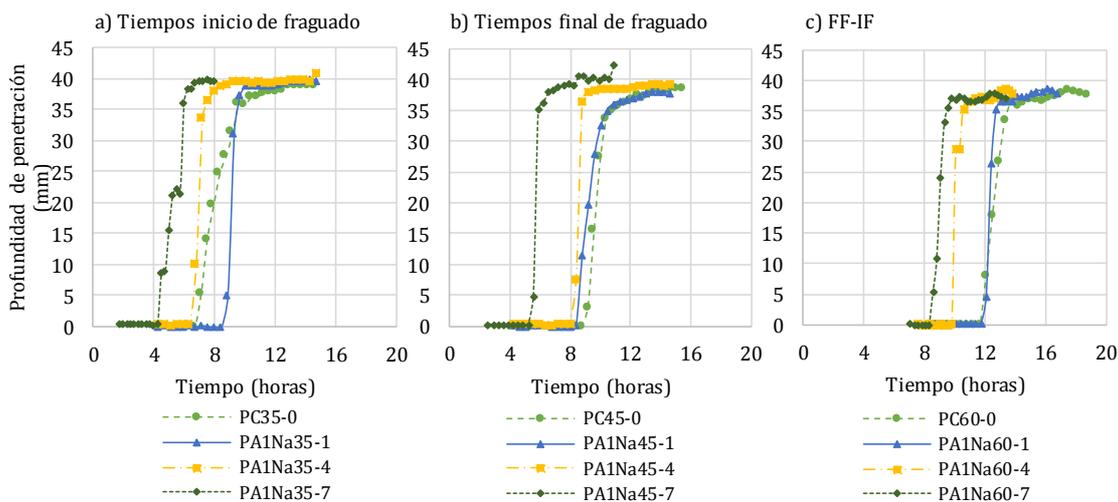


Figura 4. 25 - Tiempos de fraguado para las dosificaciones con la cal A1Na

### 4.5.1 Influencia del contenido de cal y de la relación a/c

El porcentaje de cal añadido a las distintas dosificaciones influye en los tiempos de fraguado reduciéndolos a medida que aumenta el porcentaje de cal. Este fenómeno se observa en la figura 4.26 para las tres relaciones a/c estudiadas y es representativa del resto de cales analizadas. La reducción de los tiempos de fraguado representa un problema en el momento de la puesta en obra del material en los casos de elementos hormigonados con temperaturas altas y a una distancia larga de la fábrica de hormigón, ya que el margen de maniobra para su transporte, vertido y colocación se reduce de 3 a 4 horas aproximadamente. Por el contrario, si el mismo elemento se hormigona con un clima más frío, esta reducción de los tiempos podría presentarse como una ventaja. En la figura 4.26 se muestran los gráficos relativos a los tiempos de inicio y final de fraguado para todas las dosificaciones realizadas con la cal A1Na.

En la figura 4.26a se observa que a medida que aumenta el porcentaje de cal, independientemente de la relación a/c, se reducen los tiempos. Cabe destacar que el tiempo transcurrido entre el inicio y el final de fraguado, denominado en la figura 4.26 como A1Na-dif, también se reduce con el aumento del contenido de cal, por lo que el margen de trabajabilidad de la mezcla es aún menor.

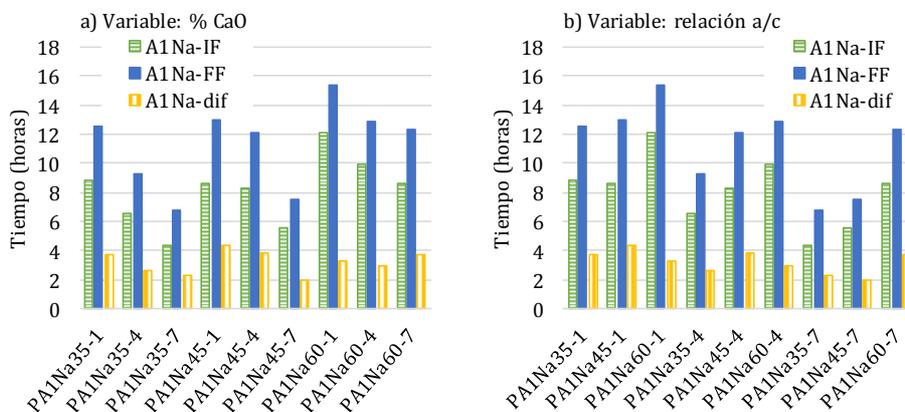


Figura 4. 26 - Influencia del porcentaje de cal (a) y la relación a/c (b) en los tiempos de fraguado para la cal A1Na

En el caso de la influencia de la relación a/c (figura 4.26b) en los tiempos se observa que estos aumentan con el aumento de la relación a/c. Este fenómeno se da tanto para los tiempos de inicio como para los de final de fraguado. En cuanto a la diferencia entre los tiempos de inicio y final de fraguado se observa que para la relación a/c de 0,45 el tiempo de trabajabilidad es mayor que para el resto en el caso de los porcentajes de cal del 1% y del 4%. Por otra parte, esto no se da para el mayor contenido de cal, y se observa que en este caso existe más margen de trabajo para la relación a/c de 0,60.

#### 4.5.2 Influencia de la finura de la cal

La influencia de la finura de la cal en los tiempos de fraguado se observará mediante el análisis de los tiempos obtenidos para las dosificaciones con las cales A2Ad y A3Ad. En la figura 4.27 se muestran los valores obtenidos para los tiempos de inicio (a) y de final de fraguado (b) para las dos dosificaciones mencionadas. De manera general, se observa que la cantidad de agua presente influye en el comportamiento de las cales. Así, se ve que para la relación a/c menor la cal más fina inicia antes el fraguado, y el mismo fenómeno se observa para los tiempos de final de fraguado.

En el caso de la relación a/c de 0,45 se observa una inversión de esta tendencia a medida que aumenta el porcentaje de cal, es decir, la cal más fina tarda más en iniciar el proceso de fraguado y en el caso del final de fraguado, los tiempos se igualan.

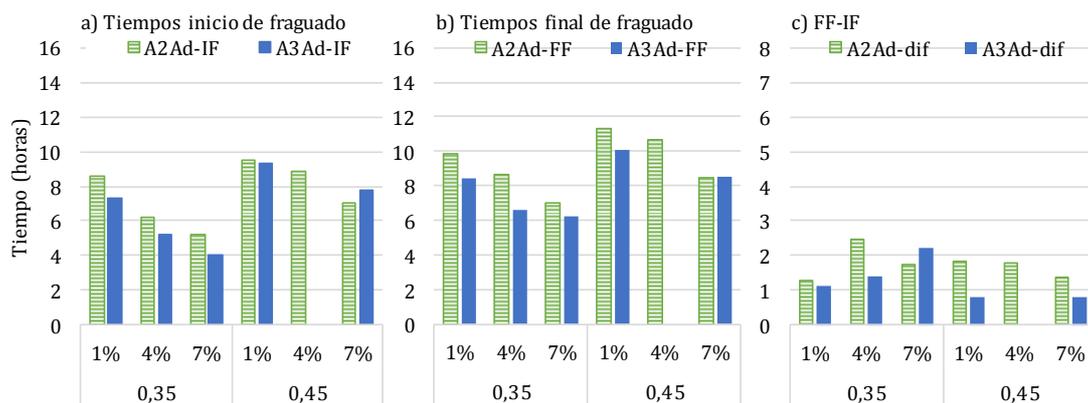


Figura 4. 27 - Influencia de la finura de la cal en los tiempos de fraguado para las cales A2Ad y A3Ad

A diferencia de las pastas con la relación a/c de 0,35, las pastas realizadas con la relación de 0,45 no presentan una tendencia clara en cuanto a la influencia del porcentaje de cal. En cuanto al intervalo entre el inicio y el final de fraguado para la relación 0,35 se observa que el tiempo de este intervalo aumenta con el aumento del porcentaje de cal para las dosificaciones con la cal A3Ad, mientras que para las realizadas con la cal A2Ad no se da una tendencia clara. En el caso de la relación 0,45 se observa que las dosificaciones con la cal A2Ad reducen el tiempo del intervalo al aumentar el porcentaje de cal, mientras que para las dosificaciones realizadas con la cal A3Ad, no se da esta tendencia.

### 4.5.3 Influencia de la aditivación de la cal

En la figura 4.28 se muestran los valores obtenidos de inicio y final de fraguado, así como el intervalo de tiempo entre ambos valores. En el gráfico referente al inicio de fraguado de las dosificaciones con las cales A (figura 4.28a) se observa que la cal aditivada, de manera general, tarda más en iniciar el fraguado. Por otra parte, los tiempos en que se da el final de fraguado de las mezclas es menor para las dosificaciones con la cal aditivada (A2Ad). Finalmente, se observa que los rangos de tiempo entre el inicio y el final de fraguado son inferiores para las cales aditivadas (figura 4.28c).

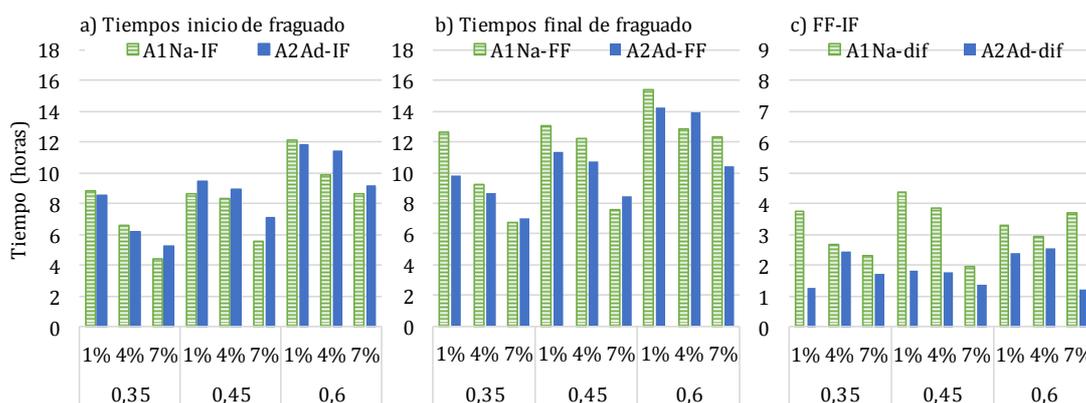


Figura 4. 28 – Influencia de la aditivación de la cal en los tiempos de fraguado para las cales A1Na y A2Ad

En el caso de las cales B (figura 4.29) se da el mismo fenómeno de inicio de fraguado que para las cales A, mientras que el final de fraguado se dan dos resultados. En primer lugar, los menores porcentajes de cal generan dosificaciones que fraguan antes con las cales no aditivadas (-Na), mientras que los mayores porcentajes, son las cales aditivadas (-Ad) las que fraguan primero. Los tiempos de inicio de fraguado decrecen a medida que aumenta el porcentaje de cal, mientras que para los tiempos de final de fraguado no se da una tendencia clara de la influencia de la aditivación. En cuanto al intervalo de tiempo comprendido entre el inicio y el final de fraguado se observa que la pasta con la cal no aditivada parece incrementar este tiempo con el aumento del contenido de cal, mientras que las pastas con la cal aditivada tampoco aquí presentan una tendencia clara del comportamiento.

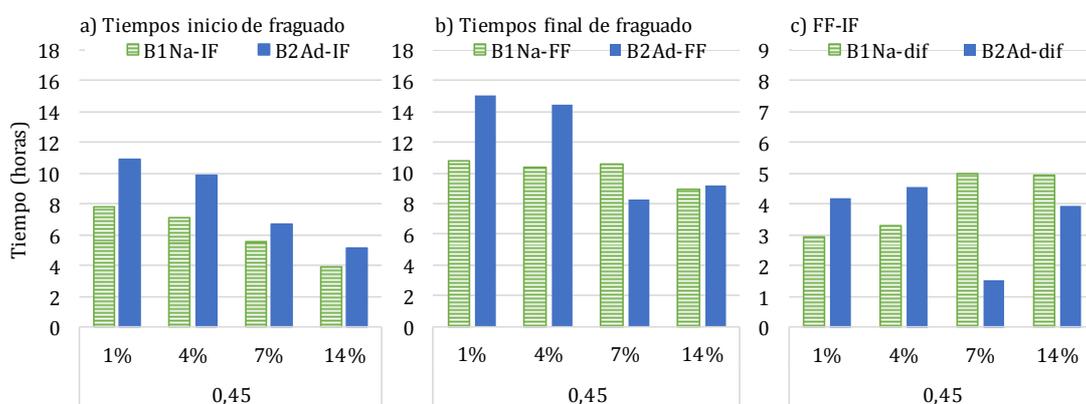


Figura 4. 29 – Influencia de la aditivación de la cal en los tiempos de fraguado para las cales B1Na y B2Ad

## 4.6 Calorimetría isotérmica

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos mediante el calorímetro isotérmico. Al igual que para el caso anterior, se analizará la influencia de la relación a/c, del contenido de cal, de sus características, etc. Antes de proseguir con el análisis se muestran dos gráficos representativos de las curvas de calor de hidratación de un Cemento Portland tipo I 52,5R con una relación a/c de 0,45 (figura 4.30) y del mismo cemento con una adición de cal del 14% (figura 4.31). Se observan distintos comportamientos, tanto entre ambas curvas, como para las curvas obtenidas para el ensayo de temperatura de hidratación del apartado anterior. Como diferencia más significativa se destaca la aparición de tres picos que quedarían enmarcados durante al período de inducción de la curva de calor del cemento.

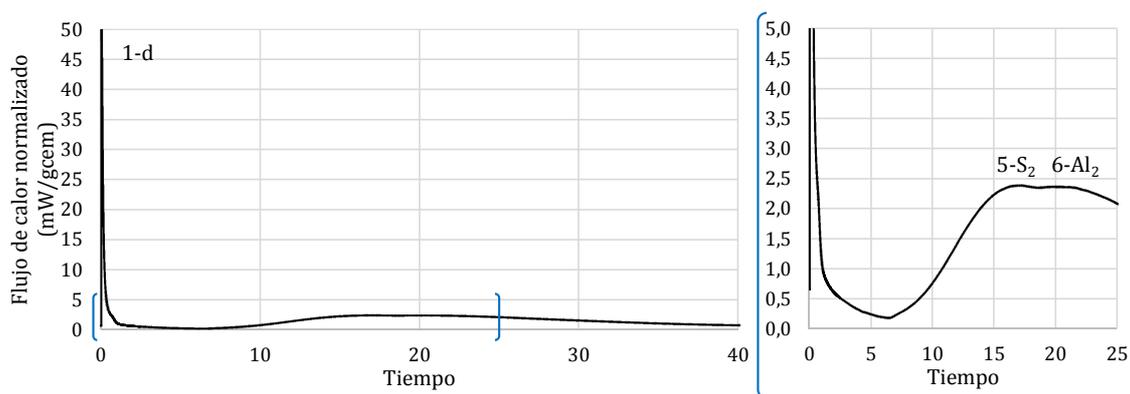


Figura 4. 30 – Puntos significativos en las curvas de calor de hidratación de pastas de cemento (a/c 0,45 y CEM 52,5R)

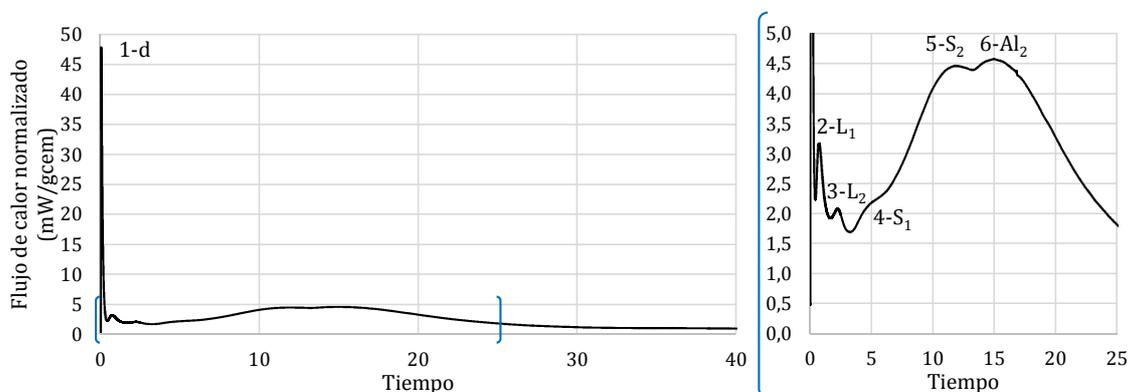


Figura 4. 31 – Puntos significativos en las curvas de calor de hidratación de pastas de cemento y cal (a/c 0,45, CEM 52,5R y cal B2Ad-14%)

En relación con las curvas de calor de hidratación mostradas en las figuras 4.30 y 4.31, se procederá a definir cada uno de los picos que han sido identificados. Estos se define por sus coordenadas X (tiempo) e Y (flujo de calor) cuyos valores serán los que se analizarán en los siguientes apartados.

- Pico 1-d: aparece en todas las dosificaciones ensayadas y corresponde con el primer pico de la curva de hidratación del cemento. Es el pico de mayor intensidad y puede atribuirse a la rápida disolución en el medio líquido de todas las fases presentes.

- Pico 2-L<sub>1</sub>: aparece en la mayoría de las dosificaciones y corresponde con el segundo pico de la curva de flujo de calor. Este se muestra de distintas maneras para cada una de las dosificaciones, es decir, en algunos casos se observa como un simple cambio de pendiente en la recta de descenso de calor del pico 1-d, mientras que en otros casos se marca claramente un pico.
- Pico 3-L<sub>2</sub>: aparece en todas las dosificaciones con cal analizadas y corresponde con el tercer pico de la curva de flujo de calor. Este pico se sitúa aproximadamente al inicio del período durmiente.
- Pico 4-S<sub>1</sub>: se da, de manera generalizada, en las pastas con adición de cal, pero no para todos los casos. Cabe destacar que este pico se aprecia en la bibliografía para muestras de cemento sin adición de cal, como es el caso del estudio realizado por Makar *et al* (Makar & Chan, 2008). En este estudio dicho pico se relaciona con el C<sub>4</sub>AF y se observa que al aumentar la presencia de este compuesto en un cemento dicho pico se retarda y disminuye su intensidad. Para los resultados obtenidos no se ha observado este pico para las pastas de referencia.
- Pico 5-S<sub>2</sub>: aparece en todas las dosificaciones analizadas y corresponde con el quinto pico de la curva de calor de hidratación. Este se sitúa la final del período de aceleración de la curva de hidratación del cemento y, al estar presente en todos los casos, puede atribuirse a la hidratación de los silicatos presentes en el cemento.
- Pico 6-A<sub>2</sub>: existe en todos los casos para todos los porcentajes cal y relaciones a/c. El pico observado se da a continuación del pico 5-S<sub>2</sub> lo que podría corresponder con el segundo pico de hidratación de los aluminatos.

Para el análisis de las variables se estudiarán los picos 3, 5 y 6. Los picos 5 y 6 son los más representativos de la curva de hidratación de las distintas pastas, ya que su presencia se da para todas las dosificaciones. Por otra parte, el pico 3, aunque solo existe en las pastas con adición de cal, es el que presenta una forma cuyos valores son más fáciles de determinar que los anteriores. Por otra parte, no se ha tomado como referencia el pico de disolución (1-d), debido a que es el primer pico posterior al mezclado y, al haberse realizado la mezcla de la masa fuera del recipiente de medición, los valores de dicho pico podrían no ser del todo coherentes. Cabe recordar que el tiempo de mezclado fue de 2 minutos, tiempo durante el cual no se pudo medir el calor de disolución generado.

#### 4.6.1 Influencia del contenido de cal

En las figuras de este apartado se muestran los valores obtenidos con las pastas de cemento y cal para cada uno de los porcentajes usados. Así mismo, en cada uno de los gráficos se muestra la influencia del aumento de cal para cada una de las 5 cales usadas y, dentro de estas, para cada ratio a/c. De esta manera se da una visión global de la influencia de esta variable para todas las dosificaciones realizadas.

En los gráficos de las figuras 4.32 y 4.33 se muestran los valores de flujo de calor y tiempo, respectivamente, obtenidos para el pico 3-L<sub>2</sub>. En el caso del flujo de calor generado, al aumentar el porcentaje de cal, se observan distintas tendencias que varían en función del tipo de cal y de la relación a/c. En primer lugar hay que mencionar que no se da una tendencia igual para todos los grupos de cales. Con grupos se refiere a las dosificaciones realizadas con la misma cal, pero con

distintos porcentajes añadidos de esta, para cada una de las relaciones a/c estudiadas. Así por ejemplo, en el caso de las pastas con la cal A1Na se observa una tendencia ascendente de la temperatura para las relaciones a/c de 0,35 y 0,45, mientras que en el caso de la relación a/c de 0,60 es la pasta con el 4% de adición es la que presenta un valor mayor de temperatura. Para el resto de las pastas se dan tendencias parecidas, pero no para las mismas variables, así tenemos que para las pastas con la cal B2Ad y con una relación a/c de 0,35 la temperatura desciende al aumentar el porcentaje de cal añadido. Con base en estos resultados puede argumentarse que la influencia del aumento del contenido de cal genera distintos comportamientos en función del tipo de cal usado.

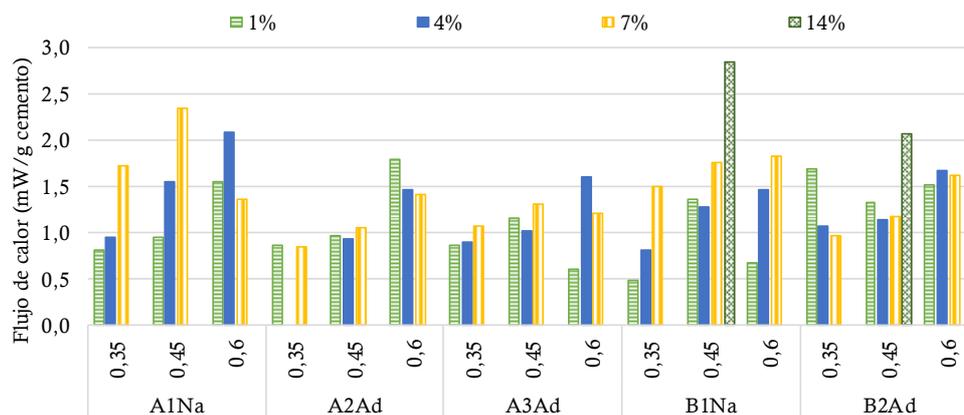


Figura 4.32 – Influencia del porcentaje de cal en el flujo de calor para todas las pastas en el pico 3-L2

En el caso de los tiempos se da el mismo fenómeno, aunque para las dosificaciones con las cales A3Ad y B2Ad la tendencia resulta en un aumento del tiempo con el aumento del porcentaje de cal, no se puede extender esta tendencia al resto de dosificaciones. Para el caso específico del pico 3 la influencia de la adición de cal es intrínseca al tipo de cal usada en la mezcla y no tanto a la adición de cal. Es por esto que resulta complicado obtener un razonamiento por el cual se está dando este fenómeno.

Los resultados obtenidos para los tiempos en el pico 3-L2 tampoco presentan una tendencia clara. A grandes rasgos se observa que las pastas realizadas con las cales A1Na y B1Na (no aditivadas) tienden a reducir el tiempo en que se da el pico a medida que aumenta el porcentaje de cal añadido, mientras que para el resto de las cales esta tendencia se invierte. En estas pastas se observa que el aumento del contenido de cal deriva en un aumento del tiempo en que se da el pico. Finalmente, cabe destacar que para el pico 3-L2 el aumento del contenido de cal en las pastas genera distintos comportamientos, por lo que resulta complicado exponer un razonamiento general de efecto de esta variable.

Otro caso distinto es el que se da para los picos 5-S2 y 6-Al2, en los que sí se puede observar una tendencia generalizada. Para este análisis, se muestran únicamente los resultados del pico 5-S2, ya que son representativos de ambos. En cuanto al flujo de calor, el aumento del porcentaje de cal añadido genera un aumento del calor en este pico.

La adición de cal a la mezcla, cuya disolución se ha estado dando desde el inicio del mezclado, ha generado pastas en las que ha desaparecido el período durmiente dando lugar a un aumento de las reacciones durante este período de tiempo. En un cemento sin adición de cal, durante el período durmiente, se produce una disolución muy lenta de las fases del cemento. De acuerdo con la bibliografía, este período termina al saturarse el medio de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$  e iniciarse la precipitación

de portlandita. En la figura 4.34 se presentan las curvas de calor de hidratación y de la evolución del nivel de iones  $\text{Ca}^{2+}$  en la disolución (Hewlett et al., 2004). En esta figura se observa como la finalización del período durmiente se da cuando el nivel de iones calcio alcanza un punto de saturación y empieza a descender. Al añadir cal al cemento, esta contribuye a saturar el medio con iones calcio e hidróxido en un período inferior de tiempo, además de camuflar el período durmiente del cemento por las reacciones de disolución del  $\text{CaO}$ .

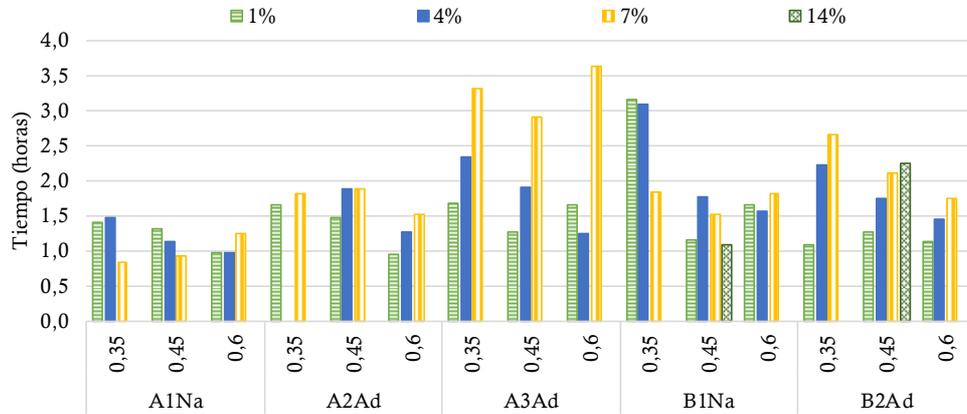


Figura 4. 33 – Influencia del porcentaje de cal en el tiempo para todas las pastas en el pico 3-L2

En el caso de un cemento sin cal son los silicatos los que generan los iones calcio e hidróxido, mientras que en una pasta de cemento y cal, es esta última la que reacciona más rápidamente y satura el medio antes. En estas pastas mixtas, el aporte de iones por parte de los silicatos es menos importante para la saturación del medio, y dado que la disolución del  $\text{CaO}$  es más rápida, puede llegar a inhibir la disolución de los primeros. Es por este motivo, que al reaccionar los silicatos más tarde, y no ser necesarios para saturar el medio, su reacción, una vez finalizada la etapa durmiente, será mayor y generará mayor cantidad de calor.

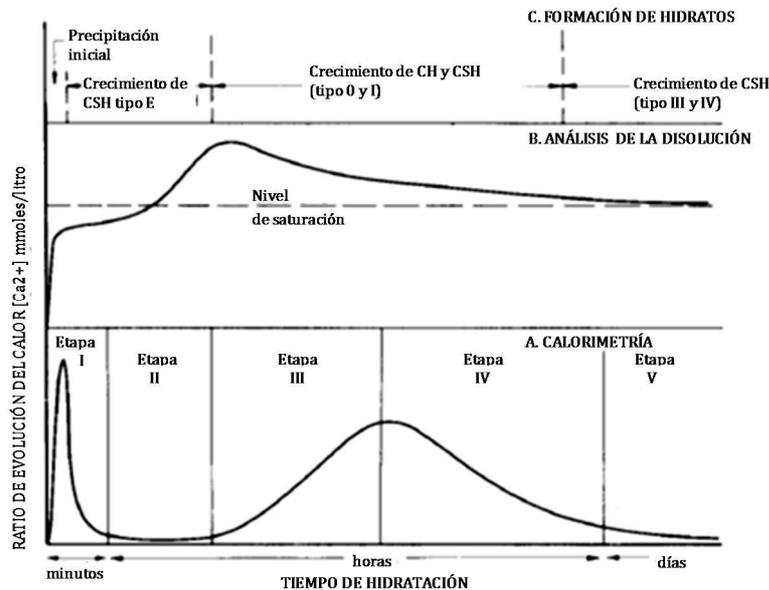


Figura 4. 34 – Relación entre la saturación del medio de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y el final del período durmiente de la curva de hidratación del cemento

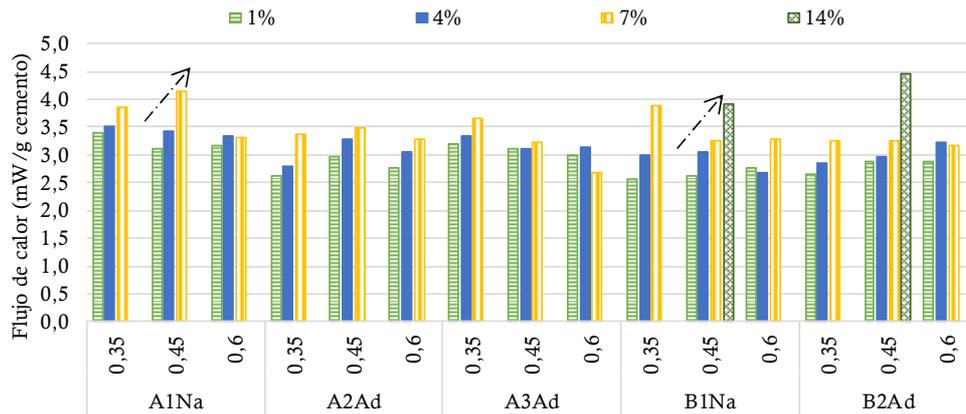


Figura 4. 35 – Influencia del porcentaje de cal en el flujo de calor para todas las pastas en el pico 5-S<sub>2</sub>

En el caso del tiempo, se observa una disminución de los valores a medida que aumenta el porcentaje de cal añadido. La adición de cal hace desaparecer la etapa durmiente del cemento. Esto se debe a que alrededor de las partículas del cemento se crea una capa de fases neo formadas que evitan la disolución del grano (Hewlett et al., 2004; Mehta & Monteiro, 2006; Mindess et al., 2003), y no es hasta el final del período durmiente que se alcanza el contenido máximo de iones calcio en el medio y se inicia el período de aceleración, tal como se ha visto en la figura 4.34. Al añadir cal a la mezcla adelantamos el pico de saturación del medio frente al  $\text{Ca}^{2+}$ , por lo que el resto del proceso de hidratación de la pasta se adelantará.

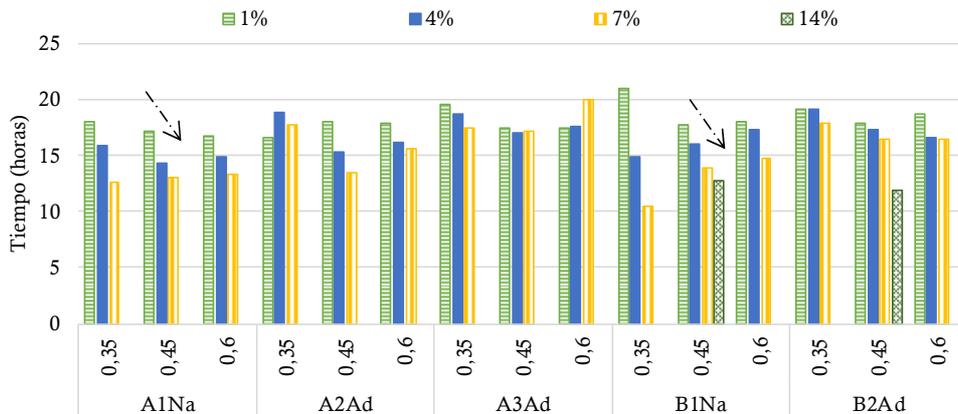


Figura 4. 36 – Influencia del porcentaje de cal en el tiempo para todas las pastas en el pico 5-S<sub>2</sub>

#### 4.6.2 Influencia de la finura de la cal o superficie específica (BET)

Los valores del ensayo BET para las cales A2Ad y A3Ad se han mostrado en la tabla 4.1, ambas presentan la misma composición pero valores de superficie específica distintos. Para este ensayo se observa que la cal con mayor superficie específica es la que obtiene valores de calor ligeramente superiores (figura 4.37). En este caso, al tener una cal más fina, se facilita la hidratación de esta, lo que produce una hidratación más rápida. Por otra parte, se observa que para la relación a/c de 0,45 se suelen obtener valores mayores de temperatura independientemente del porcentaje de cal añadido.

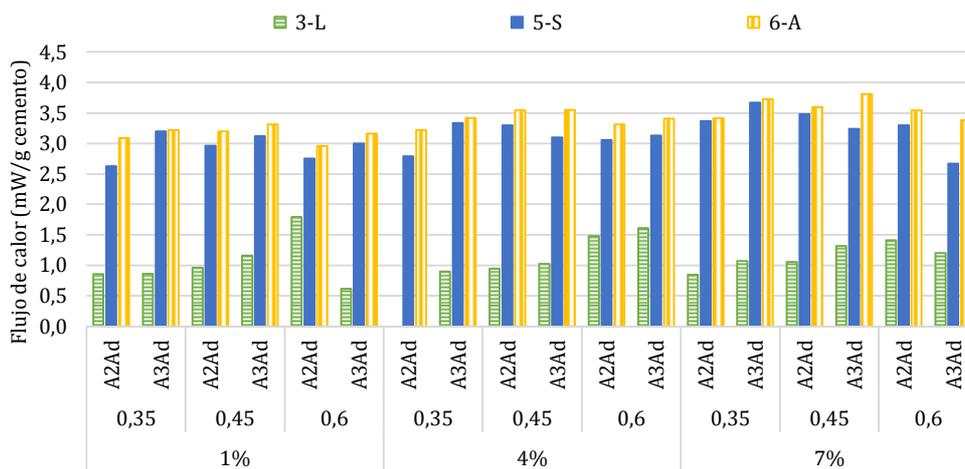


Figura 4. 37 – Influencia de la finura de la cal en el flujo de calor para las cales A2Ad y A3Ad en los picos 3-L<sub>2</sub>, 5-S<sub>2</sub> y 6-A<sub>2</sub>

En relación con los tiempos (figura 4.38) se observa que la cal A3Ad alcanza los picos en un tiempo inferior para el menor porcentaje de cal y, en todos los casos, para la menor relación a/c. En cambio, para los mayores porcentajes de cal y para las dosificaciones de 0,45 y 0,60 se invierte la tendencia. Este fenómeno puede deberse al aumento del contenido de cal juntamente con el aumento del calor específico de la mezcla, lo que permitiría que una mayor cantidad de material se hidrate, pero dado que existe también mayor cantidad de agua en el medio, retrasaría el pico. Por otra parte, la presencia del aditivo, en el caso de las cales más finas, podría liberarse con mayor facilidad produciendo el retraso y la liberación de menos calor. El efecto del aditivo se observa más claramente con el aumento de la presencia del agua, lo que facilitaría su disolución.

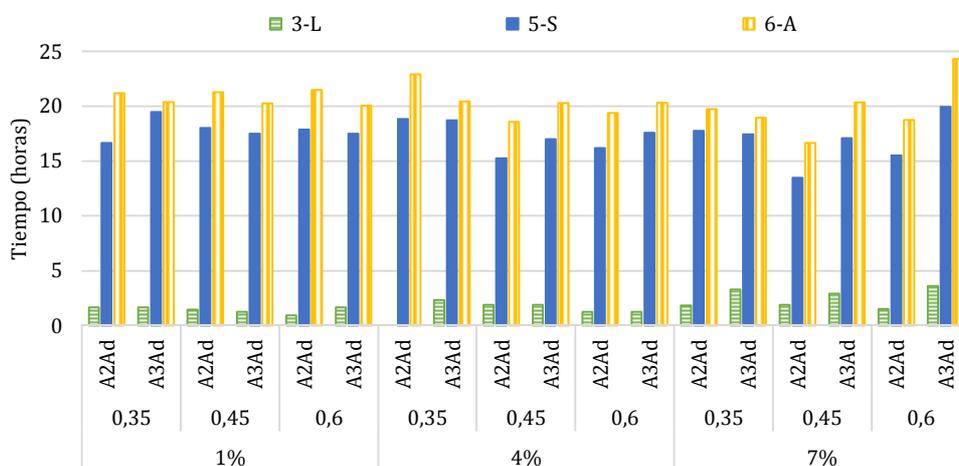


Figura 4. 38 – Influencia de la finura de la cal en los tiempos para las cales A2Ad y A3Ad en los picos 3-L<sub>2</sub>, 5-S<sub>2</sub> y 6-A<sub>2</sub>

### 4.6.3 Influencia de la aditivación de la cal

En este caso se compararán las dosificaciones realizadas con las cales A1Na y A2Ad, y por otra parte con las cales B1Na y B2Ad. En la figura 4.39 se muestran los valores de flujo de calor obtenidos en función del porcentaje de cal y de la relación a/c. Se observa que en todos los casos se obtienen valores inferiores de calor para la dosificación con la cal aditivada (A2Ad). En este caso los resultados son consistentes con los obtenidos en el ensayo de temperatura semiadiabática.

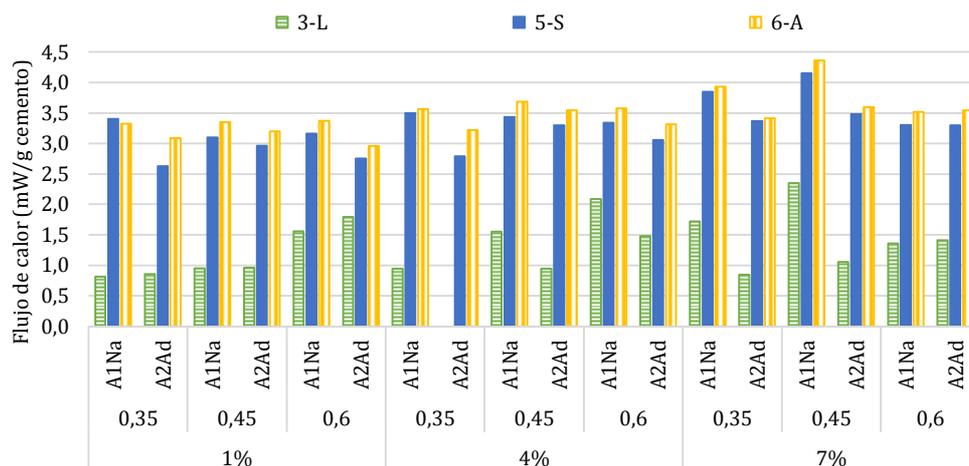


Figura 4.39 - Influencia de la aditivación de la cal en el flujo de calor para las cales A1Na y A2Ad en los picos 3-L<sub>2</sub>, 5-S<sub>2</sub> y 6-A<sub>2</sub>

Por otra parte, en la figura 4.40 se muestran los tiempos en que se alcanzan los valores de calor mostrados en el gráfico anterior. En este caso, es la cal aditivada la que obtiene mayores valores de tiempo debido principalmente al efecto retardante en la disolución de los componentes que retrasa la saturación de medio y la precipitación de las fases neo formadas.

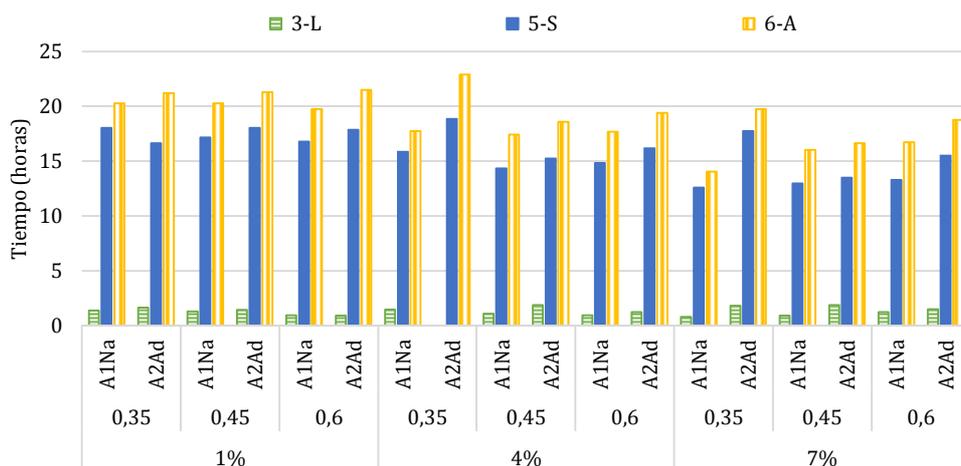


Figura 4.40 - Influencia de la aditivación de la cal en los tiempos para las cales A1Na y A2Ad en los picos 3-L<sub>2</sub>, 5-S<sub>2</sub> y 6-A<sub>2</sub>

En las figuras 4.41 y 4.42 se muestran los valores de flujo de calor y tiempo, respectivamente, para las dosificaciones con las cales B1Na y B2Ad. En este caso se observa un comportamiento distinto en función de la relación a/c. Para la relación de 0,35 se dan valores mayores de calor para la cal B1Na, mientras que para las relaciones 0,45 y 0,60 es la cal B2Ad la que obtiene valores superiores. Esto puede deberse a que con la menor relación a/c se hidrata menor cantidad de cal B2Ad debido al efecto retardante, lo que podría implicar que quedan restos de cal sin hidratar. Otro dato a tener en cuenta es el valor de la superficie específica para ambas cales. En el caso de la cal B1Na este valor es de 2,12m<sup>2</sup>/g, mientras que para la cal B2Ad su valor asciende a 2,55m<sup>2</sup>/g. Esto podría dar lugar a la diferencia en el comportamiento de las pastas al compararlas con las cales A en las que la cal con mayor superficie específica es la que no está aditivada (A1Na), además, la diferencia entre los valores de ambas cales es mayor para las cales tipo B. Esta inversión de las superficies, junto con el efecto que provoca la aditivación de la cal podría ser la causa de que la pasta con la cal B2Ad sea la que mayor calor alcanza. El aumento de la superficie específica podría contrarrestar el efecto

retardante de la cal y favorecer que, para las mayores relaciones a/c, sean las pastas con cal aditivada las que generen más calor.

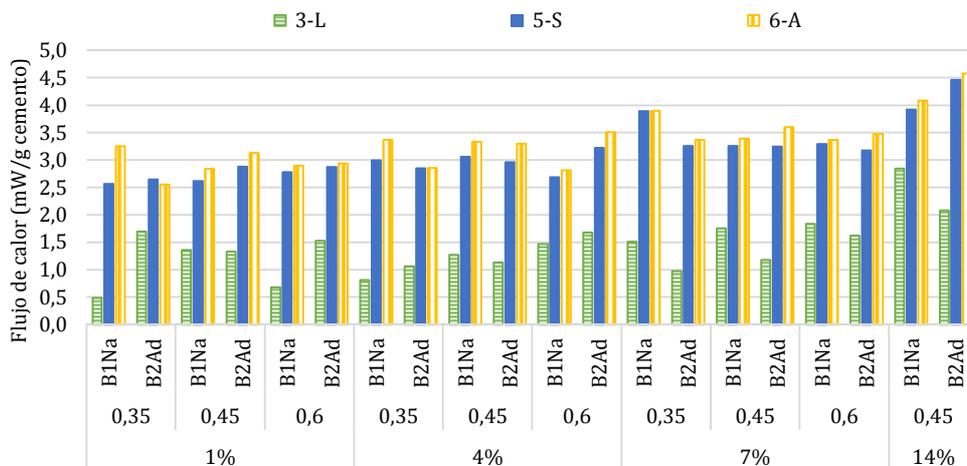


Figura 4. 41 - Influencia de la aditivación de la cal en el flujo de calor para las cales B1Na y B2Ad en los picos 3-L<sub>2</sub>, 5-S<sub>2</sub> y 6

Por otra parte, en el momento en que se aumenta el contenido de agua la cal con retardante sigue teniendo agua para poder hidratarse lo que genera valores mayores de calor para esta cal. Por otra parte, se observa que las cales B1Na con 0,35 de a/c son las que obtienen el valor mayor de calor para los 3 porcentajes de cal estudiados. Esto puede deberse al calor específico de las mezclas, siendo inferior para a relación a/c.

Los tiempos vinculados a los picos de flujo de calor del gráfico anterior muestran un cambio de tendencia a medida que aumenta el porcentaje de cal (figura 4.42). Con el menor porcentaje de adición (1%) se observa muy poca diferencia entre los valores de ambas cales, siendo la diferencia más significativa para la relación a/c de 0,35. En este caso se observa que la cal aditivada (B2Ad) es la que alcanza antes el pico. Para el porcentaje del 4% se invierte la tendencia para el ratio de 0,35 mientras que el resto se mantiene en valores muy similares. En este caso, todos los valores son inferiores a los del 1% de adición. Finalmente se observa que para el 7% de adición es la cal B2Ad la que tarda más en alcanzar el pico de calor, lo que estaría relacionado con el efecto retardante de esta. Para el 14% de adición se obtienen valores similares para ambas cales.



Figura 4. 42 - Influencia de la aditivación de la cal en los tiempos para las cales B1Na y B2Ad en los picos 3-L<sub>2</sub>, 5-S<sub>2</sub> y 6-A<sub>2</sub>

#### 4.6.4 Influencia de la relación a/c

En la figura 4.43 se muestran los resultados de los picos 3-L<sub>2</sub>, 5-S<sub>2</sub> y 6-Al<sub>2</sub> en referencia al flujo de calor. En el caso del pico 3-L<sub>2</sub> se observa que el aumento de la relación a/c está ligado a un aumento en el valor del flujo de calor para todas las dosificaciones a excepción de la realizada con la cal A1Na. Este pico, al estar relacionado con la adición de cal, sigue su reacción durante el período durmiente del cemento, por lo que a mayor cantidad de agua mayores son las reacciones que se dan. Al tener en cuenta que las fases del cemento se encuentran en un período durmiente, la competencia entre las fases de ambos materiales no se estaría dando. Por este motivo, un aumento del contenido de agua producirá una mayor reacción de los materiales.

Por otra parte, el pico 5-S<sub>2</sub> presenta comportamientos distintos para cada una de las dosificaciones al aumentar la relación a/c. En función del tipo de cal usado este pico es máximo para la relación a/c de 0,45, mientras que en otros casos se da un mínimo (CEM) o se observa una tendencia descendente. Para el pico 6-Al<sub>2</sub> suele ser la relación 0,45 la que genera una mayor cantidad de calor con respecto al resto, a excepción de las pastas de cemento y de las realizadas con la cal B1Na. A diferencia del ensayo de calorimetría semiadiabática del apartado anterior, para este ensayo, no se puede determinar una tendencia generalizada de la influencia del aumento de la relación a/c.

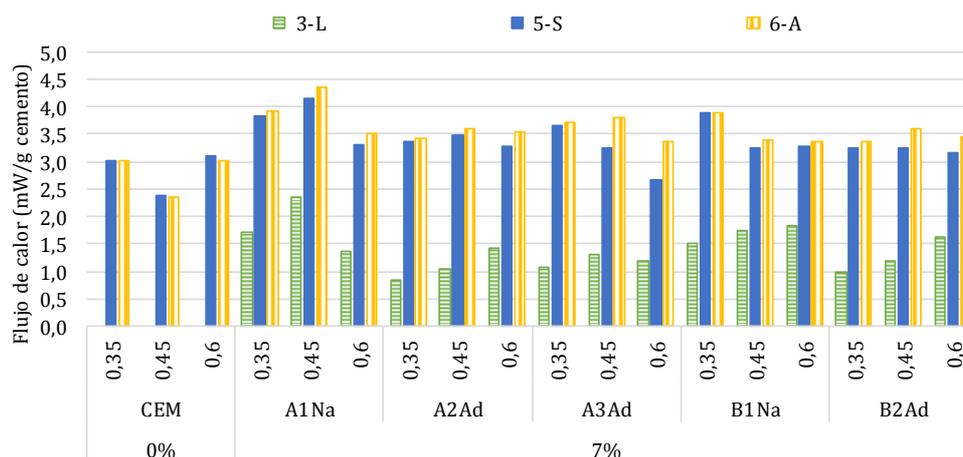


Figura 4. 43 - Influencia de la relación a/c en el flujo de calor para todas las pastas con el 0% y el 7% de adición en los tres picos analizados

En el caso de los tiempos (figura 4.44) se observan también distintos comportamientos en función del pico analizado. Para el pico 3-L<sub>2</sub> se da un aumento del tiempo para las cales A.. Para las pastas amasadas con la cal B se invierte el comportamiento y se observa que el tiempo se reduce a medida que aumenta la relación a/c.

En el pico 5-S<sub>2</sub> se dan comportamientos distintos en función de la cal usada, así, las pastas realizadas con la cal A1Na mantiene aproximadamente los mismos tiempos, siendo algo más lenta para la relación a/c de 0,60. Las cales A2Ad y A3Ad tardan menos en alcanzar el pico para la relación 0,45, lo que puede indicar que esta relación agua/cemento sea un valor óptimo para su hidratación, ya que los valores de calor no modifican la tendencia del conjunto. La cal B1Na aumenta el tiempo con el aumento de la relación a/c y, finalmente, la cal B2Ad presenta la tendencia inversa a la B2Na. Para estas dos últimas cales podría explicarse esta inversión del comportamiento por la variación en el valor de la superficie específica, tal como se ha expuesto para el caso del calor.

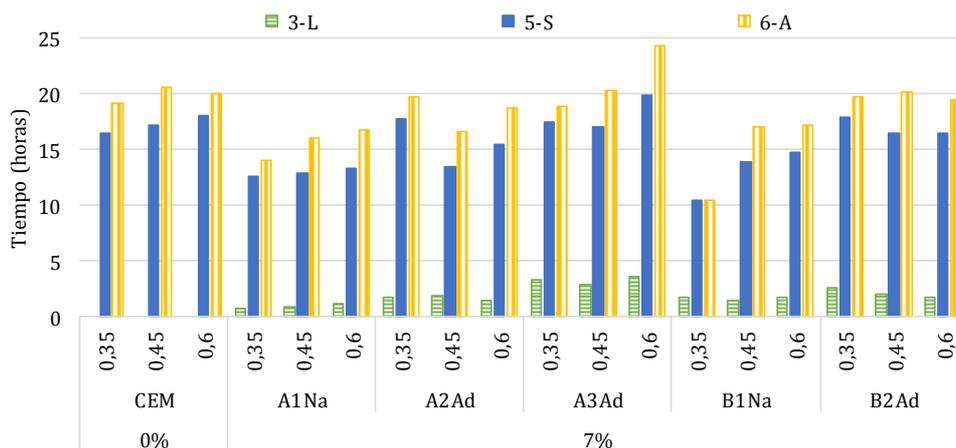


Figura 4. 44 - Influencia de la relación a/c en los tiempos para todas las pastas con el 0% y el 7% de adición en los tres picos analizados

El último pico analizado (6-Al<sub>2</sub>) muestra que el aumento de la relación a/c genera un aumento en los tiempos en que se dan los picos. Cabe destacar que las dosificaciones con las cales (-2Ad) presentan dos comportamientos distintos. En primer lugar, la cal A2Ad obtiene el tiempo menor para la relación a/c de 0,45, siendo esta relación la que tarda más en reaccionar para las pastas con la pasta B2Ad.

#### 4.6.5 Evolución de la energía normalizada

En este apartado se mostrará el efecto que tiene la variación del porcentaje de cal y de la relación a/c mediante las curvas de energía obtenidas. Como ya se ha especificado en el Capítulo 3 los valores de la energía se normalizaron con el propósito de obtener curvas comparables. Las tendencias se analizarán en función de los grupos de cales, siendo estos el grupo de cales A y el B.

En la figura 4.45 se muestran las curvas de evolución de la energía para las dosificaciones con la cal A1Na, siendo esta representativa del resto de cales del grupo A. La figura se divide en tres gráficos que muestran los valores obtenidos para cada una de las relaciones a/c con los 4 porcentajes de cal añadidos. Se observa que en todos los casos el aumento del porcentaje de cal genera mezclas en las que se produce un aumento de la energía a edades más tempranas y de mayor valor acumulado final (flechas azules). La adición de cal genera un aumento de calor en el medio al ser esta altamente exotérmica durante su hidratación, por este motivo la energía aumenta en las primeras edades. Además, la cal genera variaciones en las reacciones a lo largo del tiempo de hidratación de la pasta, ya que las curvas no son paralelas entre sí, sino que la diferencia entre ellas es mayor a medida que avanza la hidratación. Este fenómeno es más visible para la relación de 0,45, mientras que para el resto de relaciones a/c la diferencia entre las curvas es menor.

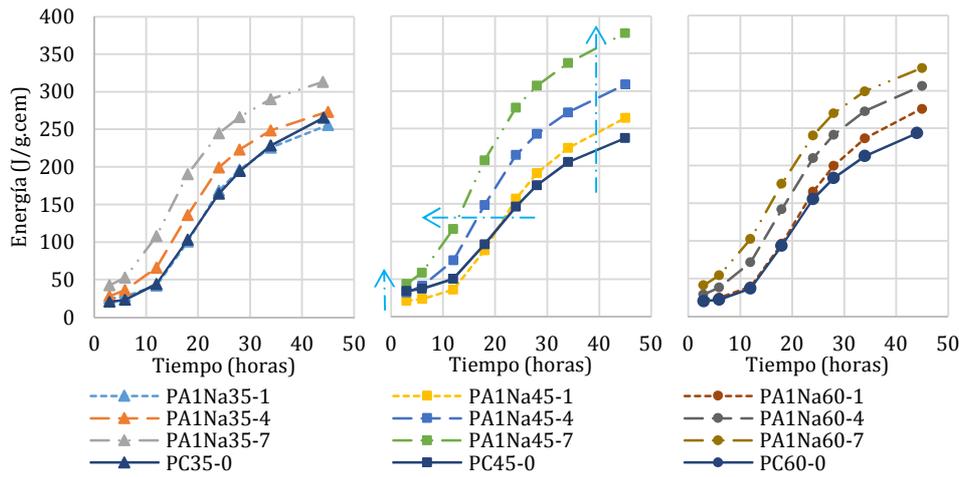


Figura 4. 45 – Evolución de la energía en pastas de cemento con cal A1Na en función del porcentaje de cal

En los gráficos mostrados en la figura 4.45 se observa como para las pastas con la relación a/c de 0,45 se alcanzan valores superiores de energía generada que para el resto de relaciones a/c ensayadas. En ensayos anteriores se ha venido observando que esta misma relación a/c variaba en algunos casos la tendencia general del ensayo, En vista de los resultados mostrados en esta figura se podría argumentar que para la relación a/c 0,45 se da una interacción óptima entre el cemento y la cal. En el caso de la relación a/c de 0,35 se podría estar dando que uno de los materiales (cemento o cal) pudiera estar bloqueando al otro y evitando su hidratación debido a la menor cantidad de agua presente. Por el contrario, al aumentar la relación a/c a 0,60 la mayor cantidad de agua presente permitiría que ambos materiales reaccionasen de manera independiente. Esto se observa en los valores finales de energía alcanzados para la relación a/c de 0,60, que al compararlos con los obtenidos para la relación a/c de 0,35 dan mezclas con valores superiores.

De igual modo que para el caso anterior, en la figura 4.46 se muestran los mismos datos para las cales del grupo B, en este caso para la cal B1Na. Para esta cal se observa el mismo fenómeno que para las anteriores, valores más cercanos en las primeras edades y que van aumentando la diferencia entre ellas a medida que avanza el proceso de hidratación.

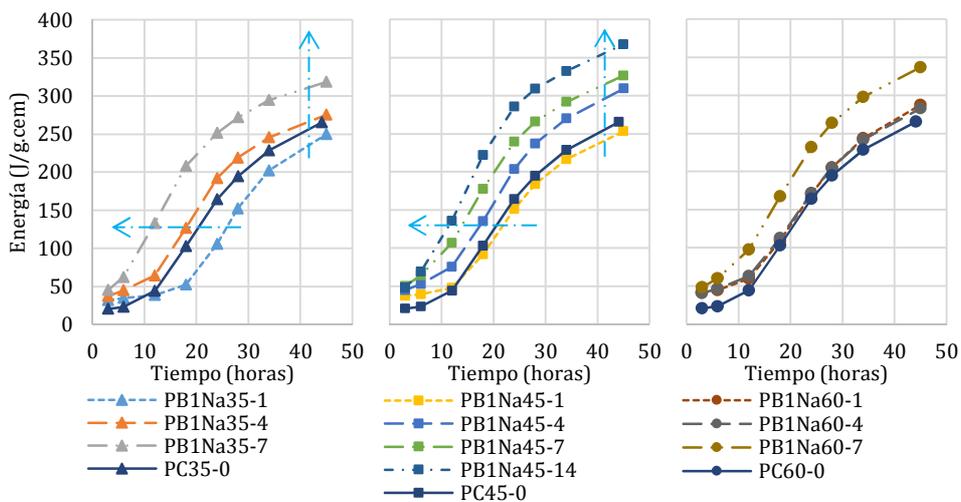


Figura 4. 46 – Evolución de la energía en pastas de cemento con cal B1Na en función del porcentaje de cal

El aumento del porcentaje de cal en las pastas genera valores mayores de energía durante el proceso de hidratación y estos se dan en un tiempo inferior al de la pasta de cemento de referencia. Por otra parte, los menores porcentajes de adición generan curvas muy similares a las del cemento sin cal e incluso llegan a retrasar el proceso de hidratación de la pasta.

A continuación, se muestra la influencia de la relación a/c para los mismos porcentajes de cal, para cada una de las cales analizadas anteriormente. En la figura 4.47 se presentan las mismas curvas de la figura 4.45 agrupadas por contenido de cal. Para los contenidos de cal del 1% se observa que la variación de la relación a/c no genera diferencias entre las curvas obtenidas para los mismos porcentajes de cal, aunque en las dos últimas mediciones (>30horas) se observa que es para la relación a/c de 0,60 para la que se obtiene un valor mayor de energía. Esto se debe a la mayor cantidad de agua disponible para hidratar los materiales presentes. Para la adición de cal del 4% se ve como las relaciones de a/c de 0,45 y 0,60, al tener mayor cantidad de agua disponible, son las que obtienen valores superiores de energía, mientras que para la relación de 0,35 la cantidad material reaccionado es menor. Finalmente, para el 7% de adición de cal se observa que la relación a/c de 0,45 presenta los valores superiores de energía que para el resto de relaciones a/c, seguida de la relación de 0,60. Estos resultados concuerdan con los anteriores en el hecho de que la relación a/c de 0,45 resulta óptima para conseguir una mejor hidratación de las pastas de cemento y cal, es decir, de obtener un mejor balance entre material hidratado y resultados obtenidos en cuanto a calor y tiempo.

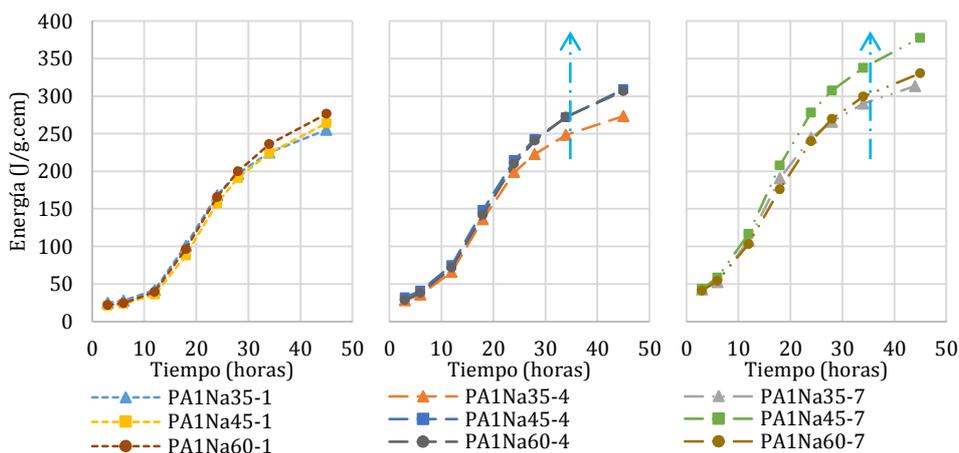


Figura 4. 47 – Evolución de la energía en pastas de cemento con cal A1Na en función de la relación a/c

En la figura 4.48 se muestran las curvas para la cal B1. De manera general se observa el mismo comportamiento que para las cales A, a excepción del gráfico para el menor porcentaje de cal. En este último caso la diferencia entre las curvas se aprecia durante todo el proceso, obteniéndose valores mayores de energía para la mayor relación a/c debido a que esta facilita la hidratación de los materiales presentes, por lo que se libera una mayor cantidad de energía.

Finalmente, se puede apreciar que el aumento de la relación a/c para el porcentaje inferior de cal no genera diferencias significativas para las cales A, pero si para las B. Para las relaciones a/c de 0,45 y 0,60 suelen obtener valores superiores de energía a lo largo de la curva al compararlos con la relación a/c de 0,35. En las últimas edades los valores para 0,35 y 0,60 son muy cercanos entre sí, por lo que de manera global es la relación de a/c de 0,45 la que genera valores mayores de energía en todos los casos... En resumen del ensayo, para la menor relación a/c se puede determinar que la falta de agua presente limita la reacción de los materiales de la mezcla, mientras que la relación a/c

mayor, al tener mayor cantidad de agua, se reduce también proporcionalmente la cantidad de material a reaccionar, por lo que los valores de energía obtenidos serán también menores.

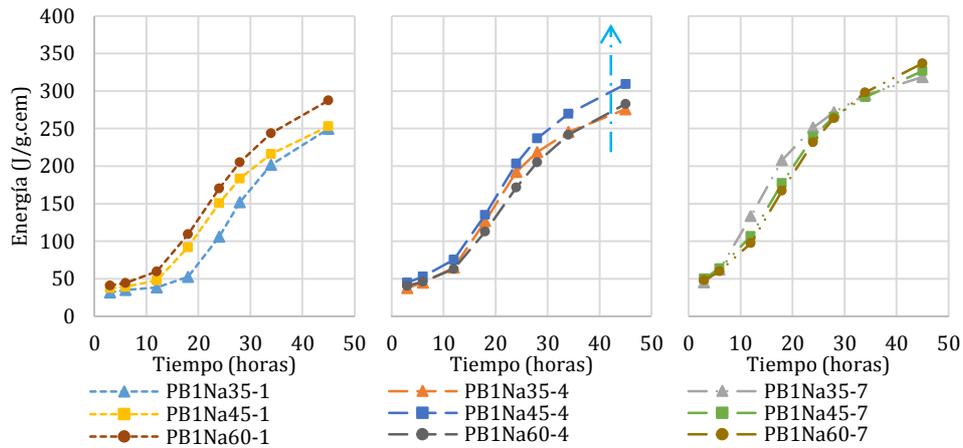


Figura 4.48 - Evolución de la energía en pastas de cemento con cal B1Na en función de la relación a/c

#### 4.7 Difracción de Rayos-X en continuo

Con el objetivo de observar la evolución del proceso de hidratación de las pastas de cemento y de cemento y cal a nivel de cada una de las fases presentes se realizaron ensayos de difracción (DRX) en continuo. La metodología del ensayo y la preparación de las muestras se han definido en el apartado 3.3.4 del Capítulo 3.

En los gráficos que se presentan a continuación se muestran las curvas de evolución de las fases juntamente con la curva de calor de la pasta analizada. Las fases con contenidos inferiores al 1% quedan enmarcadas dentro del error de medición del sistema, por lo que los valores obtenidos pueden no corresponder con la realidad de la muestra. Teniendo en cuenta esta limitación, se han mostrado únicamente aquellas fases cuya curva de disolución o formación de compuestos es coherente con la bibliografía.

Finalmente, cabe destacar que a pesar de que las mediciones fueron realizadas cada 15 minutos, aproximadamente, ha sido necesario descartar las cuatro primeras horas de medición debido a la baja fiabilidad de los datos obtenidos. Al ser un ensayo en continuo, la pasta aún contiene gran cantidad de agua durante las primeras horas, lo que genera una capa entre el material y el kapton (film que cubre y protege la muestra). El proceso de descarte de los datos a edades tempranas ha sido observado también por R. Salvador *et al* (Salvador, Cavalaro, Segura, Figueiredo, & Pérez, 2016) durante el análisis de los resultados de la misma técnica de ensayo.

##### a) Pastas de cemento

En la figura 4.49 se presenta la evolución de las fases del cemento analizadas mediante DRX. En este gráfico se muestran únicamente las fases más importantes para la interpretación de los resultados (alita, etringita, portlandita, óxido de cal, yeso y monosulfato). Existe empero alguna diferencia en la correlación entre las fases y la curva de calor debido a que los ensayos se realizaron con distinta instrumentación.

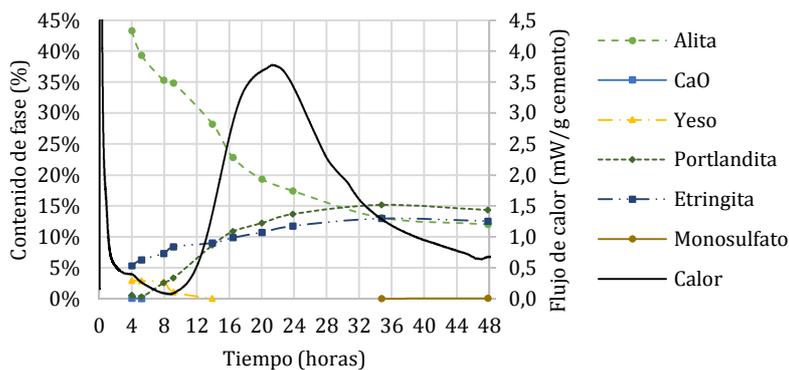
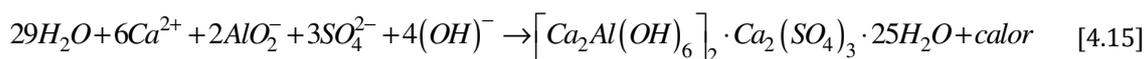
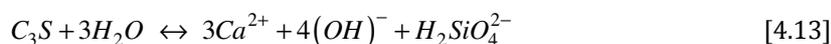


Figura 4. 49 – Evolución de las fases del cemento 52,5R (a/c 0,45) obtenidas mediante el ensayo de DRX

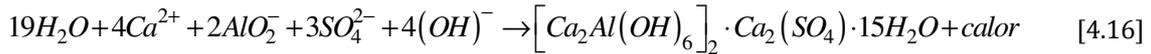
En las primeras etapas posteriores al mezclado se observa que la fase con mayor presencia es la alita (C<sub>3</sub>S) y que se va consumiendo a medida que pasan las horas para dar lugar al C-S-H y al hidróxido cálcico (CH o portlandita). Estos compuestos también se obtienen de la hidratación de la belita (C<sub>2</sub>S). Esta última se encuentra en una proporción muy inferior a la alita y resulta difícil de cuantificar mediante este análisis. Las ecuaciones que definen la formación de CSH y CH a partir de la hidratación de los silicatos son las que se definen en las ecuaciones [4.1] y [4.2]. Así mismo, en esta primera etapa se da la disolución de los aluminatos y de los sulfatos en el medio dando paso a la formación de etringita según la ecuación [4.3].



Durante la fase durmiente de la curva de calor (2h-10h) se observa un descenso en la concentración de alita sin un aumento significativo del calor. En este momento, el medio líquido queda saturado de los iones procedentes de la disolución de las fases y comienza a precipitar el CH. Las fases intervinientes en este proceso se muestran en las ecuaciones [4.4] y [4.5]. Por otra parte, durante este período se observa que ya se ha dado la formación de etringita y su contenido sigue aumentando aproximadamente hasta que se da el pico de mayor intensidad de la curva de calor. La precipitación de la etringita se da según la ecuación [4.6].



Al finalizar la etapa 3 se observa la estabilización de la formación de CH y etringita, así como la fase remanente de alita sin reaccionar. En este análisis las fases que corresponden con el óxido cálcico, los aluminatos y el yeso se encuentran en valores inferiores al 3%. El último compuesto en aparecer es el monosulfato cuya formación es debida a la reacción de la etringita con el aluminato restante debido al agotamiento de sulfatos en el medio con los que reaccionar. La formación de monosulfato se da según la ecuación [4.7].



### b) Pastas de cemento y cal

En las figuras 4.50 y 4.51 se presentan los resultados obtenidos para las dosificaciones con el 7% de cal y la relación a/c de 0,45. Por otra parte, en la figura 4.52 se muestran las dos pastas analizadas con el 14% de cal y la misma relación a/c que las anteriores. En todos los gráficos se muestra los porcentajes de cada una de las fases estudiadas (eje izquierdo), así como la curva de flujo de calor (eje derecho) con respecto al tiempo.

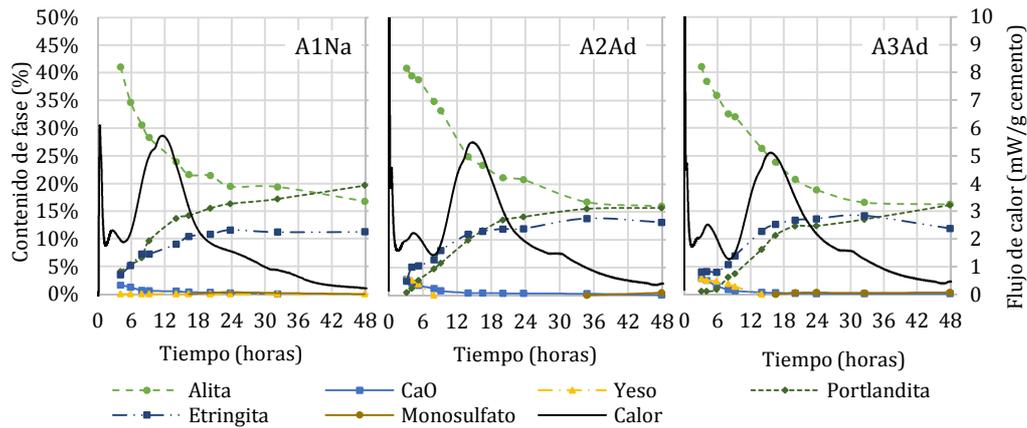


Figura 4. 50 – Evolución de las fases de las pastas de cemento y cal tipo A (7%; a/c 0,45) obtenidas mediante el ensayo de DRX

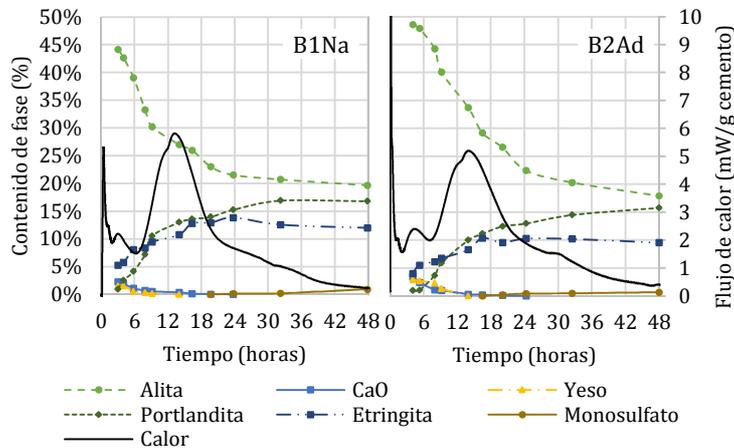


Figura 4. 51 – Evolución de las fases de las pastas de cemento y cal tipo B (7%; a/c 0,45) obtenidas mediante el ensayo de DRX

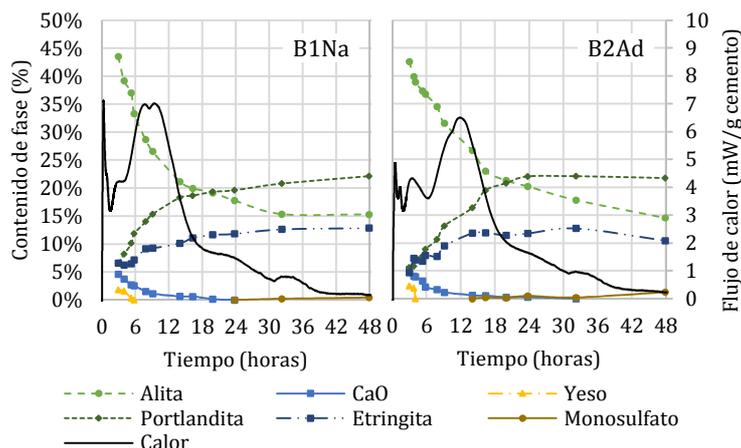


Figura 4. 52 – Evolución de las fases de las pastas de cemento y cal (14%; a/c 0,45) obtenidas mediante el ensayo de DRX

Al comparar las curvas de las figuras 4.50, 4.51 y 4.52 con la del cemento de la figura 4.49 se observa que las tendencias de cada una de las fases es muy similar, por otra parte, existen diferencias en cuanto a los tiempos de formación o disolución de cada una de ellas.

En el caso de las fases que se disuelven, como es el caso de la alita, la cal y el yeso se pueden determinar unos comportamientos generales independientemente del tipo de cal añadido. Así, en el caso de la alita, el porcentaje remanente de esta, a las 48 horas, es mayor al de la pasta de cemento de referencia, es decir, se disuelve menos cantidad de alita en las pastas con adición de cal. Esto puede ser debido a que la disolución de los silicatos (ecuación [4.4]) y del CaO (ecuación [4.8]) generan las mismas fases iónicas, y como consecuencia, se de una sobresaturación del medio líquido.



Por otra parte, para las fases que se forman durante el proceso de hidratación, como son la portlandita, la etringita y el monosulfato también presentan variaciones con respecto a las pastas de cemento. Mientras que los resultados obtenidos para la etringita y el monosulfato no presentan una tendencia clara en función del tipo de cal, la portlandita sí que lo hace, siendo mayor su contenido con el aumento del porcentaje de cal añadido. Los valores de esta fase en las pastas con cal son asimismo mayores a los de la pasta de referencia a las 48 horas del mezclado. Además, se observa que ya en las primeras edades muestran mayores porcentajes de portlandita en las pastas con cal que en la pasta de cemento de referencia.

Esto puede explicarse al tener en cuenta como se forma la portlandita. En el caso del cemento de referencia los iones que darán lugar a la formación de portlandita provienen de la disolución de la alita (ecuación [4.4]), ya que la cantidad de CaO presente en un cemento no es significativa. Esta disolución se da en mayor medida después la etapa durmiente de la curva de hidratación del cemento, por lo que el medio no se encuentra saturado para dar lugar a la precipitación del compuesto. Por el contrario, al añadir CaO a la mezcla se facilita la saturación más temprana del medio con iones calcio e hidróxido y, por consiguiente, la precipitación de portlandita (Nicoleau, Nonat, & Perrey, 2013).

A continuación, se analizará cada una de las variables estudiadas, que para este caso de ensayo son el porcentaje de cal añadido, la aditivación y la superficie específica.

### 4.7.1 Influencia del contenido de cal

El análisis de la influencia del contenido de cal se realizará con respecto a las cales B1 y B2, ya que para este ensayo son las únicas analizadas con distintos porcentajes de cal (7% y 14%). En la figura 4.53 se muestran los gráficos referentes a la evolución de las fases de CaO (4.53a) y de portlandita (4.53b).

En la figura 4.53a se aprecia que la cantidad de cal en la pasta de cemento de referencia es prácticamente inexistente. Por otra parte, puede apreciarse la diferencia entre las pastas que contienen el 7% de adición y las que contienen el 14%. El proceso de disolución de ambos contenidos de cal es el mismo, y consiste en una primera pendiente más marcada, hasta aproximadamente las 8 horas, seguido de una pendiente menos pronunciada hasta su disolución. Cabe destacar que para la dosificación con mayor contenido de cal, el tiempo necesario para disolver esta fase es mayor que para las dosificaciones realizadas con el 7% de adición.

Para ambos porcentajes de cal se observa que el cambio de pendiente se da aproximadamente durante el inicio de la reacción de los silicatos (etapa 3). En este momento del proceso de hidratación se da el aporte de iones calcio e hidróxido por parte de los silicatos, por lo que existirá una competencia con la cal para disolverse.

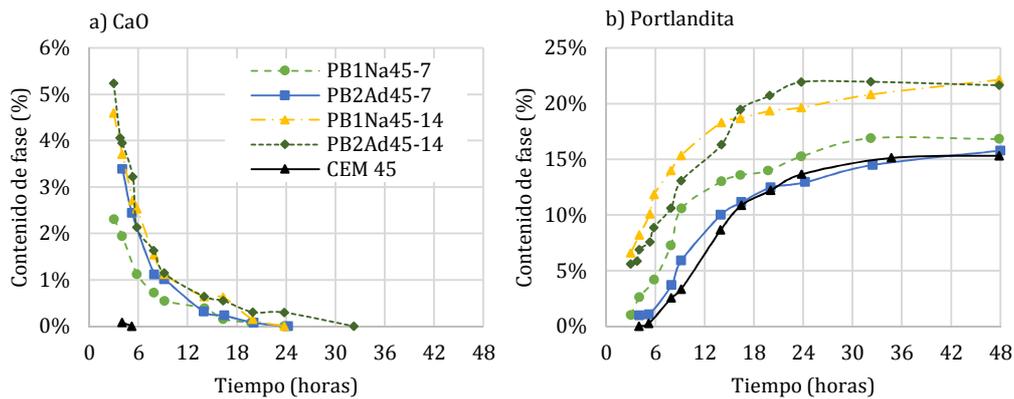


Figura 4. 53 – Evolución de las fases de CaO (a) y de portlandita (b) para las dosificaciones con las cales B1 y B2 para los porcentajes de 7% y 14% de CaO (a/c 0,45) y el patrón

Por otra parte, en el caso de la portlandita (figura 4.53b) se observa que el aporte extra de cal influye en la cantidad final formada de este producto. Es decir, la cantidad formada de portlandita en las dosificaciones con adición de cal es superior a la de la pasta de cemento de referencia. Para este caso, esta última pasta obtiene valores inferiores al resto de dosificaciones realizadas, seguida de las pastas con el 7% de cal y, finalmente, las del 14% de adición en las que se presentan los valores mayores de portlandita a las 48 horas.

Se observa que en las primeras mediciones realizadas las dosificaciones con el 7% de cal obtienen valores porcentuales medidos comprendidos entre el 1 y el 2%, mientras que las dosificaciones con el 14% de adición su contenido asciende hasta el 6-7%. En ambos casos las curvas de formación de portlandita presentan la misma forma y pueden relacionarse con la curva de disolución de la cal.

En la curva de formación de portlandita puede apreciarse también una primera pendiente de rápida formación de esta fase, seguida de una ralentización. La primera pendiente transcurre desde el inicio de la medición hasta las 10-12 horas, que corresponde aproximadamente con el

período de disolución de los silicatos y con la ralentización de la disolución de la cal. Hay que tener en cuenta que, en este momento de ralentización de la curva, interviene también otro factor importante como es la falta de agua libre, por lo que la cantidad de reacciones que se dan se ven reducidas al no disponer de agua para su hidratación.

En la figura 4.54 se muestra la evolución de las fases de alita (a) y etringita (b) para las cales tipo B con los contenidos del 7% y del 14%. Tal como se observa, los niveles iniciales del contenido de alita son cercanos para todas las dosificaciones, lo que es coherente dado que esta fase proviene únicamente en el cemento.

La adición de cal en las pastas de cemento genera un comportamiento similar a largo plazo, pero con matices en las primeras edades de medición para cada una de las pastas con adición de cal analizadas con respecto a la pasta de cemento de referencia. Se observa que a mayor contenido de cal añadida más rápida se da la disolución de la alita y el valor remanente a las 48 horas es menor.

En las primeras 16-18 horas de la curva se da una disolución más rápida de la alita en el caso de las pastas con cal que en la de referencia. Resulta interesante destacar el hecho de que en las dosificaciones con el 7% de adición la curva de disolución de la alita se encuentre por encima o muy cercana a la del cemento durante las primeras 18 horas, mientras que las curvas de las dosificaciones con el 14% de cal siempre se encuentren por debajo. A partir de este momento se da una inversión de la tendencia de forma que la pasta de referencia presenta un menor contenido (más disolución) que en las pastas con adición de cal. Al comparar las curvas de las pastas con cal con la de referencia se observa que los valores de alita remanentes de las dos primeras a las 48 horas se encuentran por encima de la de la pasta de referencia. Según Julliard et al (P. Juilland & Gallucci, 2015) la adición de cal y su transformación en portlandita provoca una inhibición de la disolución de los silicatos, por lo que es coherente que ambas dosificaciones presenten valores superiores de alita al contener mayor porcentaje de portlandita que el cemento.

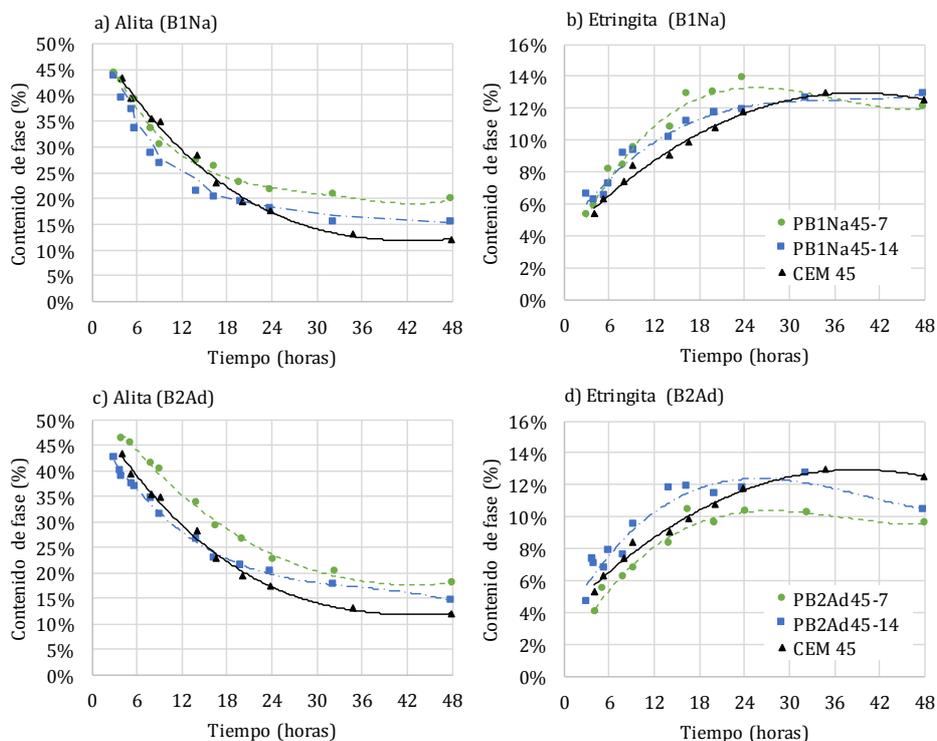


Figura 4. 54 – Evolución de las fases de alita (a y c) y de etringita (b y d) para las dosificaciones con las cales B1 y B2 para los porcentajes de 7% y 14% de CaO (a/c 0,45) y el patrón (CEM 45)

En el caso de la etringita (figura 4.54b) se observa que en todos los casos esta fase existe desde las primeras horas. Al comparar las curvas obtenidas se observa que el incremento del contenido de cal no presenta una tendencia clara en cuanto a la variación de la formación de etringita con el tiempo. Por otra parte, podría determinarse que la influencia en la formación de etringita sea debida a las propiedades intrínsecas del tipo de cal usado en la pasta. Esta diferencia se estudiará posteriormente en el apartado correspondiente (4.7.3. Influencia de la aditivación de la cal). Al observar la influencia del contenido de cal para esta fase, no se intuye ningún comportamiento determinado, aunque se da que las dosificaciones con menor contenido de cal son las que obtienen menores contenidos de etringita en comparación con las que contienen en 14% de adición.

Otro dato significativo a remarcar es el punto de la curva en que la etringita deja de formarse y empieza a decrecer para dar lugar al monosulfato. En ambos gráficos se observa que la pasta de cemento de referencia presenta este punto de cambio de tendencia aproximadamente a las 40 horas del inicio del ensayo, mientras que en las pastas con cal este punto se adelanta hasta las 24 horas. Este descenso de la formación de etringita está ligado al momento de aparición del monosulfato en las pastas de cemento con cal.

Con base en estos resultados se puede determinar que el aumento de cal influye en la formación de portlandita, siendo mayor a la del cemento a medida que aumenta el porcentaje de cal añadido. Por otra parte, su presencia genera modificaciones en la curva de disolución de la alita, acelerando su disolución en las primeras fases y ralentizándola a partir de las 18 horas aproximadamente. Finalmente se ha observado que la curva de formación de etringita también se ve afectada, en este caso empero, los resultados no presentan una tendencia clara en función de la incorporación de cal. Sí que se observa una aceleración del punto donde se da la máxima formación de etringita. Por otra parte la adición de cal no debería variar el contenido final de etringita, ya que este está ligado al contenido de aluminatos que están presentes en el cemento..

#### **4.7.2 Influencia de la finura de la cal**

En este apartado se mostraran los resultados para las dosificaciones con las cales A2Ad y A3Ad. Al igual que para el apartado anterior se mostraran las curvas de las dosificaciones en función de la fase analizada.

En la figura 4.55 se muestran los gráficos referentes a las fases de CaO y portlandita. En el caso de los resultados obtenidos para el CaO se observa que la cal con mayor superficie específica (A3Ad) tiene una disolución ligeramente más rápida a partir de las 12 horas al compararla con la cal A2Ad. Esto puede ser debido a que al ser sus partículas más pequeñas la cantidad de agua necesaria para reaccionar es menor. Si se tiene en cuenta que en ambas curvas, a las 12 horas, se está dando el pico máximo de reacción de los silicatos y por consiguiente la cantidad de agua remanente en el medio es menor que en las etapas anteriores resultará más fácil la reacción con partículas de menor tamaño.

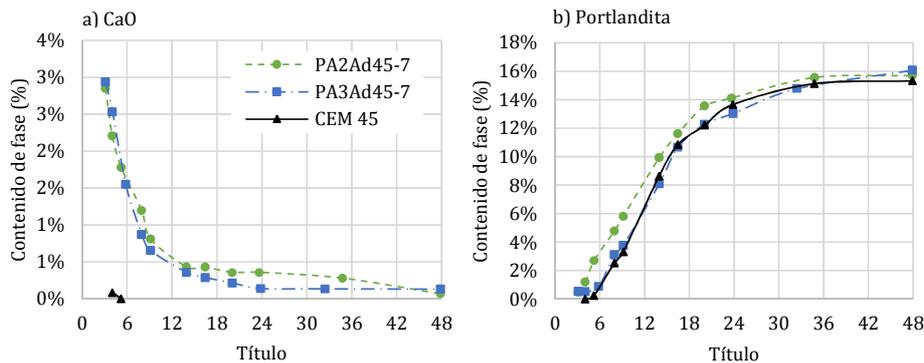


Figura 4. 55 – Evolución de las fases de CaO (a) y de portlandita (b) para las dosificaciones con las cales A2 y A3 para el porcentaje de 7% de CaO (a/c 0,45) y el patrón

Las curvas de formación de portlandita que se presentan en la figura 4.55b muestran que el aumento de la superficie específica (A3Ad) no aporta grandes variaciones con respecto a la cal más gruesa (A2Ad). Se observa que la cal A3Ad no modifica la curva del patrón de referencia del cemento, y únicamente a partir de las 42 horas se observa un leve aumento en el contenido final de portlandita. Por otra parte, es la cal A2Ad, la de menor superficie específica, la que genera una mayor cantidad de portlandita durante todo el período de hidratación, y que iguala el valor de la dosificación con la cal A3Ad a partir de las 42 horas.

En las tres curvas de formación de etringita se observa que los tiempos de aceleración en la formación de esta fase son iguales para las pastas con cal y para la de referencia. Así se ve que a las 18 horas se termina el período de rápida formación de portlandita y se da lugar a un periodo de formación más lenta de esta fase.

En el caso de la alita (figura 4.56a) la variación de la superficie específica no influye significativamente en la disolución de esta fase. Por otra parte, la influencia de la finura de la cal en la formación de etringita es más significativa. Se observa que la dosificación PA3Ad45-7 forma mayor cantidad de etringita hasta las 30 horas del inicio del ensayo, aunque el valor calculado a las 48 horas es inferior a la de la dosificación PA2Ad45-7 e incluso a la de la pasta de referencia. Este fenómeno podría estar indicando que el aumento de la superficie específica favorece la formación de etringita.

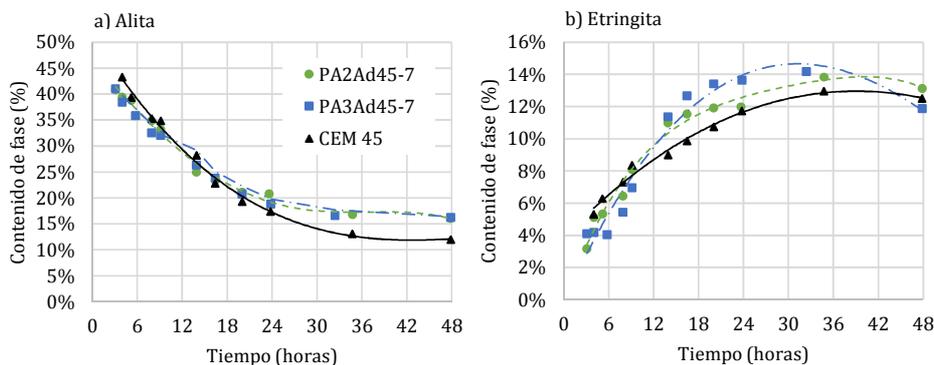


Figura 4. 56 – Evolución de las fases de alita (a) y de etringita (b) para las dosificaciones con las cales A2 y A3 para el porcentaje de 7% de CaO (a/c 0,45) y el patrón

### 4.7.3 Influencia de la aditivación de la cal

La última variable a analizar es la influencia de la aditivación retardante de la cal. En este caso se compararan las cales A1Na y A2Ad y las cales B1Na y B2Ad, tal como se ha hecho en los casos anteriores. De igual manera, se abordará el análisis comparando las curvas obtenidas para cada una de las fases estudiadas. En la figura 4.57 se presentan las curvas obtenidas para el CaO (a) y la portlandita (b).

En el caso del CaO se observa que el valor de esta es mayor en las primeras mediciones en la cal aditivada (A2Ad) con respecto a la que no lo está (A1Na). Este fenómeno se debe al hecho de que el retardante presente evita la rápida disolución de esta fase al entrar en contacto con el agua, por lo que el porcentaje presente de cal anhidra es mayor. A las 48 horas del mezclado se observa que la dosificación PA2Ad45-7 aún presenta un pequeño porcentaje de cal, mientras que para la dosificación PA1Na45-7 la cal se disolvió por completo a las 32 horas.

En el caso de las dosificaciones con las cales B, aunque también se observa que el porcentaje inicial de las pastas con la cal aditivada (B2Ad) es mayor, el proceso de disolución de ambas es igual a partir de las 12 horas aproximadamente. Para este grupo de cales, el efecto retardante influye únicamente durante las 12 horas posteriores al mezclado. Se observa que a diferencia de las cales A, en las cales B la disolución total del óxido de cal se da 8 horas antes para la pasta con la cal no aditivada (-Na) y más de 24 horas antes para la pasta con la cal aditivada (-Ad).

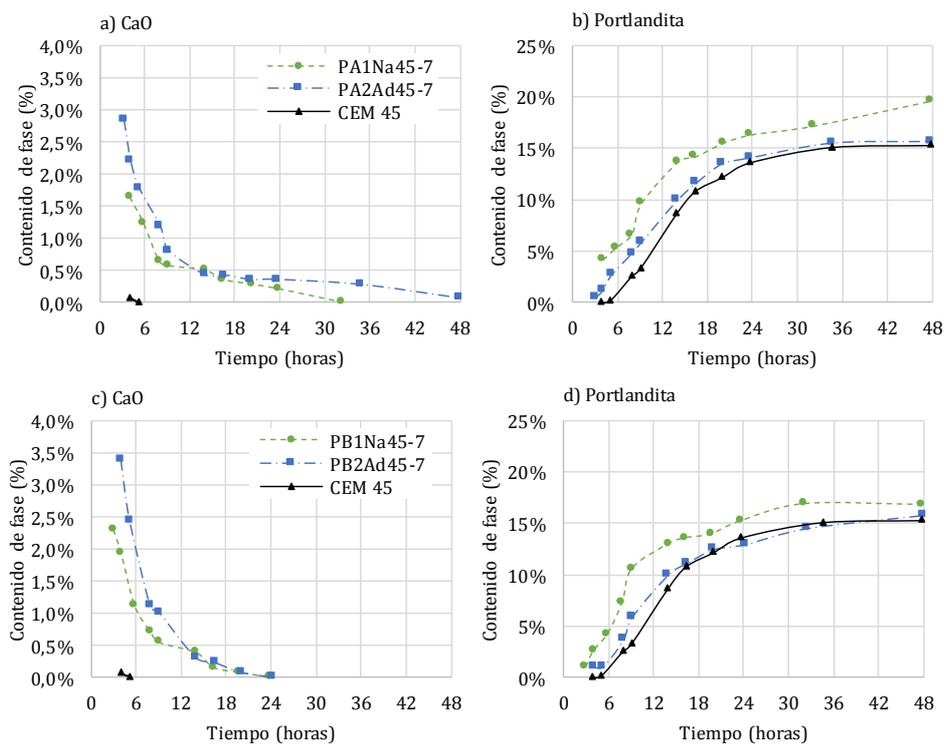


Figura 4. 57 – Evolución de las fases de CaO (a) y de portlandita (b) para las dosificaciones con las cales A1 y A2 para el porcentaje de 7% de CaO (a/c 0,45) y el patrón

En cuanto a la formación de portlandita, el efecto retardante presenta dos comportamientos distintos en función del grupo de cales analizadas aunque el contenido final de esta fase es muy similar para ambos grupos. Para las cales tipo A, es la dosificación con la cal no aditivada (PA1Na45-7) la que forma una mayor cantidad de portlandita, mientras que la que contiene la cal aditivada

presenta unos valores muy cercanos a los del cemento. Por otra parte, en el caso de las cales tipo B se invierte el fenómeno, siendo la dosificación que contiene la cal aditivada (PB2Ad45-7) la que forma una mayor cantidad de portlandita.

En la figura 4.58 se muestran las curvas de contenido de las fases de alita (a) y etringita (b) para 5 dosificaciones. En el caso de la alita (figura 4.58a) se observa que para las cales A y para las B el comportamiento es muy similar. En primer lugar se observa que las dosificaciones con las cales no aditivadas (-Na) permiten que la alita se disuelva más rápidamente que en las dosificaciones con cal aditivada (-Ad). Por otra parte, a partir de un momento determinado, que varía para cada una de las cales (A-20h; B-28h), la velocidad y cantidad de alita disuelta tienden a asimilarse. En este caso, la aditivación no influye aparentemente en el porcentaje final de alita.

Para la formación de etringita la influencia de la aditivación es más significativa y se observa que no se sigue el mismo patrón para ambos grupos de cales. En primer lugar, las cales A muestran que la dosificación PA2Ad45-7 obtiene valores superiores de etringita en comparación con la dosificación de la cal no aditivada (A1Na). En el caso de las cales B este comportamiento se invierte y es la dosificación PB1Na45-7 la que presenta valores superiores. Cabe destacar que al comparar el contenido final de etringita de todas las dosificaciones, las cales B obtienen valores inferiores a los del cemento, al igual que la dosificación con la cal A2Ad, mientras que la cal A1Na presenta un porcentaje final de etringita mayor al del cemento.

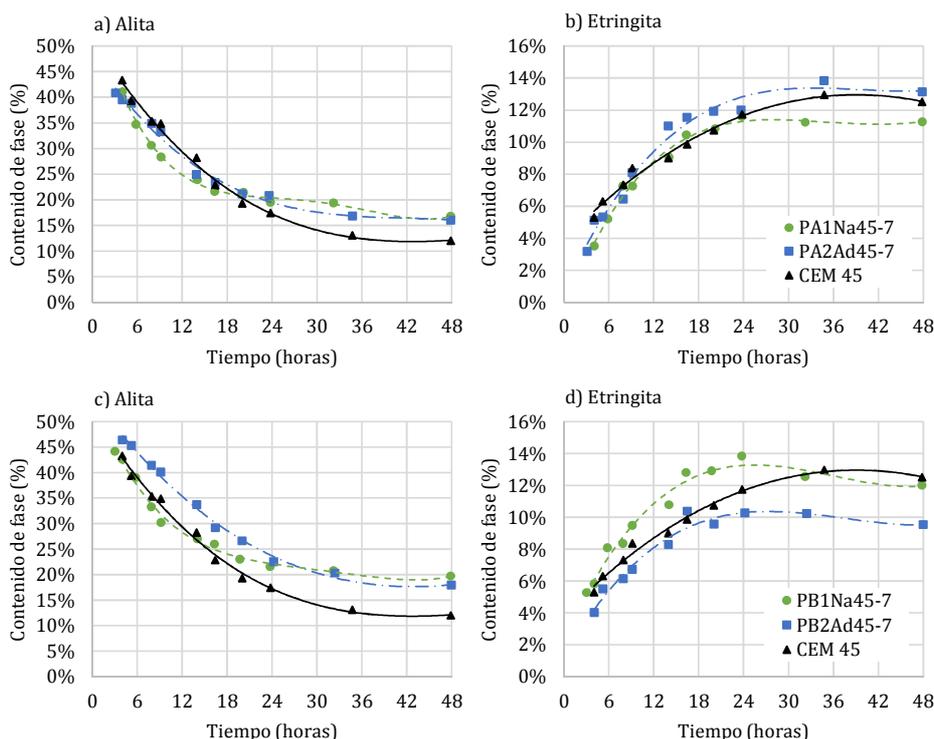


Figura 4. 58 – Evolución de las fases de alita (a) y de etringita (b) para las dosificaciones con las cales A1 y A2 para el porcentaje de 7% de CaO (a/c 0,45) y el patrón

El punto de máxima formación de portlandita se acelera para las cales con adición de cal al compararlas con la del cemento de referencia. Para ambos grupos de cales este punto se da a las 24 horas del inicio del mezclado. La diferencia entre la pasta con la cal A1Na y A2Ad es que esta segunda presenta este pico más tarde (30 horas) al compararla con la pasta con la cal no aditivada (PA1Na45-7). Para este grupo la aditivación permite que se dé una mayor formación de etringita. En las pastas

B la aditivación de la cal no modifica el punto máximo de formación de etringita, únicamente el contenido final remanente de esta fase. Para las cales B la cal A2Ad, aun siendo aditivada presenta una menor superficie específica que la cal no aditivada, por lo que esto contrarrestaría el retraso producido por la aditivación.

## 4.8 Conclusiones parciales

La adición de cal a las pastas de cemento da como resultado una sinergia entre ambos materiales que provoca la modificación de algunos de los parámetros originales de la curva de cemento. Por otra parte, cabe destacar que de las cinco cales analizadas no todas influyen de la misma manera en dichos parámetros, sino que en algunos casos cada una presenta su propio comportamiento. Una vez han sido analizados los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados puede concluirse lo siguiente.

- La curva de calor de hidratación se modifica al añadir cal.

Este fenómeno se observa con más claridad para el ensayo de calorimetría isotérmica. La mayor diferencia observada es la desaparición del período de inducción del cemento, ya que deja de ser un período de baja reactividad y se convierte un período donde continúan las reacciones de hidratación de las fases.

- El calor de hidratación aumenta, por norma general, al añadir cal al cemento.

El aumento de temperatura se ve influenciado por el sistema de fabricación de las cales, ya que como se ha podido observar, para las dos familias de cales usadas el comportamiento de la curva de hidratación varía. Asimismo, las características intrínsecas de las cales también influyen en las variaciones de la curva.

- El aumento de la superficie específica de las cales genera mayores velocidades de hidratación, mientras que los aditivos retardantes de que constan algunas de ellas, retardan efectivamente su comportamiento con respecto a su homóloga sin aditivo. Paralelamente, la reactividad de las cales está relacionada con los aditivos que éstas contienen y no tanto con los valores de superficie específica.
- Los ensayos de caracterización microestructural de pastas de cemento y cal han aportado información con respecto a la evolución del CaO y Ca(OH)<sub>2</sub> en distintos momentos de la hidratación.

Se ha podido determinar que las fases más afectadas por la adición de cal son de manera general la disolución de yeso y de alita y la formación de etringita, a parte del aumento esperado en la fase de portlandita. En el caso de la etringita (figura 4.59a) se ha determinado que la velocidad de disolución del yeso es significativa para su formación. Se ha podido determinar que a diferencia de la pasta de cemento, algunas de las cales dificultan la disolución de esta fase. Por otra parte, los contenidos de etringita se ven afectados y derivan en un menor contenido final de esta fase.

El aumento de las propiedades exotérmicas generadas por el aporte extra de cal reduciría la disolución de la fase yeso y este quedaría absorbido por el CSH. Una vez la temperatura de la mezcla disminuyera este yeso quedaría libre para poder seguir reaccionando con los aluminatos. Esta absorción por parte del CSH de los iones sulfato concuerda con lo observado por Quennoz *et al* (Quennoz & Scrivener, 2013), lo que permitiría que la etringita se continuara formando pero en menor medida para las dosificaciones más exotérmicas. Cabe destacar que la dosificación PA1Na45-

7 es una de las pastas con mayor calor de hidratación y la que menor cantidad de etringita forma, lo que concuerda con la hipótesis planteada.

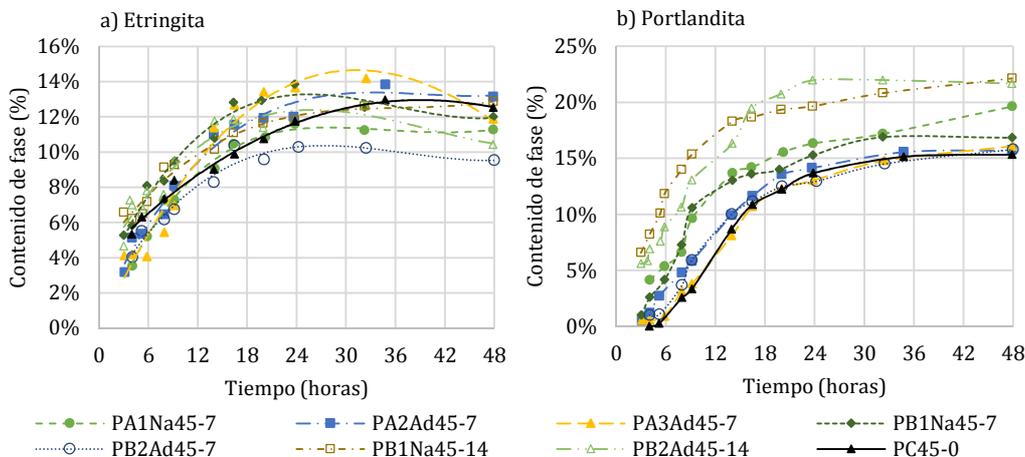


Figura 4. 59 – Gráfico de evolución de las fases (a) etringita y (b) portlandita para todas las dosificaciones estudiadas en DRX

Se corrobora la hipótesis de que un aumento en el contenido de cal genera un aumento en los contenidos finales de portlandita (figura 4.59b). Tal como se observa, las dosificaciones con el 14% de cal añadida son las que obtienen valores mayores de hidróxido cálcico. Otro dato significativo es la cantidad final de alita que se disuelve en las pastas de cemento y cal. En la figura 4.60b se observa que estas pastas disuelven una menor cantidad de alita con respecto a la dosificación patrón. Ya han sido mencionados los estudios llevados a cabo por diversos autores (Garrault et al., 2005; Hewlett & Massazza, 2003; Patrick Juilland et al., 2010) en los que se ha observado la influencia del hidróxido cálcico en la disolución de la alita. En este caso el aumento de esta fase genera un aumento del pH e inhibe la disolución de los sulfatos del cemento. Tal como se ha visto anteriormente los contenidos de portlandita son mayores a los del cemento y la disolución final de alita es menor a la de la pasta de referencia.

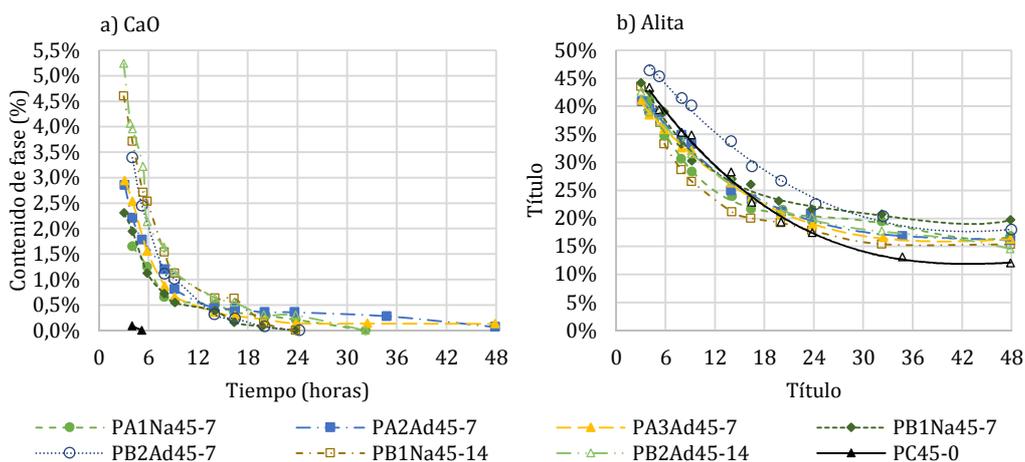


Figura 4. 60 – Gráfico de evolución de las fases (a) CaO y (b) alita para todas las dosificaciones estudiadas en DRX

- Como conclusión final se puede argumentar que la adición de cal en las pastas de cemento tiene, a nivel químico y de durabilidad, una serie de ventajas e inconvenientes.

Las ventajas se basan en la mayor alcalinidad de la muestra generada por el aumento del hidróxido cálcico, lo que permitiría una mayor protección del armado a largo plazo. Por otra parte, algunas de las cales añadidas permiten aumentar el tiempo del inicio de fraguado, lo que facilitaría su transporte y puesta en obra. Esto se da principalmente para el menor porcentaje de cal añadido (1%).

Como desventajas se obtiene la reducción de los tiempos de fraguado para los mayores porcentajes de CaO, que posiblemente generarían mezclas más expansivas (Capítulo 5). En el caso de las fases se ha observado que existe un remanente de silicatos no disueltos en comparación con el patrón que podrían llegar a hidratarse cuando la masa haya endurecido.

#### 4.8.1 Interpretación global de las variables analizadas

En las tablas 4.6 y 4.7 se muestra el resumen de la influencia de cada una de las variables para los ensayos de calorimetría isotérmica y DRX respectivamente. En la primera tabla se resume la influencia del aumento de cada una de las variables para cada uno de los picos estudiados, y dentro de estos el comportamiento frente al flujo de calor y al tiempo.

En la tabla 4.6 se resume el comportamiento de las curvas de calor de hidratación de la siguiente manera. El aumento del contenido de cal genera picos mayores y que se dan en un menor tiempo, lo que implica que, al ser el tiempo de hidratación menor, también lo será el período de trabajabilidad de la mezcla. La superficie específica, de manera general, también tiende a generar picos de mayor calor, pero en este caso el tiempo en que se dan es mayor. Este comportamiento presenta variaciones para los picos 5 y 6. Se puede establecer que durante las primeras horas la premisa anterior es aceptada, mientras que a medida que avanza la hidratación las dosificaciones presentan distintos comportamientos.

El efecto del retardante produce mezclas de menor calor en los picos de las cales tipo A, que a su vez tardan más tiempo en aparecer. Por otra parte, los picos para las cales tipo B muestran distintos comportamientos en cada uno de ellos, por lo que no se puede obtener un comportamiento general basado en las variables analizadas, sino que es la suma de distintos parámetros los que varían las propiedades en cada caso. Hay que tener en cuenta la diferencia en las superficies específicas de las cales B1Na y B2Ad, en las que esta última, aun estando retardada presenta un menor número de Blaine. Esto conlleva a que estas dos propiedades, al sumarse, den pastas cuyas tendencias difieran de las cales tipo A. En las cales B se debe hacer el análisis independiente para cada caso. Finalmente, el aumento de la relación a/c genera mezclas en las que el primer pico de liberación de calor es más elevado, mientras que en los dos siguientes este comportamiento se invierte. En el caso del tiempo, el efecto del retardante se transforma en un aumento en los tiempos de los picos, es decir, la curva de calor se desplaza hacia la derecha.

Pico	Efecto	Contenido de cal	Superficie específica	Retardante		a/c
				(A)	(B)	
3-L <sub>2</sub>	Q	-			Variable	
	t	-			Variable	
5-S <sub>2</sub>	Q		Variable			
	t				Variable	
6-A <sub>2</sub>	Q				Variable	
	t		Variable		Variable	

Tabla 4. 6 - Resumen del comportamiento de las curvas de calorimetría de las mezclas de cemento y cal (a/c 0,45; 7%-14% CaO) frente a las variables estudiadas

Por otra parte, en la tabla 4.7 se muestra igualmente la influencia del aumento de las variables estudiadas, pero en las fases principales presentes en las mezclas, como son la alita, la cal, la portlandita y la etringita. Dicho comportamiento se ha estudiado en tres etapas distintas de la curva de calor de hidratación de las pastas y se han descrito como E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> y E<sub>3</sub>. E<sub>1</sub> abarca el período comprendido entre el inicio del mezclado y hasta las 12 horas aproximadamente, siendo este momento en el que de manera general se inicia el período de aceleración de la reacción de los silicatos. E<sub>2</sub> se inicia a las 12 horas y termina aproximadamente a las 30 horas, siendo este momento el período de desaceleración de la curva de hidratación. Finalmente, E<sub>3</sub> es el período comprendido entre las 30 horas y el final del ensayo.

Fase	Efecto	Contenido de cal			Sup. específica			Retardante		
		E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
Alita C <sub>3</sub> S					=	=	=			
Cal CaO			=		=				=	
Portlandita Ca(OH) <sub>2</sub>					=	=	=			
Etringita C <sub>6</sub> A <sub>3</sub> H <sub>3</sub> 2										

Tabla 4. 7 - Resumen del comportamiento de las fases principales de las mezclas de cemento y cal (a/c 0,45; 7%-14% CaO) frente a las variables estudiadas

El aumento del contenido de cal permite que una mayor cantidad de alita se disuelva y que esto se dé durante todo el proceso de hidratación. La superficie específica de la cal añadida no modifica el efecto en la disolución de la alita y finalmente, el efecto retardante de las cales genera mezclas con mayor contenido remanente de esta fase.

El contenido de cal medido es mayor durante la primera etapa en las pastas con adición de cal que en la de referencia. A partir de este momento los contenidos de cal medidos entre los porcentajes de adición de 7 y 14% se igualan durante toda la etapa 2 (E<sub>2</sub>). Finalmente, para las pastas con el 14% de adición la presencia de cal es mayor a las pastas con el 7%, ya que en estas últimas la cal ya ha quedado totalmente disuelta. La influencia de la superficie específica de la cal se aprecia sobre todo en las dos últimas etapas del proceso de hidratación de las pastas y se observa que las pastas con la cal de mayor superficie específica presenta una mayor disolución. Finalmente, el efecto retardante se observa únicamente durante la primera etapa, siendo mayor el contenido de cal presente para la dosificación con la cal aditivada. En la E<sub>2</sub> ambos contenidos se igualan y se disuelven antes de la E<sub>3</sub>.

La portlandita aumenta su presencia en todas las etapas al aumentar el contenido de cal añadido. En el caso de la superficie específica no se ha identificado una tendencia clara de su influencia. Finalmente, el efecto retardante de las cales genera mezclas con un menor contenido en portlandita al compararla con las dosificaciones de las cales no aditivas.

Finalmente, el parámetro que más influye en la formación de etringita es el tipo de cal usado, así como su contenido. El aumento del contenido de cal tipo A presenta distintos comportamientos a lo largo del proceso de hidratación. Así para E<sub>1</sub> el contenido de etringita formado es mayor, después en E<sub>2</sub> es inferior, por lo que la cantidad total de etringita formada es menor en comparación con la dosificación que contiene menor porcentaje de cal. Finalmente, en la última etapa la dosificación con mayor contenido de cal es la que permanece con un valor mayor de etringita en su estructura. En el caso de las cales B siempre es la de mayor contenido de cal la que forma mayor cantidad de etringita.

En el caso del punto de máxima formación de etringita se ha podido observar que el aumento del contenido de cal adelanta este pico unas 10 horas con respecto a la pasta de cemento sin cal. A partir de este momento la etringita decrece y da lugar a la formación de monosulfato. Cabe destacar que el contenido final de etringita depende en mayor medida del tipo de cal usado en la mezcla que de la cantidad añadida.

El aumento de la superficie específica tiene el comportamiento opuesto al observado para el aumento del porcentaje de cal, es decir, se invierten las tendencias tal como se aprecia en la tabla 4.7. En este caso, tanto al inicio como al final de la curva, los contenidos de etringita son inferiores para la cal más fina, mientras que la cantidad total de etringita formada en el pico máximo es mayor. Finalmente, el efecto retardante genera comportamientos totalmente opuestos en función del tipo de cal usado. Mientras que para las cales A el contenido de etringita es mayor durante todo el proceso de hidratación para la dosificación con la cal aditivada, para las cales B es la dosificación con la cal no aditivada la que forma mayor cantidad de etringita.

#### a) Influencia del contenido de cal

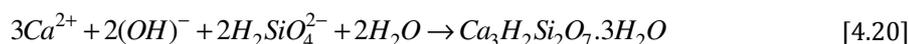
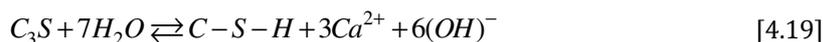
El aumento del porcentaje de cal en las pastas de cemento y cal analizadas genera una serie de modificaciones en el comportamiento observado en las pastas de referencia de cemento para cada uno de los ensayos realizados. En el caso de los tiempos de fraguados se ha observado que el aumento del porcentaje de cal genera un avance en los tiempos de inicio y de final de fraguado, así como una reducción del tiempo del período de fraguado.

Por otra parte, el aumento del contenido de cal genera mezclas más exotérmicas, por lo que los picos de las curvas de calor de hidratación presentan valores superiores a los de la curva de cemento patrón. Por otra parte, estos picos se dan en un tiempo menor a los obtenidos para el cemento. Este comportamiento es acorde al fenómeno observado para los tiempos de fraguado. Cabe destacar que un aumento excesivo del calor de hidratación podría derivar en procesos patológicos no deseados. Como ejemplo puede darse la formación de etringita diferida debido a la absorción del yeso por parte del C-S-H cuando la temperatura de la mezcla alcanza los 65°C. En el momento en que desciende la temperatura este yeso quedaría libre y podría reaccionar con los aluminatos remanentes.

La incorporación de cal conduce a un aumento de la energía liberada durante el proceso de hidratación tal como se ha medido a través del ensayo de calorimetría isotérmica. Esto implica que la adición de cal facilita y aumenta las reacciones iniciales en la pasta y durante las 48 horas medidas del proceso de hidratación, ya que las curvas de energía no son paralelas entre sí, sino que la diferencia entre ellas aumenta a medida que lo hace el porcentaje de cal añadido. Cabe destacar que el aumento de la temperatura de la mezcla potencia las reacciones químicas, con lo que además de la adición de cal, el aumento de temperatura que este produce facilita las reacciones químicas de la mezcla.

Finalmente, y con tal de explicar los fenómenos observados en estos ensayos, se interpretarán los datos obtenidos para el ensayo de difracción de Rayos-X (DRX) para las calces estudiadas con distintos porcentajes de cal (B1Na y B2Ad). En primer lugar cabe destacar que la incorporación de cal en las pastas de cemento genera un aumento del contenido final de Portlandita que varía en función del porcentaje de cal añadido y del tipo de cal analizado. En cuanto a las primeras mediciones se observa que mientras que el valor de portlandita en la pasta de referencia es de un 0% a las 6 horas, las pastas con adición de cal obtienen valores de entre el 3-7% para el 7% de adición, y del 7-11% para el 14% de adición, lo que implica que la cal se disuelve desde el inicio del mezclado.

La disolución de la cal a edades tempranas implica un aumento en la fase líquida de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$ , los mismos que aportan el  $\text{C}_3\text{S}$  (alita) y el  $\text{C}_2\text{S}$  (belita), por lo que existiría una competencia entre ambas fases para disolverse. En este caso, al ser la cal más reactiva que el cemento se espera que sea esta la que tenga mayor facilidad en disolverse y limite la aportación de iones por parte de los silicatos. De esta manera se ha demostrado que este fenómeno puede estar dándose, ya que los valores finales de alita en las pastas con cal son mayores que para la del cemento. Esto implica que hay una menor cantidad de silicatos que llegan a disolverse. En las ecuaciones [4.9] a [4.11] se muestran las fases que intervienen en la disolución de la alita y en la figura 4.61 se muestra una representación gráfica del proceso de hidratación.



Según P. Hewlett *et al* (Hewlett & Massazza, 2003) después de los primeros instantes de mezclado, la velocidad de disolución disminuye debido al aumento del pH provocado por los iones  $\text{OH}^-$ . Por otra parte P. Juilland *et al* (Patrick Juilland et al., 2010) observaron experimentalmente que la concentración de cal en la soluciones es el parámetro principal que controla las características de nucleación de la alita y la belita, hecho también observado por S, Garrault *et al* (Garrault et al., 2005).

En este caso observaron que el ratio de crecimiento del CSH únicamente dependía de la concentración de cal en la solución, además observaron que el ratio de hidratación de los silicatos dependía del crecimiento del CSH, por lo que el contenido de cal influía en la disolución de los silicatos del cemento. En este caso los valores finales de alita podrían explicarse en base a la influencia del aumento del pH que genera el hidróxido cálcico en la disolución de esta fase.

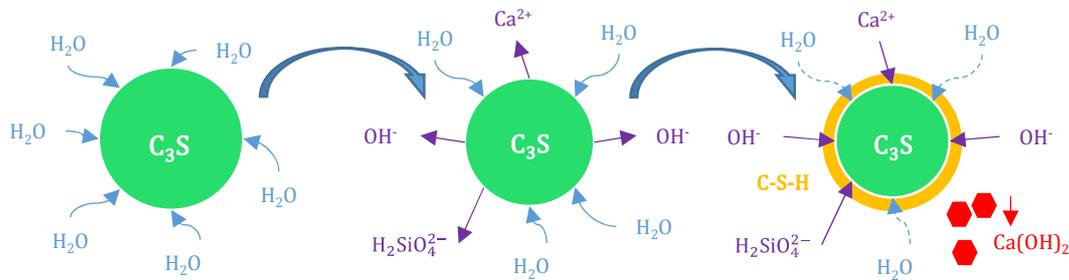
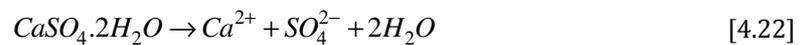
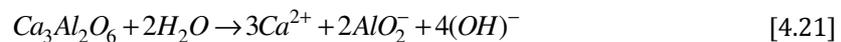


Figura 4. 61 – Proceso de disolución de la alita y de formación de C-S-H y CH

Por otra parte se ha observado que la adición de cal en la mezcla influye significativamente en las curvas de etringita. En el caso específico de las cales analizadas se observa que aunque durante el proceso de hidratación de la pasta existen algunas diferencias en la evolución de los contenidos de etringita para cada uno de los porcentajes de cal añadidos, la cantidad final es prácticamente la misma independientemente del contenido de cal. En las ecuaciones [4.12] a [4.14] se muestran las reacciones de disolución de los aluminatos y sulfatos, así como las reacciones para la formación de etringita. En la figura 4.62 se muestra el esquema de las reacciones de las ecuaciones anteriores.



Según la bibliografía estudiada, la presencia de hidróxido cálcico (portlandita) genera un aumento del pH en la solución, lo que inhibiría la hidratación de los aluminatos (Kirchheim et al., 2009). En este caso se esperaría que el contenido de etringita se mantuviera por debajo del nivel del cemento (patrón) tal como se observa por la dosificación PB245-7.

Se observa que las cales B obtienen un valor de  $\text{SO}_3$  de 2,70% en las cales anhidras (tabla 4.2). El  $\text{SO}_3$  es una medida indirecta de la cantidad de yeso presente en las muestras. En este caso, una mayor cantidad de yeso aportaría más iones sulfato para poder formar etringita. Este aporte es el que podría estar facilitando la formación de etringita en las primeras edades, juntamente con el aporte de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  que genera la cal. En el caso de la cal B1Na con el 7% de adición la reacción es más rápida al no estar aditivada, mientras que la cal B2Ad obtiene valores inferiores de etringita en las primeras mediciones. Esto podría deberse al hecho de que tarda más en reaccionar. Por otra parte, las cales con el mayor contenido de cal (14%) obtienen valores muy similares de contenido de etringita en las primeras edades.

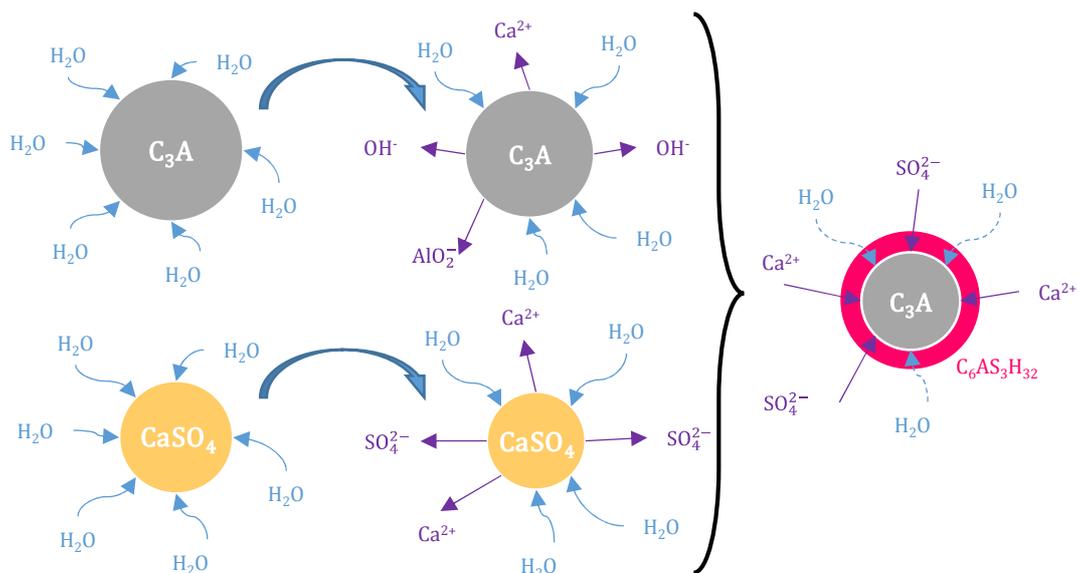


Figura 4. 62 – Proceso de disolución del aluminato tricálcico y los sulfatos y de formación de la etringita

Se podría resumir que, para el caso analizado, el aumento del contenido de cal influye principalmente durante el proceso de hidratación pero no tanto en las cantidades iniciales o finales de etringita formada. Se ha observado que la influencia del contenido de cal no es tan significativo como otras características propias de las cales para este caso.

Finalmente cabe destacar que la presencia de monosulfato está relacionada con el descenso del contenido de etringita. Para esta fase se observa que el aumento del contenido de cal genera dos comportamientos distintos en función del tipo de cal analizado, por lo que no se puede dar una tendencia general en base a los datos analizados. Cabe destacar que únicamente se ha cuantificado la presencia de yeso para las cales B2Ad. De ambas dosificaciones se ha observado que la que contenía un menor porcentaje de cal tardaba más en disolverse, lo que era acorde con los valores de etringita medidos.

#### b) Influencia de la aditivación de la cal

Los tiempos de fraguado varían en función del tipo de cal usado en la dosificación. En primer lugar, se da que los tiempos de inicio de fraguado son menores para las cales no aditivadas (A1Na y B1Na) mientras que para los tiempos de final de fraguado se dan distintos comportamientos. Para las dosificaciones con las cales A se observa que es la cal aditivada es la que alcanza antes el final del fraguado. Este mismo comportamiento se da para los porcentajes del 7% y del 14% para la cal B2Ad. Por otra parte, para los porcentajes menores de las cales B, se alcanza antes el final de fraguado con la cal B1Na.

En el caso de las calorimetrías se ha observado que las cales aditivadas obtienen valores inferiores de calor, mientras que los tiempos son mayores a los obtenidos para las cales sin aditivar (1Na). Lo que es acorde al hecho de que su reacción esté retardada.

Los datos obtenidos para las difracciones varían en función del tipo de cal usada. El caso más representativo es el de los valores obtenidos para la etringita, en el que se invierte la tendencia del tipo de cal que mayor porcentaje de esta fase genera. En el caso de las cales A es la dosificación con la cal aditivada (2Ad) la que obtiene valores mayores y de valor similar al del cemento, mientras que

para las cales B las curvas están invertidas y es la cal sin aditivar (1Na) la que obtiene los valores superiores. Estos resultados muestran que la aditivación del patrón no genera el mismo comportamiento al variar el tipo de cal, sino que son otras características intrínsecas de las cales las que provocan este comportamiento.

c) Influencia de la finura de la cal

En el caso de los tiempos de fraguado se ha observado que esta variable es susceptible a los valores de la relación a/c. De esta manera se da que para el menor ratio a/c las dosificaciones con la cal más fina da mezclas que inician y terminan antes el proceso de fraguado. Por otra parte, el aumento de la relación a/c la tendencia varía en función del % de cal añadido. Así se ha observado que a medida que aumento el porcentaje de cal las dosificaciones con la cal más fina (A3Ad) son las que tardan más en iniciar y finalizar el fraguado. De esta manera, se ha observado que esta variable modifica su comportamiento en función de otros parámetros.

Los ensayos de calorimetría han revelado que las dosificaciones realizadas con la cal más fina (A3Ad) generan curvas con valores mayores de calor y cuyos picos se dan en un menor tiempo al de las dosificaciones con la cal A2Ad. Hay que mencionar que la diferencia entre los valores obtenidos para cada una de las cales tanto en el ensayo semiadiabático como el isotérmico es pequeña en comparación a otras variables. Se establece del orden de 5°C para el semiadiabático y de 0,2-0,3 mW/g.cem para el isotérmico

En cuanto a los ensayos de DRX se ha podido determinar que esta variable influye en la velocidad de disolución del yeso y en la formación de etringita principalmente. Cabe destacar que la formación de etringita depende de la cantidad de iones sulfato disueltos en el medio. En menor medida se ha observado que la cal más fina (A3Ad) obtiene valores algo superiores de portlandita a las 48 horas del inicio del ensayo.

d) Influencia de la relación a/c

De manera generalizada se ha observado que los tiempos de fraguado aumentan con el aumento de la relación a/c, debido principalmente a la cantidad de agua presente en la mezcla.

En el caso de las calorimetrías el aumento de la relación a/c genera curvas con menor altura (se reduce el calor generado) y los tiempos en que se dan los picos aumentan. Esto está relacionado con la cantidad de productos en disolución necesarios para saturar el medio, así como con el calor específico de cada una de las dosificaciones, ya que este valor aumenta con el aumento de la relación a/c.

# 5

## Parte II: Análisis del proceso expansivo en mezclas cemento-cal

### 5.1 Introducción

Una vez caracterizada la interacción química entre las pastas de cemento y las de cemento y cal en el Capítulo 4 se observó que existían diferencias entre las pastas de referencia y las que contenían la adición. Así se observaron diferencias significativas en cuanto al calor generado, al porcentaje de disolución y de formación de las fases presentes en la mezcla y, finalmente, en los valores de inicio y de final de fraguado. Todas estas modificaciones se traducirán en una variación del comportamiento físico-mecánico del material, por lo que es necesario determinar la influencia de la adición de cal a este nivel.

El objetivo principal de este capítulo es el análisis del proceso expansivo en morteros con adición de cal mediante el uso de ensayos normalizados, así como de otros ensayos propuestos para dicha finalidad. Para alcanzar este objetivo se planteó una campaña experimental para la caracterización del proceso de expansión de los morteros y otra para la caracterización de las propiedades del material endurecido. En la figura 5.1 se muestra el esquema del conjunto de ensayos

usados para el estudio de estos materiales divididos según el tipo de material a caracterizar (fresco o endurecido).

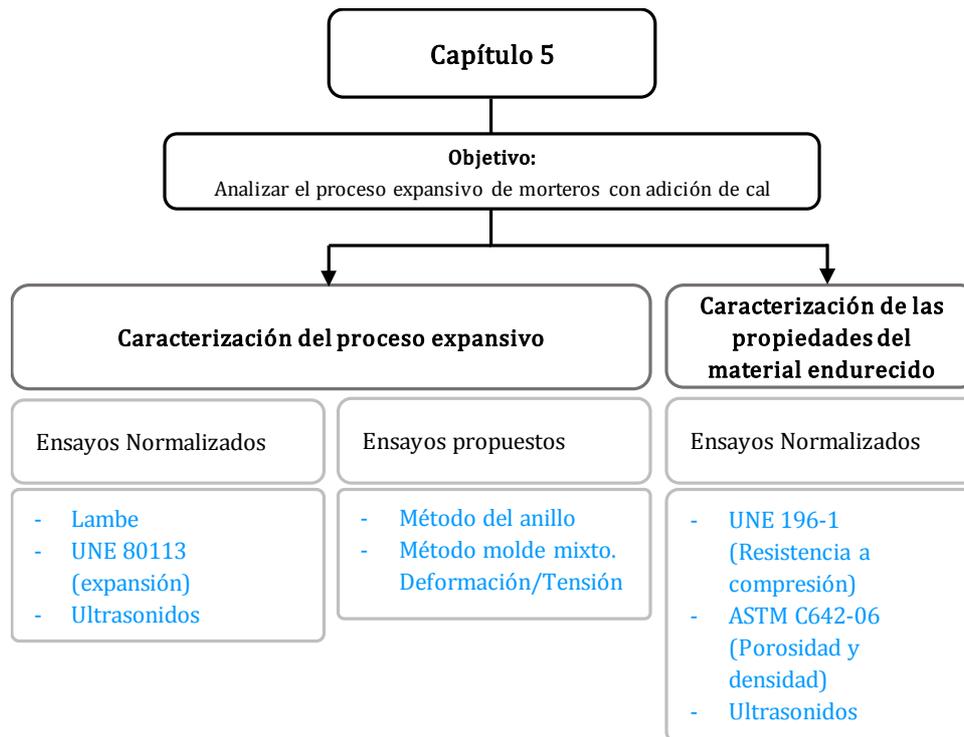


Figura 5.1 – Esquema de la campaña experimental para la caracterización del proceso expansivo en morteros con adición de cal

Con tal de alcanzar el objetivo marcado para el Capítulo 5 se planteó una campaña experimental que abarca desde la caracterización de las propiedades expansivas en el material durante el proceso expansivo hasta la caracterización de las propiedades del material endurecido resultante. Para la caracterización de variación dimensional se usaron ensayos basados en normas, como es el caso del ensayo Lambe o el de expansión basado en la norma UNE 80113. El uso de estos ensayos pretendía determinar la viabilidad de la utilización de estas normas para la caracterización de materiales expansivos. Paralelamente, se diseñaron dos ensayos denominados “*Método del anillo*” y “*Método del molde mixto (deformación/tensión)*” para caracterizar el proceso de deformación de morteros con adición de cal desde prácticamente el mezclado, con diferencias de pocos minutos, hasta horas posteriores al final del fraguado y el inicio del endurecimiento.

Finalmente, las probetas de material endurecido resultantes del ensayo del “*Método del molde mixto (deformación/tensión)*” se caracterizaron mediante los ensayos normalizados mencionados en la tercera columna del esquema de la figura 5.1. La metodología usada para cada uno de los ensayos mencionados en dicho esquema ha sido expuesta en el Capítulo 3.

La caracterización de las propiedades expansivas de los materiales cementicios con adición de cal se ha realizado por distintos métodos ya que no se ha encontrado un consenso en la literatura sobre la estandarización del proceso de evaluación de la estabilidad dimensional de mezclas con agentes expansivos. Principalmente en lo que se refiere a la caracterización temprana de la variación dimensional de estas mezclas.

## 5.2 Adaptación de los ensayos normalizados existentes

Los ensayos normalizados usados se basaron en métodos para determinar qué tan expansivos eran las mezclas realizadas. Por otra parte, también se trató de caracterizar el proceso expansivo de la cal anhidra. En los siguientes subapartados se muestran los resultados obtenidos del uso de los ensayos normalizados para la caracterización de la variación dimensional de materiales expansivos, cuya metodología se ha descrito en el apartado 3.4.3 del Capítulo 3.

### 5.2.1 Caracterización de la variación dimensional

En la figura 5.2 se muestran los resultados obtenidos mediante el uso del ensayo Lambe descrito en el apartado 3.4.3a del Capítulo 3. En esta figura se muestran dos gráficos en los que se representan las curvas de deformación obtenidas para la cal A1Na (figura 5.2a) y las curvas para la cal B1Na (figura 5.2b). Las curvas mostradas en cada uno de los gráficos corresponden a repeticiones del ensayo en las mismas condiciones para cada una de las cales, con la intención de determinar la variabilidad de los resultados. Se observa que aunque el sistema de preparación de la muestra fue siempre el mismo, los datos obtenidos presentan una elevada dispersión.

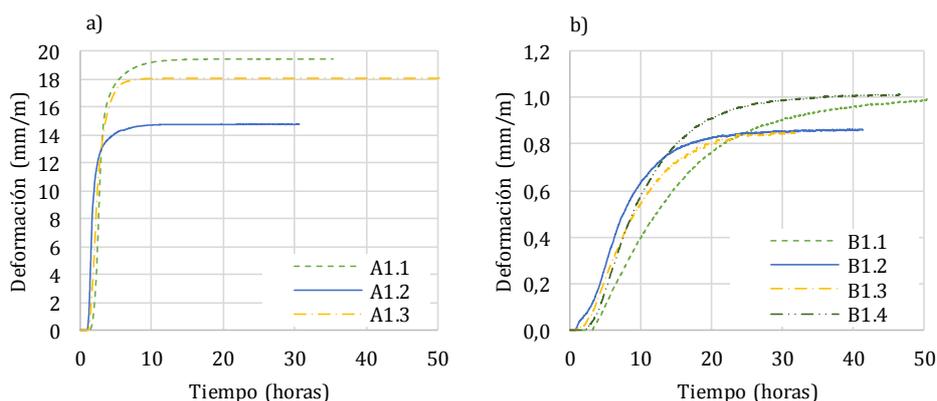


Figura 5. 2 – Curvas de expansión de las cales anhidras A1Na (a) y B1Na (b) mediante el ensayo Lambe modificado

En los gráficos mostrados en la figura 5.2 se observan dos comportamientos distintos para cada una de las cales ensayadas. En la figura 5.2a se observa que para la cal A1Na, la tendencia inicial de expansión es muy similar entre las tres repeticiones, así como la forma de la curva. Por otra parte, los valores máximos alcanzados presentan una alta variabilidad, por ejemplo, entre la prueba A1.1 y A1.2 existe una diferencia de un 26% en los resultados. En el caso de los ensayos realizados con la cal B1Na (figura 5.2b) se observa que el inicio de la expansión no es el mismo, así como el valor de esta y el momento de estabilización. En este caso, aunque la deformación final no presenta una variabilidad elevada, la forma de la curva no se ha podido reproducir de una manera veraz para esta cal.

Con base en los resultados mostrados se estableció que este ensayo no presentaba una repetitividad para evaluar de una manera sistemática el comportamiento expansivo de la cal, por lo que el uso de este ensayo fue descartado. Estos resultados son acordes con los patrones de expansión mostrados en la figura 5.3. En esta figura se ve como el proceso de expansión no es uniforme, por lo que la pieza superior sobre la que se apoya el LVDT no se eleva de manera paralela a la base. Es por

este motivo que la pieza, al desplazarse de manera no uniforme, puede quedar trabada y no reproducir los datos reales de la expansión.

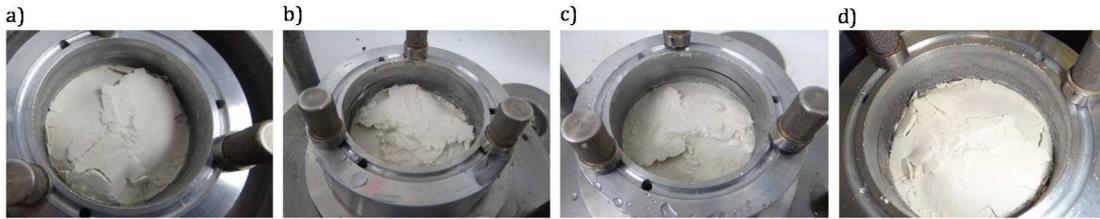


Figura 5.3 – Patrones de deformación de la misma cal observados de manera sistemática

### 5.2.2 Caracterización de la variación dimensional de pastas de cemento y cal

Con tal de caracterizar la variación dimensional de la mezcla de cemento y cal se procedió con el ensayo normativo establecido por la norma UNE 80113. Dicho ensayo, tal como ha sido expuesto en el apartado 3.43b del Capítulo 3, se basa en la fabricación de probetas prismáticas provistas de dos puntos de medición en sus extremos. El ensayo se inició a las 24 horas del mezclado, después del desmoldado de las probetas, tal como especifica la norma.

En la figura 5.4 se muestran los resultados de expansión obtenidos para las pastas de cemento sin adición de cal para cada una de las relaciones a/c estudiadas. Los datos obtenidos muestran una rápida expansión por parte de las tres dosificaciones una vez extraídas del molde y durante un periodo de 24 horas, seguido de un periodo de estabilización o de reducción de la pendiente de las expansiones.

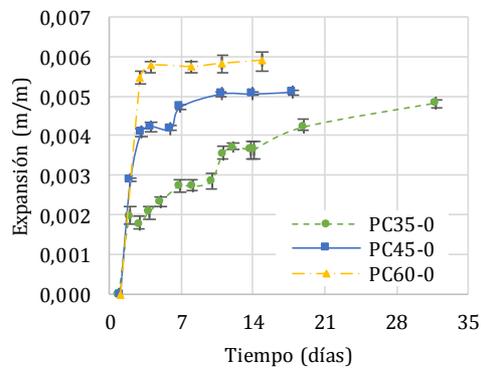


Figura 5.4 – Valores de expansión para pastas de cemento con distinto ratio a/c

El aumento de la relación a/c genera pastas más porosas lo que se debe principalmente al mayor contenido de agua libre que no está ligada químicamente en las fases hidratadas. De evaporarse, el agua libre produciría la retracción por secado en las pastas. Dado que durante el ensayo se conservaron las probetas en ambientes con humedad superiores al 95%, no se produjo la evaporación del agua y no se dio el fenómeno de la retracción por secado. Al contrario, el aporte adicional de agua permitió que el material siguiera hidratando, lo que generó pequeñas expansiones.

En la figura 5.4 se observa que la expansión de las probetas de cemento sin adición de cal es mayor a medida que aumenta la relación a/c. Por otra parte, la forma de la pendiente final también está relacionada con la relación a/c. Se observa que mientras que la relación a/c de 0,60 se estabiliza inmediatamente después del periodo de expansión, la pasta con la relación a/c de 0,35 no sólo no se

estabiliza, sino que sigue expandiendo. En el caso de la pasta con el ratio de 0,45 se observa que la primera expansión obtiene un valor medio entre los dos anteriores y, aunque no estabiliza inmediatamente después de la primera expansión, esta se da a los 10 días.

Los valores de las expansiones son del orden de 0,025mm/m para la de menor relación a/c y de 0,0057mm/m para la que contiene la mayor relación a/c al finalizar el primer proceso de rápida expansión. En el caso de la mayor relación a/c este valor sería el valor final de expansión, mientras que para la pasta con la menor relación a/c, la expansión aumenta a 0,005mm/m a los 32 días del mezclado.

En la figura 5.5 se muestran los valores de expansión obtenidos para las pastas realizadas con la cal A1Na, siendo esta representativa del resto de dosificaciones con adición de cal. Se observa que, en todos los casos, las curvas presentan el mismo comportamiento que las dosificaciones de mortero mostradas en la figura 5.4, es decir, una primera etapa de rápida expansión seguida de un periodo de expansión más lenta o estabilización en función de la dosificación.

En primer lugar, se observa que para el mismo porcentaje de cal añadido, a medida que aumenta la relación a/c, la pendiente del último tramo de la curva es menor, por lo que la estabilización del proceso de expansión de las pastas se da a una edad más temprana. En el caso del 7% de adición, se observa que la pasta de cemento con una relación a/c de 0,60 está estabilizada prácticamente desde el inicio de la medición, lo que no se da para el caso de la pasta con relación a/c de 0,35 en la que si se observa que el proceso de expansión sigue en marcha tras 30 días. Al añadir cal, las curvas de expansión se invierten con respecto a las pastas de cemento sin cal de la figura 5.4. En este caso, e independientemente del porcentaje de cal añadido, se observa que las dosificaciones con menor relación a/c son las que obtienen un valor mayor de expansión.

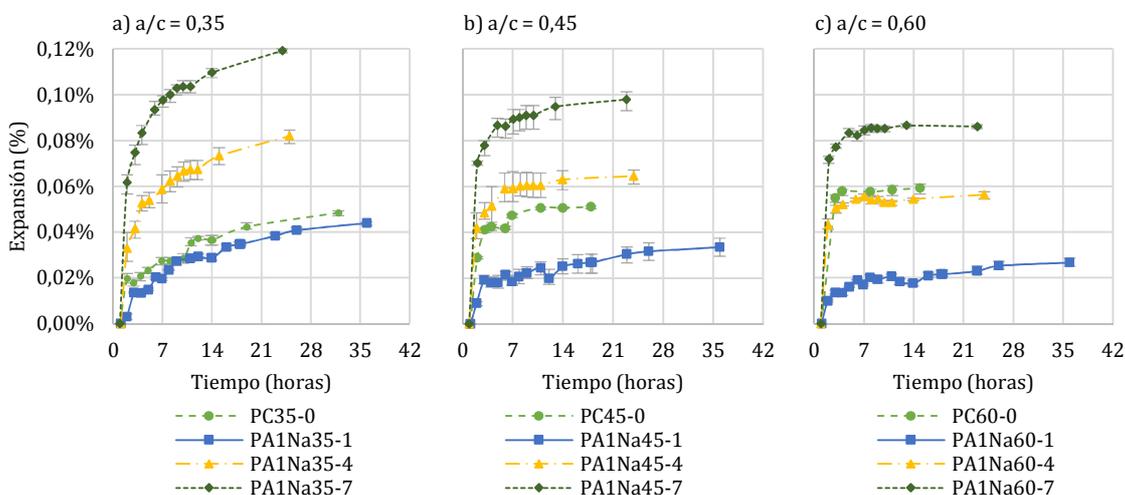


Figura 5. 5 – Valores de expansión para las pastas de cemento y cal y para el patrón sin cal, en función de la relación a/c. (Variable analizada: %CaO)

Por otra parte, al comparar las tres dosificaciones con el 7% de adición se observa que estas son las que generan una mayor expansión y que esta está relacionada con la relación a/c de la mezcla. Así, las relaciones a/c inferiores son las que generan una mayor expansión y las que más tardan en estabilizarse (a/c 0,35 y 0,45), mientras que para el ratio de 0,60 la expansión se estabiliza inmediatamente después del primer tramo.

Como dato relevante, cabe destacar que las dosificaciones patrón sin cal, para cada una de las relaciones a/c ensayadas, generan más expansión que las dosificaciones que contienen cal, lo que

resulta un comportamiento ilógico. Un ejemplo de este comportamiento es el que se muestra en la figura 5.5c en el que la dosificación PC60-0 obtiene valores mayores de expansión que la dosificación con el 4% de adición (PA1Na60-4).

Con base en estos resultados se plantea la hipótesis de una expansión inicial no medida y que falsea los datos de deformación de las dosificaciones estudiadas. En la figura 5.6a se muestra un gráfico explicativo de la hipótesis mencionada. En dicha figura se muestra la expansión real de tres probetas hipotéticas cuya expansión se mide desde el instante inicial y cuya deformación final se especifica como  $\epsilon_{\text{real}}$ . Por otra parte, se marca el tiempo correspondiente a las 24 horas en el que se inicia el ensayo, según la norma UNE 80113, y se especifica también la expansión medida ( $\epsilon_{\text{medida}}$ ). Con tal de facilitar el entendimiento de este gráfico, en la figura 5.6b se muestra una aproximación de la expansión medida por las tres probetas partiendo de las 24 horas.

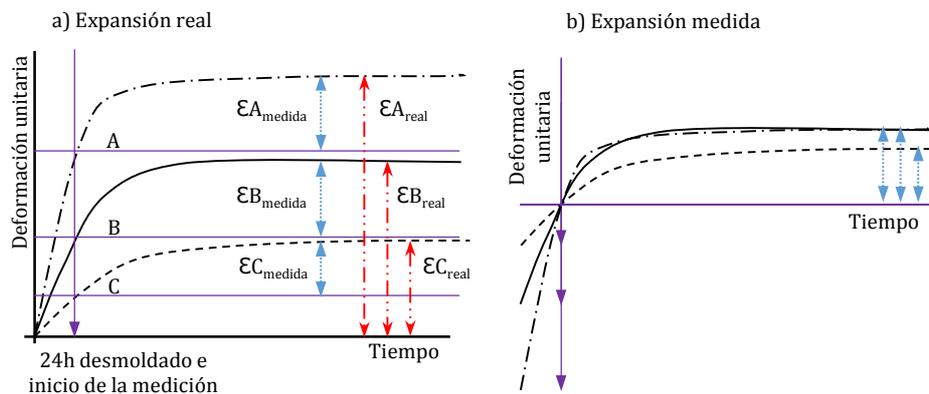


Figura 5.6 – Representación gráfica de la hipótesis de expansión no medida durante las primeras 24 horas que permanecen en el molde

En la figura 5.6b se observa claramente que, a pesar de la diferencia en la expansión real de las probetas, el hecho de iniciar las mediciones a las 24 horas conduce a una expansión similar en todos los casos, es decir, la expansión medida a partir de las 24 horas presenta un mismo orden de magnitud, aunque hay diferencias del orden de dos y tres veces en las expansiones totales en el caso de medir desde tiempo cero. Las primeras 24 horas resultan determinantes para obtener los valores reales de deformación del material.

En los casos analizados se ha observado que las cales con mayor porcentaje de cal generan mayor expansión y que a medida que la relación a/c aumenta la expansión disminuye para las pastas con adición de cal. Por otra parte, en el caso de las pastas de cemento se observa la tendencia inversa en cuanto al aumento de la relación a/c. Estos resultados, juntamente con el aumento de la expansión durante los primeros días posteriores al desmoldado, generan una serie de incógnitas en cuanto a los valores de expansión obtenidos, por lo que se plantea el uso de otro método más adecuado para caracterizar la expansión de los materiales cementicios con adición de cal.

### 5.3 Método del anillo

Con tal de evaluar la repetitividad del ensayo del método del anillo, se realizaron mediciones del mismo mortero en distintos momentos de la campaña experimental cuyos resultados son los que se muestran en la figura 5.7. La metodología usada para este ensayo se ha descrito en el apartado 3.4.3d del Capítulo 3 y su aproximación al cálculo se encuentra descrita en el Anejo A1. En dicha figura

se muestran los resultados de expansión obtenidos para el mortero MB1Na45-7 a diferentes edades (a: Noviembre 2014; b: Enero 2015 y c: Febrero 2015). Cabe destacar que se ensayaron otras dosificaciones de mortero durante el período de tiempo mostrado en la figura 5.7, y que la dosificación del mortero MB1Na45-7 es representativa del resto de casos.

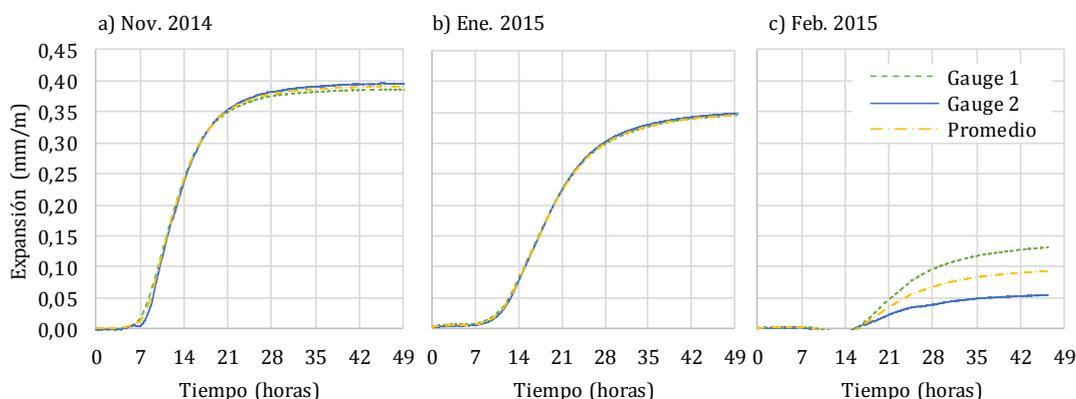


Figura 5.7 – Método propio I. Evolución de las expansiones para la dosificación MB1Na45-7

En cada uno de los gráficos se muestran tres curvas que corresponden con la medición obtenida de cada una de las galgas y el promedio de ambos resultados. En cuanto a las curvas se observa que, en todos los casos, tienen forma de "s" y que presentan tres partes diferenciadas. En primer lugar, se da una etapa en donde la medición de la deformación es prácticamente nula. En segundo lugar, se observa un aumento significativo de la expansión seguido por la estabilización del proceso de deformación, que correspondería con la tercera parte de la curva.

Al comparar los tres gráficos mostrados en la figura 5.7 se observa que a medida que avanza el tiempo en que se realiza el ensayo (a, b y c) los valores máximos alcanzados se reducen. Así, al comparar el valor máximo de la curva promedio se tiene que de noviembre a enero este se reduce de 0,4mm/m a 0,35 mm/m, mientras que en febrero los valores se reducen hasta 0,1 mm/m. Cabe destacar que el período de estabilización de la expansión se retrasa a medida que avanzan las repeticiones del ensayo.

Finalmente, como aspecto notorio, juntamente con los valores máximos de deformación, se observa un aumento en la dispersión de los datos obtenidos para cada una de las galgas de medición. En los gráficos de la figura 5.7a y 5.7b los valores obtenidos para cada una de las galgas es prácticamente el mismo, mientras en la figura 5.7c la diferencia entre ambas galgas es significativa con valores de 0,1 mm/m entre ellas.

En la figura 5.8 se muestran las curvas de tensión obtenidos a partir de los datos promedio de expansión, y mediante la formulación expuesta en el **Anejo A1**. Estos resultados muestran el mismo comportamiento que las curvas de deformación de la figura 5.7.

En este caso se observa que la primera parte de la curva presenta valores negativos o positivos en función del momento de medición, así como un aumento del tiempo de este primer período. En el caso de los valores máximos alcanzados estos se reducen en la misma proporción que lo hacían las deformaciones.

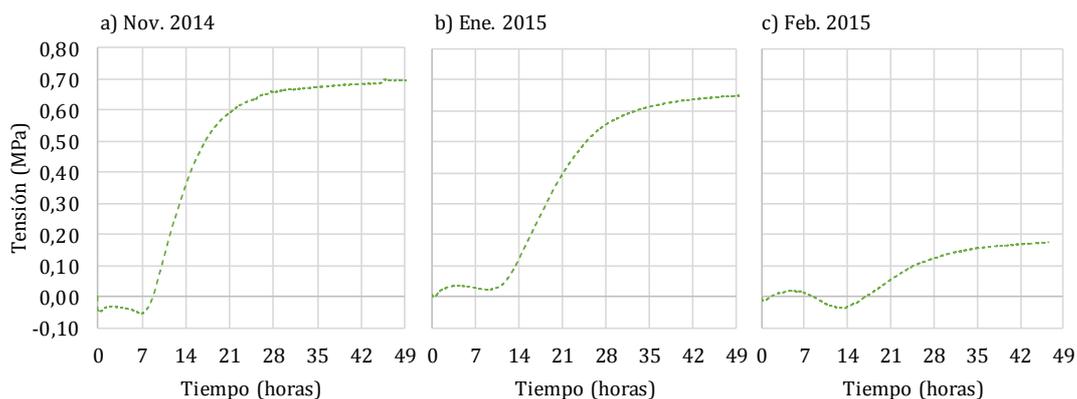


Figura 5.8 – Método propio I. Evolución de las tensiones para la dosificación MB1Na45-7

Una inspección detallada del equipo de ensayo aportó evidencias que podrían justificar la tendencia apreciada en los gráficos de las figuras 5.7 y 5.8. La figura 5.9 muestra el aspecto final del anillo tras la realización de la serie de ensayos. Tal como se aprecia en las imágenes se evidencia un claro cambio en la estética fruto de la exposición al ambiente húmedo de la cámara climática. Además, se produce un incremento de la rugosidad interior.

Pese al uso de vaselina para evitar que el material quedara adherido a la superficie interior era necesario extraer el material por medios mecánicos que inducían a un rozamiento en la superficie interior del anillo y a vibraciones del conjunto del ensayo. Además, se apreció una ovalización del anillo que se hizo más evidente en los últimos ensayos ejecutados.



Figura 5.9 – Estado final del anillo metálico del Método del anillo

El procedimiento de extracción del material endurecido pudo ser la causa del deterioro de las galgas de medición, ya que durante la secuencia de los ensayos se observó un desprendimiento del sistema de medición, lo que falsearía los resultados del ensayo pudiendo dar lugar a las tendencias anómalas que se han presentado anteriormente. Por una parte, la ovalización del anillo podría ser la causante de la diferencia de medición entre las galgas y el desprendimiento de estas, junto con el deterioro interno del anillo podrían explicar la reducción de los valores de medición.

Con base en los resultados mostrados y analizados en los párrafos anteriores no parece adecuado el uso de este procedimiento de ensayo tal como se ha diseñado para la medición de las expansiones en continuo.

## 5.4 Método del molde mixto (deformación/tensión)

### 5.4.1 Caracterización de la deformación libre

En la figura 5.10 se muestran dos imágenes que corresponden con el ensayo del molde mixto, específicamente, con la adaptación para la medición de la deformación. El procedimiento de ensayo seguido se ha descrito en el apartado 3.4.3e del Capítulo 3. En la figura 5.10a se muestra la preparación del molde y del sistema de medición antes de introducir el mortero. En esta figura se observan los dos tornillos sin fin que mantienen la pieza móvil en su posición de inicio y evitan que esta se desplace durante la colocación y compactación del mortero. Mediante una línea de trazos se marca la posición inicial de la pieza móvil que debe estar enrasada con el resale de las piezas laterales del molde. En la figura 5.10b se muestra el final del ensayo, antes de desmoldar la probeta de mortero. En primer lugar, se observa que la pieza móvil se ha desplazado con respecto a la posición inicial. Se muestran también los dos tornillos sin fin separados de esta pieza y que permiten su libre movimiento durante todo el proceso de medición de las deformaciones.

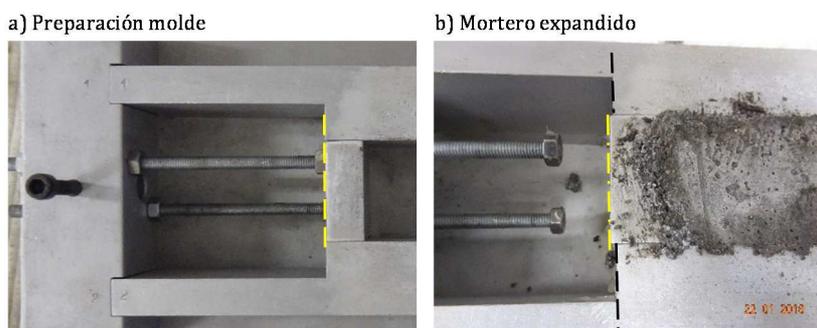


Figura 5. 10 – Comprobación visual de la expansión del mortero; a) inicio del ensayo, b) final del ensayo con el mortero endurecido

Los resultados obtenidos del ensayo de deformación libre son los que se muestran en la figura 5.11. En primer lugar, se observa que todas las curvas reproducen la misma forma y que esta está formada por tres partes. La primera contemplaría el período de retracción, la segunda correspondería al período de rápida expansión y, finalmente, el tercer tramo correspondería con la estabilización de la deformación. En el gráfico se observan además tres grupos de curvas, las que alcanzan valores mayores de deformación (naranja), las que se encuentran en un estadio intermedio (verde) y la que se encuentra en una zona de deformación negativa (negro). Estos grupos se diferencian por el porcentaje de cal presente, siendo las que generan mayor expansión las que contienen el 14% de adición, seguidas de las que contienen un 7% de cal y finalmente se encuentra la dosificación patrón sin cal. Como dato significativo se observa que las expansiones se producen en el período anterior a las 24 horas del inicio del mezclado. A partir de estos resultados se descarta el ensayo normalizado de la norma UNE 80113 para este tipo de materiales.

En el gráfico de la figura 5.11 se observa que las dosificaciones que contienen cal experimentan una primera etapa de retracción seguida de un incremento rápido de expansión. Cabe destacar que el ensayo se diseñó para medir expansiones, por lo que las deformaciones negativas que se observan se pueden deber a un fenómeno de “pegado” del mortero con la pieza móvil o a un posible empuje por parte del LVDT.

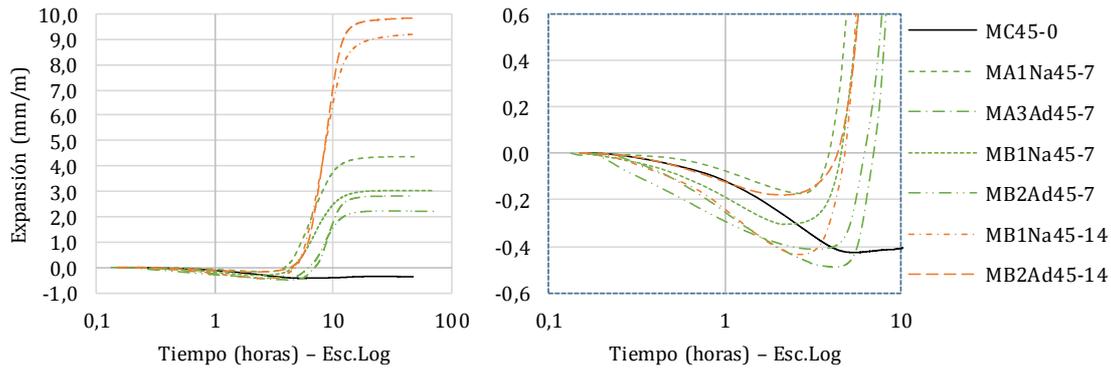


Figura 5.11 - Curvas de caracterización de la deformación libre para las dosificaciones ensayadas

La deformación negativa que se observa en las curvas mostradas en la figura 5.11 se encuentra entre los 0,2mm/m y los 0,5mm/m, lo que supone aproximadamente un porcentaje de retracción de un 0,02 - 0,05% y su máximo se alcanza entre las 3 y las 5 horas del inicio de mezclado en función de la dosificación realizada. En el caso de la dosificación patrón se observa que no experimenta ninguna expansión significativa una vez alcanzado el valor mínimo de deformación, lo que es un resultado esperado. El primer tramo de retracción, junto con el de expansión y el de estabilización pueden asimilarse a los períodos de hidratación del cemento analizados en el Capítulo 4, siendo estos los que se muestran en la tabla 5.1.

Etapa	Tiempos	Curva de calor de hidratación	Curva de deformación
1	1 a 4h	Período de disolución de las fases y saturación del medio líquido y período durmiente	Período de deformación negativa correspondiente al inicio de la evaporación y combinación del agua
2	4 a 10h	Período de aceleración correspondiente con la hidratación de la portlandita y de los silicatos del cemento hasta alcanzar su pico máximo	Período de deformación máxima
3	Hasta las 18 - 36h	Período de desaceleración	Período de estabilización de la curva

Tabla 5.1 - Tabla comparativa entre períodos de hidratación y deformación del material

En la tabla 5.1 se ha relacionado las etapas principales de la curva de calor de hidratación de la pasta de cemento con los tramos de la curva de deformación mostrados en la figura 5.11. Para cada una de las etapas se muestran los tiempos en que se da el fenómeno explicado o el tiempo hasta que dura la etapa.

En la figura 5.12 se muestran las curvas de deformación junto con las de temperatura obtenidas durante el mismo ensayo para los morteros MB1Na45-7 y MB1Na45-14 ya que son representativas del resto de casos ensayados. En ambos gráficos se observa que la expansión de la probeta se da durante el período de aceleración de la curva de temperatura, es decir, durante el período de hidratación de los silicatos. Con base en esta comparación, se podría asociar el periodo de aceleración de la temperatura con el incremento de la expansión, aunque tal como se observa en ambos gráficos, este proceso no es tan directo y existe una leve diferencia entre los picos de las curvas. En el caso de la expansión, este valor empieza a medirse en el momento en que se inicia el proceso de fraguado de la matriz cementícea y, tal como se observa en la figura 5.12, el inicio de la

expansión se da en el mismo momento que el inicio del aumento de la temperatura, lo que correspondería con el inicio del fraguado.

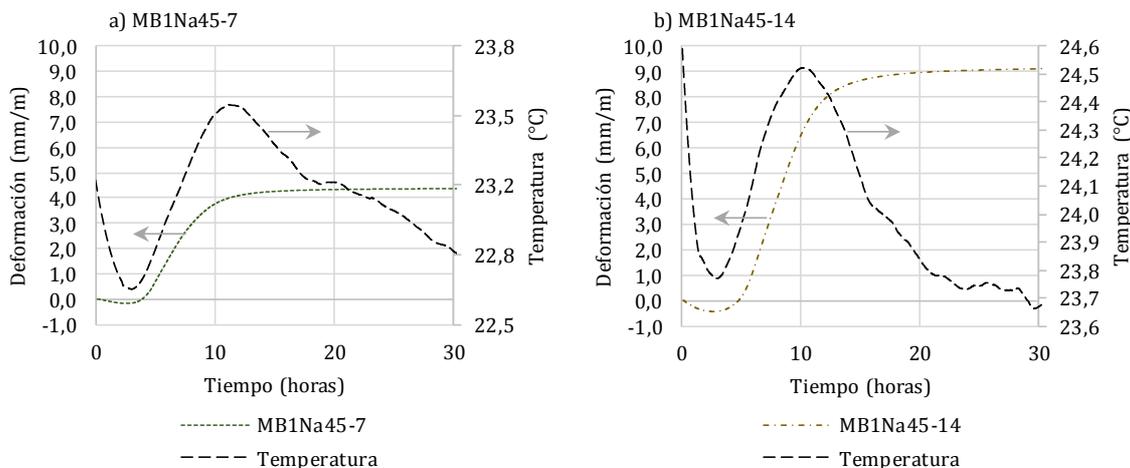


Figura 5. 12 – Comparación de las curvas de temperatura y deformación para las dosificaciones MB1Na45-7 (a) y MB1Na45-14 (b)

Una vez establecida una primera relación entre la curva de calor de hidratación y la de deformación es necesario determinar la influencia de las variables que han sido motivo de estudio en esta tesis. En este caso las variables a estudiar son: la influencia del porcentaje de cal y la influencia de la adición retardante. En este ensayo no se ha estudiado la influencia de la relación a/c o de la superficie específica debido a la disponibilidad de materiales.

a) Influencia del contenido de cal

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos del ensayo de expansión libre correspondientes a aumento del contenido de cal. En la figura 5.13a se muestran las curvas de deformación correspondientes a las dosificaciones MC45-0, MB1Na45-7 y MB1Na45-14, mientras que en la figura 5.13b se muestran las curvas para las dosificaciones MB2Ad45-7 y MB2Ad45-14.

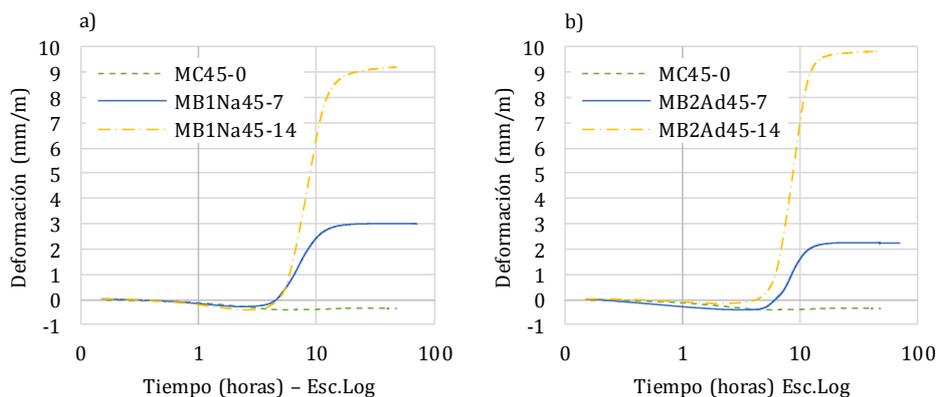


Figura 5. 13 – Curvas de deformación para determinar la influencia del contenido de cal (morteros con adición de cal del tipo B1Na y B2Ad)

Cabe destacar que la deformación del mortero sin cal (MC45-0) experimenta un proceso de retracción. Por otra parte, la adición de cal genera una deformación inicial negativa, mientras que a partir de las 5 horas aproximadamente se produce una deformación positiva y su posterior

estabilización. En ambas figuras se observa que el aumento del contenido de cal en la mezcla genera materiales más expansivos, ya que, en ambos casos, la dosificación con el 14% de adición es la que obtiene valores superiores.

Los valores máximos alcanzados para los morteros con la cal B1Na son del orden de 3mm/m y 9mm/m para los porcentajes de cal del 7% y del 14% respectivamente. En el caso de los morteros realizados con la cal B2Ad los valores son de 2,20mm/m y 10mm/m. Se observa que al doblar el contenido de cal el valor máximo de la expansión no es el doble, sino que el aumento generado para la cal B1Na y B2Ad es 67% y 78% respectivamente. Para las cinco curvas mostradas en la figura 5.13 se ha calculado la pendiente de cada uno de los tramos mencionados en los párrafos anteriores. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.2.

Etapa	Intervalos de tiempos (horas)	Dosificación de referencia MC45-0	Dosificaciones con la cal B1Na		Dosificaciones con la cal B2Ad	
			MB1Na45-7	MB1Na45-14	MB2Ad45-7	MB2Ad45-14
1	0 a 3h	-0.12	-0.18	-0.25	-0.27	-0.12
2	3 a 12h	0.01	0.52	1.27	0.43	1.51
3	>12h	0	0	0	0	0

*Tabla 5. 2 – Valores de las pendientes en los tres tramos de la curva de deformación calculadas en mm/(m·h)*

El primer tramo de la curva de deformación que corresponde con la etapa 1 se caracteriza por un proceso de retracción en todos los casos estudiados independientemente de si los morteros contienen cal o no. Durante esta etapa, que tiene una duración aproximada de cuatro horas desde el mezclado, aun no se ha iniciado la reacción de los silicatos y del CaO, por lo que el efecto expansivo aún no ha tenido lugar.

En el caso de los morteros con adición de cal se observa que el valor de la pendiente de este tramo es igual o inferior a la del mortero de referencia. Al comparar los resultados entre las cales B1Na y B2Ad se observa que se dan tendencias distintas. En el caso de los morteros con la cal B1Na, el aumento del contenido de cal genera una reducción de la pendiente mientras que en los morteros realizados con la cal B2Ad se invierte la tendencia. En esta primera etapa no se observa una tendencia clara en cuanto al aumento del porcentaje de cal o del tipo de cal usado (normal o aditivada).

La etapa 2 presenta diferencias significativas entre el mortero de referencia y los morteros con adición de cal. En el caso del mortero de referencia, la pendiente de este tramo es prácticamente igual a cero, mientras que en el caso de los morteros con cal las pendientes son positivas y de valores comprendidos entre 0,43 y 1,51. Se observa que es en esta etapa cuando la cal, al convertirse en hidróxido cálcico, influye en el comportamiento del mortero frente a la variación dimensional.

El aumento del contenido de cal de 7% a 14% se traduce en un aumento del valor de la pendiente para el uso de ambas cales. En el caso de los morteros con la cal B1Na la pendiente aumenta de 0,52 a 1,27, y en el caso de los morteros con la cal B2Ad los valores de la pendiente son de 0,43 para el 7% de adición y de 1,51 para el 14%. Esto implica un aumento de un 41% y de un 28,5% respectivamente. Este comportamiento resulta lógico, ya que al haber más contenido de cal la cantidad de hidróxido cálcico también será mayor y, por consiguiente, la deformación experimentada. Este comportamiento es acorde con los resultados de DRX mostrados en el gráfico de la figura 4.53 del Capítulo 4.

La última etapa de la curva se caracteriza por la estabilización del proceso de deformación de los morteros. En este caso, independientemente de la presencia de cal en el mortero, del contenido de esta o del tipo de cal usado, la pendiente de este tramo es igual a cero.

Los resultados obtenidos para la pendiente en esta última etapa no deben tomarse como representativos del comportamiento de los morteros debido a que la configuración del sistema no permite medir deformaciones negativas una vez el mortero ha fraguado. Esto es debido a que la pieza móvil no está fijada al mortero por lo que, en caso que este experimentara una deformación negativa, no existe ningún elemento que arrastre la pieza en sentido de la retracción. En todo caso, sí que puede establecerse que el proceso de deformación ha finalizado.

#### b) Influencia de la aditivación de la cal

En los gráficos de la figura 5.13 se observa que el comportamiento del mortero MB1Na45-7 es similar al MB2Ad45-7 en cuanto a la forma con algunas variaciones en los valores de deformación alcanzados, así como en el momento en que se inicia esta deformación. Este comportamiento se repite para los morteros con el 14% de adición de cal.

Se observa que el mortero con la cal aditivada (B2Ad) es el que tarda más en iniciar el proceso de expansión. Este fenómeno podría estar relacionado con las tendencias indicadas en los resultados de calorimetría isotérmica (Capítulo 4) en los que la curva de calor de la pasta con la cal B2Ad se producía después de la de la pasta con la cal B1Na. Debido a la aditivación introducida en la cal B2Ad, en los morteros con un contenido de cal del 7% se produce un retraso del inicio de la deformación inicial y se obtiene un valor final remanente de menor magnitud. Los valores de deformación alcanzados son de 2mm/m y 3mm/m para las dosificaciones con las cales B2Ad y B1Na, respectivamente. Esto indica que para este porcentaje de adición la dosificación con la cal no aditivada (B1Na) permite obtener morteros más expansivos que los realizados con la cal B2Ad. Los resultados corroboran los datos obtenidos en DRX en los que se muestra que los valores de portlandita son mayores para la dosificación con la cal B1Na.

En el caso de los dos morteros con el 14% de adición se observa que inician el proceso de expansión a las tres horas del mezclado. En ambos gráficos se observa que las curvas de los morteros con el 14% de adición presentan los mismos valores, lo que indican un comportamiento similar en ambos casos. Finalmente, se observan diferencias en los valores de deformación final alcanzados, siendo estos de 9mm/m y 10mm/m para los morteros con la cal B1Na y B2Ad, respectivamente. Como dato significativo se observa que la dosificación más expansiva es la realizada con la cal B2Ad. Esto implica que la tendencia se invierte con respecto al comportamiento para el 7% de adición. Al comparar los resultados con las curvas de calorimetría se observa que la dosificación con la cal B2Ad es más exotérmica y más rápida con respecto a la curva de la dosificación con la cal B1Na. Los resultados de DRX para estas cales muestran que, aunque el valor final de portlandita es prácticamente el mismo en ambas dosificaciones, la pasta realizada con la cal B2Ad es la que forma más rápido esta fase, principalmente a partir de las 16 horas, momento en el cual ya se ha dado el final de fraguado. Esto implica que la formación de portlandita se da en un medio más rígido, por lo que la expansión generada por la formación de esta no quedará amortiguada por la masa y será mayor.

### 5.4.2 Caracterización de la tensión de confinamiento

En la figura 5.14 se muestran dos imágenes que corresponden con el ensayo del molde mixto, específicamente para la adaptación de la medición de la tensión confinada. El procedimiento de ensayo seguido se ha descrito en el apartado 3.4.3e del Capítulo 3. En la figura 5.14a se muestra la configuración final del ensayo de tensión. Se identifica la célula de carga, la pieza de transmisión de la fuerza entre la pieza móvil y la célula y, finalmente, la sonda  $k$  de temperatura ya cortada. En la figura 5.14b se muestra una ampliación de la zona del molde donde se ubica la célula de carga. A diferencia del caso de la deformación libre, para esta configuración de ensayo no se observa desplazamiento entre la pieza móvil y los resaltes del molde, ya que ello indicaría que el molde se ha deformado por la fuerza ejercida por el mortero.

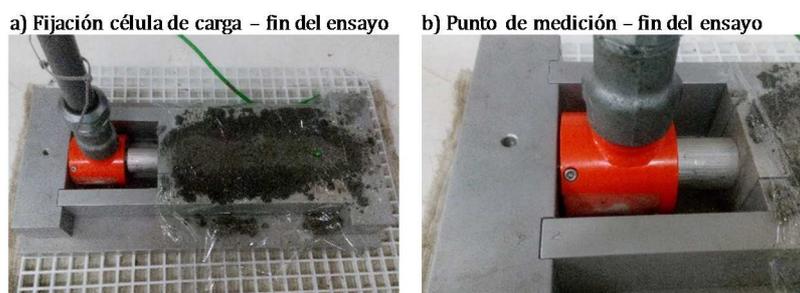


Figura 5. 14 – Ensayo de tensión de confinamiento

En la figura 5.15 se muestran las curvas de tensión obtenidas para el mortero de referencia MC45-0 y para los morteros MB2Ad45-7 y MB2Ad45-14 ya que son representativas del resto de curvas obtenidas para los morteros con adición de cal. En el gráfico se agrupan los morteros por colores en función del porcentaje de cal añadido. Así se representa en negro la dosificación sin adición de cal, en verde el mortero que contiene un 7% de adición y en naranja el que contiene el 14% de cal.

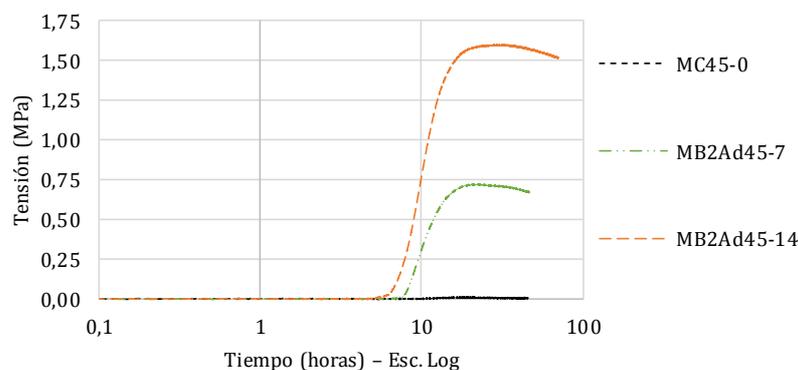


Figura 5. 15 – Curvas de caracterización de la tensión de confinamiento para las dosificaciones MC45-0, MB2Ad45-7 y MB2Ad45-14

En el caso de la curva el mortero sin cal se observa que esta se encuentra sobre la línea de abscisas, lo que implica que no se han medido tensiones de compresión en este mortero. Las curvas de los morteros con cal tienen forma de “s”, igual que en el caso de las deformaciones, y también pueden distinguirse tres partes. La primera etapa transcurre durante el periodo en que la tensión es igual a cero, la segunda corresponde con el rápido aumento de la tensión hasta alcanzar su pico máximo y la tercera etapa corresponde con el periodo comprendido entre el pico máximo y el final de la curva. A diferencia de las curvas de expansión, se observa que después del pico máximo de

tensión se genera una relajación del material que conlleva a una disminución de la tensión máxima alcanzada.

c) Influencia del contenido de cal

En la figura 5.16 se muestran las curvas de tensión confinada para los morteros con las cales B1Na (figura 5.16.a) y B2Ad (figura 5.16.b) para los dos porcentajes de cal estudiados (7% y 14%). Así mismo, se muestra la curva obtenida para el mortero sin adición. La curva del mortero de referencia se observa sobre la línea del eje de abscisas. En este caso, este mortero podría estar experimentando tensiones de tracción que la configuración del ensayo planteado no permite medir.

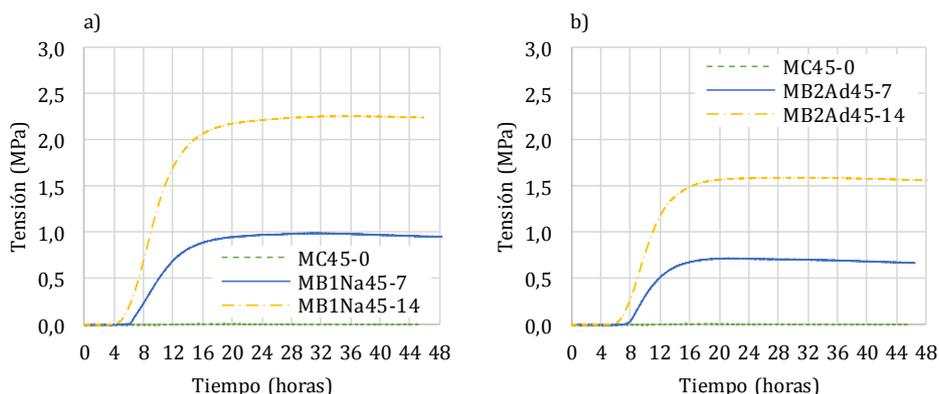


Figura 5. 16 – Curvas de tensión para determinar la influencia del contenido de cal (morteros con adición de cal del tipo B1Na y B2Ad)

Para poder analizar la evolución de la curva de tensión de confinamiento de estos morteros se ha dividido la curva en tres partes. El primer tramo corresponde con el periodo comprendido entre el tiempo 0 y el inicio de la pendiente de aumento de la tensión. El segundo tramo corresponde con el periodo de aumento de la tensión, es decir, el que transcurre entre las 4 y las 12 horas y, finalmente, el último tramo corresponde con la estabilización del proceso.

El aumento de la adición de cal en los morteros se traduce en que el inicio de la tensión se da antes. Este aumento de cal llega a acortar el tiempo del primer tramo hasta 2 horas. A partir de aquí son los morteros con mayor contenido de cal los que dibujan una curva de mayor pendiente, alcanzando valores superiores de tensión en aproximadamente el mismo tiempo en que llegan a su máximo los morteros con el 7% de adición. Los valores de las pendientes del segundo y del tercer tramo de la curva son los que se muestran en la tabla 5.3. La primera etapa de la curva no se muestra en la tabla debido a que la pendiente es igual a cero.

Etapa	Intervalos de tiempos (horas)	Dosificación de referencia MC45-0	Dosificaciones con la cal B1Na		Dosificaciones con la cal B2Ad	
			MB1Na45-7	MB1Na45-14	MB2Ad45-7	MB2Ad45-14
2	4 a 16h	-	0,125	0,298	0,134	0,240
3	>16h	-	-0,0027	-0,0015	-0,0024	-0,0021

Tabla 5. 3 – Valores de las pendientes en los dos tramos de la curva de tensión

Los resultados de la tabla 5.3 muestran que la pendiente de la etapa 2 de las dosificaciones con el porcentaje de cal añadido de 14% es aproximadamente el doble de las que obtiene la misma

dosificación con el 7% de adición. En este caso parece existir una tendencia lineal entre la pendiente de la curva y el porcentaje de cal añadido.

El final del tramo dos se alcanza al mismo tiempo independientemente del porcentaje de adición del mortero. Este tiempo corresponde con el final del proceso de hidratación de los silicatos en la curva de hidratación de las pastas de cemento. Así mismo, este punto corresponde con la reducción de la velocidad de formación de portlandita observado en el ensayo de DRX del Capítulo 4. Al igual que para el caso del ensayo de deformación libre analizado en el apartado anterior, los morteros con mayor contenido de cal son los que presentan valores mayores de tensión.

El último tramo de la curva muestra los valores máximos de tensión alcanzados. En el caso de los morteros realizados con la cal B1Na los valores obtenidos son de 1MPa y 2,3MPa para las dosificaciones MB1Na45-7 y MB1Na45-14, respectivamente. En el caso de los morteros realizados con la cal B2Ad los valores obtenidos son de 0,8MPa y de 1,6MPa para las dosificaciones MB2Ad45-7 y MB2Ad45-14, respectivamente. A partir de estos resultados se observa que al duplicar el contenido de cal también lo hace la tensión generada.

En la etapa 3, que corresponde con el último tramo de la curva, se observa un descenso o relajación de la tensión en todas las curvas. Esta relajación puede ser debida al proceso de retracción propio del mortero o al fenómeno de la fluencia. Este descenso final en la curva no ha podido observarse para el ensayo de deformación debido a que el sistema de medición no permitía medir deformaciones negativas tal como se ha comentado en el apartado 5.4.1 de este capítulo. En el ensayo de tensión, al tratarse de un confinamiento, la célula de carga sí que es capaz de medir la reducción de la fuerza aplicada. Estos resultados concluyen que, aunque se añade una cantidad de cal capaz de generar una tensión interior del material, la retracción sigue estando presente, aunque, a las 45 horas del inicio del ensayo, la retracción que se ha dado ha reducido la tensión para cada mortero en un 6,87% como máximo, tal como se muestra en la tabla 5.4.

	<b>% de reducción de la tensión entre el máximo y las 45 horas de ensayo</b>
<b>MA1Na45-7</b>	2,87%
<b>MA3Ad45-7</b>	6,87%
<b>MB1Na45-7</b>	3,53%
<b>MB2Ad45-7</b>	6,84%
<b>MB1Na45-14</b>	0,65%
<b>MB2Ad45-14</b>	1,27%

*Tabla 5. 4 – Porcentaje de reducción de la tensión a las 45 horas*

Otro dato significativo es la rapidez con que se pierde la tensión para cada uno de los porcentajes de cal. En el caso de los morteros amasados con la cal B1Na se observa que el de menor contenido de cal es el que obtiene mayor reducción de la pendiente (tabla 5.3). La cantidad de cal, en estos morteros, es menor, por lo que el efecto de la retracción será más notable que para el mortero con mayor contenido de cal. Por otra parte, en las dosificaciones con la cal B2Ad se observa que esta diferencia en los valores de la pendiente es menor, aunque sigue siendo la dosificación con el menor porcentaje de cal la que obtiene una pendiente mayor. En la cal B2Ad la superficie específica es menor a la B1Na, por lo que este parámetro podría estar influyendo en que la pendiente del último tramo no descienda tan rápidamente debido a la mayor facilidad de hidratar partículas de cal.

d) Influencia de la aditivación de la cal

Al comparar los morteros con la cal B1Na y B2Ad para cada uno de los porcentajes de cal añadido, se observan diferencias entre los morteros con cal aditivada y los morteros con cal sin aditivar, siendo estos últimos los que alcanzan valores mayores de tensión.

Con base en los resultados obtenidos se observa que los morteros realizados con la cal B1Na inician el proceso de expansión 2 horas antes que los morteros realizados con la cal aditivada (B2Ad). Además, son los que alcanzan valores mayores de tensión, superando a los morteros con la cal B2Ad en 0,27MPa para el 7% de adición y de 0,67MPa para el 14%.

En el segundo tramo de la curva se observa que las pendientes de ambos morteros obtienen valores cercanos (tabla 5.3) por lo que la aditivación de la cal no influye en el proceso de expansión, sino que limita la expansión generada. Dicho de otra manera, al limitar la formación de portlandita se reduce la capacidad expansiva del material.

**5.4.3 Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del material endurecido**

Los siguientes ensayos tienen como objetivo identificar las diferencias en las propiedades físico-mecánicas de los morteros ensayados con la configuración de deformación libre y con la configuración de confinamiento. Por otra parte, se pretende hacer una recopilación de los parámetros necesarios para la posterior modelización del comportamiento del material en estado libre y confinado, cuyo procedimiento se explica más detalladamente en el Capítulo 6.

Se han llevado a cabo ensayos de porosidad ( $\Phi$ ), densidad ( $\delta$ ), resistencia (Rc) y ultrasonidos (US) para cada una de las probetas ensayadas en deformación libre ( $\epsilon$ ) y confinada ( $\sigma$ ). Los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos son los que se muestran en la tabla 5.5 y se obtienen de la mediana de los valores obtenidos de cada una de las partes de la probeta ensayas para cada dosificación. Los procedimientos de ensayo usados se han descrito en el apartado 3.4.4 del Capítulo 3. En la tabla 5.5 se agrupan los resultados de los ensayos mencionados por parámetro medido y para cada parámetro se muestran los resultados de cada una de las condiciones de contorno ensayadas (libre o confinada).

Dosificación	$\Phi$ (%)		$\delta$ (kg/dm <sup>3</sup> )		Rc (MPa)		US (m/s)	
	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$
<b>MC45-0</b>	15,77	15,67	2,45	2,41	31,92	30,87	4,05	4,01
<b>MA1Na45-7</b>	16,39	16,01	2,46	2,43	34,38	27,11	3,81	3,97
<b>MA3Ad45-7</b>	15,91	16,42	2,37	2,39	25,32	32,57	3,92	3,95
<b>MB1Na45-7</b>	16,47	16,40	2,45	2,43	28,06	33,32	3,93	3,91
<b>MB2Ad45-7</b>	15,89	15,67	2,39	2,43	31,23	32,33	3,98	3,97
<b>MB1Na45-14</b>	16,96	16,62	2,43	2,44	25,71	31,11	3,48	3,79
<b>MB2Ad45-14</b>	17,30	16,20	2,43	2,41	27,87	29,33	3,74	3,84

Tabla 5. 5 - Resultados comparativos de los ensayos complementarios a los 7 días

La variabilidad de los resultados mostrados en la tabla 5.5 es distinta para cada uno de los ensayos realizados. En el caso del ensayo de porosidad y densidad, el porcentaje de variación de los resultados se encuentra alrededor de un 6%, para el ensayo de resistencia este porcentaje aumenta

a un 15% y, finalmente, en el caso de los ultrasonidos se obtiene un valor de 9% de dispersión de las medidas. Con base en estos resultados se analizarán los morteros que presenten una diferencia entre los valores de cada una de las variables usadas superiores a estos porcentajes.

#### e) Porosidad

La influencia de la presencia de cal se observa principalmente en los morteros con el 14% de adición. Para el ensayo de deformación libre se observa un incremento del 7,5% y del 9,7% para los morteros MB1Na45-14 y MB2Ad45-14 respectivamente. En el caso del ensayo en situación de confinamiento, únicamente es mortero MB1Na45-14 presenta aumento de la porosidad del 6% con respecto al mortero de referencia. Con base en estos resultados puede establecerse que la presencia de cal tiene mayor influencia en la porosidad en el caso del ensayo en deformación libre.

Al comparar los resultados para el aumento del 7% al 14% del porcentaje de cal añadido para los morteros con las cales B1Na y B2Ad se observa que la porosidad aumenta en mayor media en el caso de los morteros que contienen la cal B2Ad, siendo este aumento del 8,9%. Este aumento corresponde al ensayo realizado en situación de deformación libre. Finalmente, al comparar los resultados de los morteros con el mismo contenido de cal pero con las cales B1Na y B2Ad se observa que la influencia de la aditivación no es determinante en el caso de la porosidad.

En el análisis de la porosidad se establece que la influencia de la cal en este parámetro es baja teniendo en cuenta la variabilidad de este ensayo. Sí se ha observado que los mayores contenidos de cal generan morteros más porosos que el mortero de referencia para la configuración de deformación libre, aunque la diferencia entre ellos no es significativa.

#### f) Densidad

Al realizar la misma comparación entre morteros que la realizada para el análisis de la porosidad se han obtenido porcentajes de aumento y de reducción del valor de este parámetro que se encuentran por debajo del valor de dispersión establecido. En este caso se determina que, con base en los resultados obtenidos, no es posible determinar la influencia de la adición de cal, del tipo de esta o de la capacidad retardante de la cal en los valores de densidad.

#### g) Resistencia a compresión

Los resultados obtenidos para este parámetro son los que obtienen una mayor dispersión. Aun así, se observan diferencias del orden de un 20% al comparar los resultados de resistencia para los morteros con cal y el mortero de referencia. Esta diferencia se da para los morteros MA3Ad45-7 y MB1Na45-14, y se observa que la resistencia se reduce al compararlos con el mortero MC45-7 para el ensayo de deformación libre. La portlandita formada para esta configuración del ensayo podría no depositarse en los poros, lo que estaría vinculado a los resultados de porosidad, que aumentan con respecto al mortero de referencia. Por consiguiente, la matriz cementícea sería menos resistente y los resultados del ensayo menores al compararlos con el mortero sin cal.

Para el resto de ensayos realizados, así como para las dos configuraciones de estos (libre y confinada), no se observan diferencias significativas en los resultados que permitan establecer la influencia de la presencia de cal.

## h) Ultrasonidos

El ensayo de ultrasonidos en los trozos de probetas ensayados a compresión muestra una reducción de la velocidad al comparar el mortero de referencia con el mortero MB1Na45-14. En este caso, la reducción de la velocidad es del orden de 14% al añadir cal al mortero. Este resultado está ligado al aumento de la porosidad y la reducción de la resistencia comentados en los puntos anteriores. Para este ensayo, el aumento del contenido de cal entre los morteros MB1Na45-7 y MB1Na45-14 muestra que la reducción de la velocidad es del orden de un 11% por parte del mortero con mayor contenido de cal (14%).

Para este parámetro no ha podido determinarse la influencia de la presencia de cal en la velocidad de los ultrasonidos para cada una de las condiciones de contorno ensayadas.

## 5.5 Análisis conjunto de los resultados

En la tabla 5.6 se presentan los resultados de deformación y tensión para los mismos morteros a las 24 horas del mezclado. Se observa que en ambos ensayos los valores de tensión y de deformación aumentan a medida que lo hace el porcentaje de cal añadido a los morteros. Al realizar el gráfico de tensión-deformación se observa una tendencia ascendente de los resultados al aumentar el contenido de cal.

Dosificación	Deformación	Tensión
	24h	24h
	mm/m	MPa
<b>MC45-0</b>	-0,36	0,01
<b>MA1Na45-7</b>	4,35	0,64
<b>MA3Ad45-7</b>	2,81	0,75
<b>MB1Na45-7</b>	3,02	0,98
<b>MB2Na45-7</b>	2,22	0,72
<b>MB1Na45-14</b>	9,05	2,22
<b>MB2Na45-14</b>	9,76	1,59

Tabla 5.6 – Resultados de deformación y tensión a las 24 horas

En la figura 5.17 se presentan los valores de tensión y deformación obtenidos para los siete morteros ensayados, cuyos valores son los que se han mostrado en la tabla 5.6. Además, para cada conjunto de morteros, entendiendo por conjunto los que tienen el mismo porcentaje de cal añadido, se ha calculado la mediana a partir de la cual se realiza la recta de regresión lineal.

En el gráfico de la figura 5.17 se observa que el mortero de referencia se encuentra en la zona negativa de las abscisas que corresponde con los resultados de deformación obtenidos a las 24 horas. Como ya se ha observado en el gráfico de la figura 5.13, el mortero no presenta ninguna expansión, por lo que a las 24 horas se está dando una retracción. En el caso de la tensión se considera que es cero, ya que tal como se ha mencionado anteriormente, la configuración del sistema no permite medir tensiones de tracción.

Los morteros con el 7% de cal se encuentran entre el mortero de referencia y los morteros con el 14% de adición. Entre ellos se observan variaciones más importantes en la deformación obtenida que en la tensión generada. Finalmente, los morteros con el 14% de adición de cal son los que presentan mezclas más expansivas y que generan un valor mayor de tensión. Mediante la recta

de regresión puede apreciarse una tendencia lineal entre las medias de los resultados. Es decir, se observa una tendencia lineal entre los valores de tensión-deformación obtenidos para los morteros ensayados a medida de aumenta el porcentaje de cal añadido.

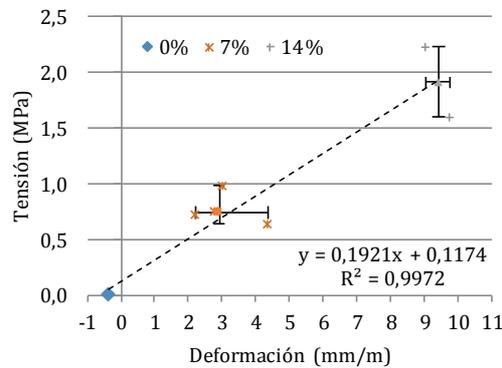


Figura 5. 17 – Relación entre los valores de tensión y deformación a las 24 horas de los morteros ensayados

## 5.6 Análisis de la evolución de la velocidad ultrasónica

En la figura 5.18 se muestra una imagen del procedimiento de ensayo de los ultrasonidos en continuo. Este procedimiento se explica en el apartado 3.4.3c del Capítulo 3. El análisis seguirá la misma dinámica que para los casos anteriores y se mostrarán los resultados en función del contenido de cal del mortero, de la aditivación de la cal y de la superficie específica.



Figura 5. 18 – Ensayo de ultrasonidos en continuo

### 5.6.1 Influencia del contenido de cal

En el gráfico de la figura 5.19 se muestran las curvas de evolución de la velocidad ultrasónica en continuo para los morteros MB1Na45-7, MB1Na45-14, con adición de cal, y para el mortero MC45-0 sin cal y que se toma como referencia.

En las curvas obtenidas para los tres morteros de los gráficos de la figura 5.19, se diferencian tres etapas. La primera corresponde a las primeras cuatro horas posteriores al mezclado (variable en función del mortero) y que se observa como un periodo en que la velocidad aumenta de manera lenta. La segunda etapa, comprendida entre las 4 y las 16 horas aproximadamente, se corresponde con la pendiente máxima de aumento de la velocidad, que está ligada con el proceso de hidratación de los silicatos y del CaO, tal como se ha visto en los ensayos del Método del molde mixto. Finalmente, la última etapa que se da a partir de las 16 horas, corresponde con el periodo de estabilización de la velocidad y es a partir de este momento en que el material ha reducido la velocidad de formación de

nuevos compuestos. En este instante se habría alcanzado el pico máximo de calor de la curva de hidratación del mortero y nos encontraríamos en el periodo de desaceleración.

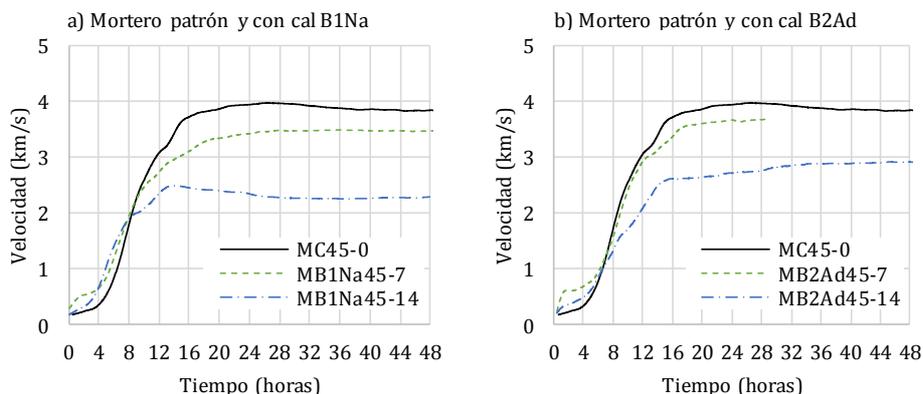


Figura 5.19 – Curvas de evolución de la velocidad de los US para el análisis de la influencia del aumento del contenido de cal a) morteros con cal B1Na y patrón y b) morteros con cal B2Ad y patrón

En la tercera etapa de las curvas se observa que cada una de ellas obtiene un valor distinto de estabilización. Los valores aproximados obtenidos para cada mortero son: 4km/s para el mortero MC45-0, 3,5km/s para el mortero MB1Na45-7 y 2,2km/s para el mortero MB1Na45-14. La tendencia que se observa al comparar los valores es que el aumento del contenido de cal reduce la velocidad final de los ultrasonidos.

El aumento de la velocidad ultrasónica a medida que se reduce el contenido de cal puede estar ligado a la porosidad de la mezcla. Esto se ha observado en la tabla 5.4 del apartado anterior en la que el aumento del contenido de cal generaba morteros más porosos, lo que reduce la velocidad de los ultrasonidos. Por otra parte, el aumento de la porosidad entre los tres morteros no parece ser el único factor que influya en el comportamiento observado en la figura 5.19 ya que la diferencia entre las curvas entre el mortero sin cal y el que contiene el 14% es del orden del 45%. En el caso de los morteros fabricados con la cal B2Ad mostrados en la figura 5.19b se observa el mismo comportamiento que para los realizados con la cal B1Na.

Para los dos morteros con adición de cal se observa, en la primera etapa, una primera pendiente que puede ser debida a la rápida precipitación de portlandita observada en el ensayo de DRX mostrado en el Capítulo 4. La precipitación de este compuesto generaría un aumento de las partículas sólidas en el medio, lo que facilitaría a las ondas ultrasónicas atravesar el espesor de la muestra en un menor tiempo.

### 5.6.2 Influencia de la aditivación de la cal

En la figura 5.20 se muestra la influencia de la aditivación de las cales en la velocidad de los ultrasonidos de los morteros ensayados. En la figura 5.20a se presentan los resultados para los morteros MA1Na45-7 y MA2Ad45-7 y en la figura 5.20b se muestran las curvas para los morteros MB1Na45-7 y MB2Ad45-7. En ambos gráficos se muestra también la curva del mortero de referencia MC45-0. El análisis de esta variable muestra que el mortero de referencia presenta valores superiores de velocidad, seguido del mortero con la cal aditivada y, finalmente, del mortero con cal

sin aditivar (MA1Na45-7). El mismo fenómeno se aprecia en el caso de los morteros realizados con las cales B.

En el caso del gráfico mostrado en la figura 5.20b se observa que los morteros con adición de cal presentan la misma curva hasta las diez horas, momento en el cual el mortero fabricado con la cal aditivada (MB2Ad45-7) obtiene valores superiores de velocidad. Según se ha visto en el Capítulo 4 de análisis de materiales, aunque la cal B2Ad presentaba un efecto retardante con respecto a la B1NA, esta primera presenta una mayor superficie específica. Es por este motivo que ambos morteros reproducen la misma forma, ya que el aumento de la superficie específica facilitaría la disolución de la cal y, aunque presentara el efecto retardante, contrarrestaría el efecto de la aditivación.

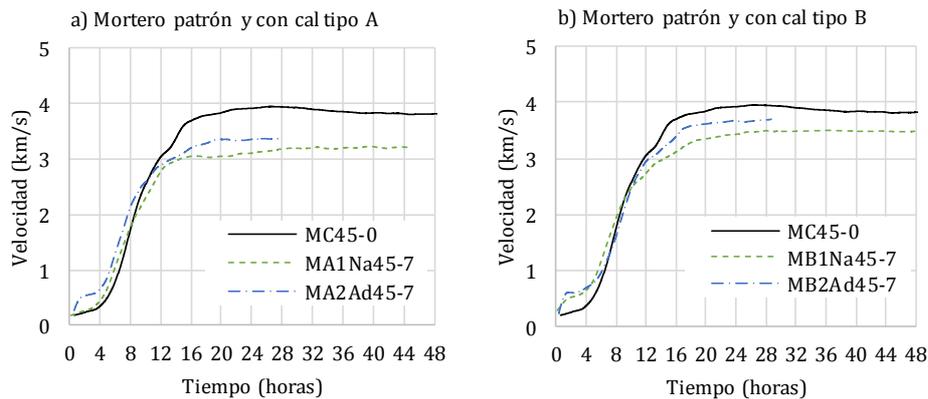


Figura 5. 20 - Curvas de evolución de la velocidad de los US para el análisis de la influencia de la aditivación de la cal

Para esta variable se observa que los morteros con las cales aditivadas presentan valores superiores de velocidad ultrasónica mientras que los morteros fabricados con la cal no aditivada son lo que obtienen valores inferiores. En el caso específico de la primera etapa de la curva se ha observado que se dan comportamientos distintos para cada tipo de cal usada, por lo que no se puede obtener una tendencia de este punto.

### 5.6.3 Influencia de la superficie específica

La última variable a analizar a partir de las muestras ensayadas es la influencia de la superficie específica. En la figura 5.21 se muestran las curvas para las dosificaciones MA2Ad45-7 y MA3Ad45-7 juntamente con la curva del mortero de referencia MC45-0. A diferencia del análisis de las variables anteriores, en este caso el mortero con la cal que presenta una mayor superficie específica llega a superar la velocidad alcanzada por el mortero de referencia y no llega a estabilizarse, sino que experimenta un proceso incremental de la velocidad.

En el caso de la primera etapa se da, en ambos casos, el fenómeno de un aumento rápido de la velocidad seguido de una cierta ralentización de esta. A continuación, se da el aumento más significativo de la velocidad y, en la última etapa, se observan dos tendencias distintas. En el caso del mortero MA2Ad45-7 la velocidad se estabiliza, mientras que para el mortero MA3Ad45-7 el fenómeno de estabilización no se da en el tiempo de medición contemplado en este estudio. Este comportamiento puede deberse a que el menor tamaño de las partículas de cal permite que esta siga reaccionando, aunque la cantidad de agua presente haya menguado significativamente debido a que

la medición se está dando en el periodo de desaceleración de la curva de calor de hidratación del mortero. Este aumento de la velocidad puede relacionarse con los resultados obtenidos de DRX en los que se observa que la curva de generación de portlandita para la pasta con la cal A3Ad no se estabiliza, por lo que más allá del período medido en dicho ensayo la formación de este compuesto continúa.

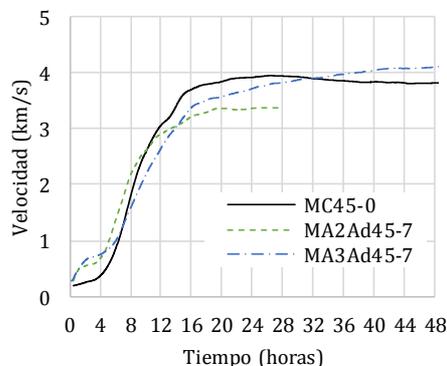


Figura 5. 21 – Curvas de evolución de la velocidad de los US para el análisis de la influencia de la superficie específica

## 5.7 Conclusiones parciales

En este apartado se definirán las conclusiones parciales obtenidas para entender el comportamiento en cuanto a la expansión libre y a las tensiones generadas en situación de deformación libre y de confinamiento, respectivamente.

Al evaluar los niveles de deformación obtenidos para el mortero de referencia, así como para los morteros con adición de cal, se ha observado que la adición de cal influye significativamente en los valores de deformación alcanzados. En este caso se ha visto como la adición de cal genera, de una manera efectiva, una expansión en los morteros que contenían esta adición, mientras que en el caso del mortero de referencia se ha observado la retracción característica que experimentan los materiales cementicios.

Los valores de expansión alcanzados al añadir un 7% de cal, independientemente del tipo, se encuentran entre 2,2mm/m y 4,3mm/m esto implica un incremento en relación al mortero de referencia de 650% y 1.175% respectivamente. En el caso del mayor contenido de cal añadido (14%) los valores de expansión aumentan hasta los 9,5mm/m de media, por lo que, en este caso, el incremento con respecto al mortero sin cal es de 2.475%. Cabe destacar que, aunque los valores de deformación son significativamente altos con respecto al mortero sin cal, en ninguna de las probetas ensayadas se observó fisuración o degradación del material como consecuencia de la expansión.

Al comparar los resultados de expansión de los morteros con cal, con respecto al mortero de referencia, se ha observa que los niveles de expansión obtenidos permiten contrarrestar la retracción de este último.

Por otra parte, se ha observado que en el caso de las tensiones medidas también existen diferencias significativas con el valor obtenido para el mortero sin adición de cal. Cabe destacar que al no estar configurado el ensayo para medir tensiones de tracción no puedo establecerse que el mortero sin cal estuviera experimentando este fenómeno. Lo que sí pudo establecerse es que no se dieron tensiones de compresión para el mortero de referencia.

Al comparar los niveles de tensión obtenidos para los morteros con el 7% de adición de cal, se obtuvieron valores máximos comprendidos entre 0,65MPa y 1MPa. En el caso de los morteros con el 14% de adición, estos valores aumentaron hasta el rango comprendido entre 1,6MPa y 2,26MPa. Acorde a la bibliografía consultada los valores de tensión para un hormigón de retracción compensada deben estar comprendidos entre 0,1MPa y 0,7MPa (Mehta & Monteiro, 2006). En este caso, los valores obtenidos se encuentran por encima de estos valores de referencia.

El aumento de la tensión interna de los morteros ensayados en condición de confinamiento no se ha traducido en daños físicos en la probeta obtenida. Es decir, el material no ha generado una tensión capaz de romper el molde o de fisurarse a sí mismo. Con base en estos resultados se establece que los morteros ensayados con adiciones del 7 y del 14% de cal sobre el peso del cemento son capaces de generar tensiones superiores a las mencionadas en la bibliografía sin fisurarse o dañar el molde del ensayo. En todo caso, se considera que un 7% de adición de cal sobre el peso del cemento a la dosificación es suficiente para obtener un mortero de retracción compensada.

En cuanto al conjunto de ensayos realizados, hay que mencionar que los ensayos normalizados existentes no permiten obtener datos fiables para la caracterización de este tipo de materiales. En la mayoría de estos ensayos la medición de las propiedades expansivas se inicia a las 24 horas del mezclado, tiempo en que han de permanecer en el molde. Tal como se ha observado para el ensayo realizado con la norma UNE 80113 la incongruencia de algunos resultados hizo plantear la hipótesis de que se estaba perdiendo una parte de la información durante las primeras 24 horas.

El Método del anillo, basado en un anillo metálico con galgas de medición adosadas en sus laterales, permitió corroborar la hipótesis de la pérdida de datos durante las primeras 24 horas posteriores del mezclado. Se observó que era durante este período en el que se estaba dando la mayor expansión del material. Por otra parte, la rápida degradación de este molde, junto con la dificultad de limpieza y manipulación, obstaculizaron su aplicación por lo que este método de ensayo se descartó.

El Método del molde mixto (deformación/tensión) basado en un molde metálico totalmente desmontable y en el que se podía ensayar el material en dos condiciones de contorno distintas permitió obtener resultados fiables y reproducibles de los morteros y solventar los problemas encontrados en el método del anillo. Además, el haber previsto que el hueco donde se introduce el material tuviera las mismas dimensiones que las probetas de la norma UNE-EN 196-1 para la caracterización de morteros, permitió ensayar posteriormente el material endurecido sin necesidad de alterar la probeta.

### 5.7.1 Interpretación global de las variables analizadas

En la tabla 5.7 se muestra la tendencia de cada una de las variables (aumento del porcentaje de cal, efecto de la aditivación de influencia de la superficie específica) en función del ensayo realizado (deformación libre, tensión y US en continuo). Las flechas mostradas en la tabla indican la tendencia de aumento (↑) o reducción (↓) de las variables ensayadas. A primera vista se observa que, para la deformación y la tensión, las tendencias son las mismas, mientras que los US en continuo presentan la tendencia inversa.

Ensayo	% cal	aditivación	Sup. específica
Deformación	↑↑	↓	-
Tensión	↑↑	↓	-
US continuo	↓↓	↑	↑

Tabla 5. 7 – Resumen de la influencia de las variables estudiadas para cada ensayo

En el caso específico de las propiedades obtenidas de las probetas provenientes de los ensayos de deformación y tensión se ha observado que no es posible determinar una tendencia general en cuanto a la influencia de cada una de las variables contempladas. En el caso del análisis del aumento de porcentaje de cal se observa que esta variable influye en mayor medida en la resistencia a compresión, obteniéndose valores menores con el aumento del porcentaje de cal. Así mismo, para los mayores porcentajes de cal se ha observado también leve aumento de la porosidad y una reducción de la velocidad de los ultrasonidos. En ningún caso se ha podido determinar la influencia de esta variable en la densidad de los morteros. Estas variaciones mencionadas se han observado para el ensayo de deformación libre, mientras que para el caso del mortero confinado no se han observado diferencias significativas. Finalmente, para la aditivación de las cales no se ha identificado ninguna tendencia para ninguno de los cuatro parámetros estudiados.



# 6

## Modelización de los procesos de reacción, deformación e incremento de la tensión en morteros con óxido de calcio

### 6.1 Introducción

Los resultados del capítulo anterior indican que las mezclas con adición de cal generan deformaciones y tensiones de confinamiento mayores a las de un cemento sin adición. La repercusión del uso de esta adición es determinante en el momento de diseñar estas mezclas, ya que la expansión generada puede llegar a tener repercusiones negativas en el material. Estas repercusiones pueden darse después del fraguado del material por la rotura de este debido a las tensiones internas, o en etapas posteriores debido a la existencia de CaO anhidro y que se hidrate cuando el material ha endurecido. Existen estudios en los que se ha modelizado el fenómeno de la expansión de la cal en materiales cementicios como por ejemplo los realizados por Courard *et al* y Chiaia *et al* (Chiaia *et al*, 2012; Courard, Degée, & Darimont, 2014). En concreto, en el estudio realizado por B. Chiaia *et al* se analiza el fenómeno de la expansión de la cal mediante elementos finitos evaluando la variación dimensional de la partícula. Mediante los resultados obtenidos y las ecuaciones planteadas realizaron aproximaciones de la deformación alcanzada. Se ha observado una falta de modelos asociados a la parte de las tensiones y al entendimiento de cómo estas se acumulan en el material. En este aspecto

se dan recomendaciones del rango de valores de tensión que ha de presentar un hormigón de retracción compensada como es el caso de los mencionados por Mehta *et al* (Mehta & Monteiro, 2006). Según los autores los valores de tensión asociados a estos hormigones se encuentran entre 0,1 y 0,7MPa. Los resultados de tensión obtenidos en el Capítulo 5 muestran que algunos de los valores alcanzados se encuentran dentro de los límites que marca la bibliografía para este tipo de materiales, aunque la mayoría los superan hasta alcanzar los 2MPa de tensión.

El objetivo principal de este capítulo es definir la relación entre los valores de la deformación libre y la tensión de confinamiento obtenidos mediante el ensayo del método del molde mixto y cuyos resultados han sido analizados en los apartados 5.4.1 y 5.4.2 del Capítulo 5.

Para dar respuesta a este objetivo se ha dividido el análisis en dos apartados principales. El primero se basa en el estudio de la deformación libre. Se trata de determinar la expansión que genera la cal a nivel químico, y compararlo con la deformación obtenida experimentalmente. De esta manera se pretende establecer el porcentaje de cal que realmente genera una deformación efectiva en el material. Asimismo, se ha procedido a parametrizar las curvas de deformación para determinar si existe una ecuación capaz de reproducir el comportamiento observado experimentalmente. Una vez establecida esta relación se plantea el segundo apartado que se basa en el estudio de la tensión generada. En este apartado se pretende determinar si la deformación obtenida experimentalmente se traduce en tensión, o si por el contrario también existe un amortiguamiento de los valores.

## 6.2 Planteamiento teórico de las deformaciones y las tensiones

Tal como se ha visto en el Capítulo 5, la adición de cal en los morteros genera unas deformaciones en estado libre y unas tensiones en estado confinado, el siguiente paso es determinar la relación entre ambos resultados. En la figura 6.1 se muestra un esquema representativo de las deformaciones existentes en el material, de la influencia de estas en las tensiones, así como la relación entre los parámetros de cálculo de cada una de ellas.

En la figura 6.1a se plantea la hipótesis de que en el material existen dos tipos de deformaciones denominadas: deformación potencial ( $\epsilon_p$ ) y deformación libre ( $\epsilon_l$ ). La deformación potencial corresponde con la deformación teórica que experimentaría el material si el total de la expansión generada por la hidratación de la cal se transformara en deformación. Esta deformación sería la máxima que podría experimentar el material. Por otra parte, la deformación libre se define como la deformación real medida experimentalmente, cuyo valor ha de ser inferior al de  $\epsilon_p$ . La diferencia entre el valor de  $\epsilon_p$  y de  $\epsilon_l$  se define con el concepto de *Amortiguamiento I*. Este engloba aquella parte del  $\text{Ca(OH)}_2$  que queda depositado en la microestructura y es acomodado de tal manera que no genera deformaciones. Por otra parte, también se enmarca dentro de este amortiguamiento la parte del  $\text{CaO}$  que no se hidrata y, por consiguiente, tampoco genera deformaciones. Con base en estas definiciones se plantea la hipótesis de que “no toda la cal añadida generará deformación libre”.

Una vez definida la deformación libre es necesario determinar que parte de esa deformación genera tensiones en el material. Esto es lo que se explica de manera gráfica en la parte inferior de la figura 6.1a que corresponde con el tramo de  $\epsilon_l$ . El tramo de la barra que engloba  $\epsilon_l$  se divide a su vez en dos tramos, el primero corresponde con el *Amortiguamiento II* y el segundo corresponde con la parte de la deformación que genera tensión en el material. Este segundo amortiguamiento no genera deformación, sino que está amortiguando las tendencias de expansión del material. Este está relacionado con la fluencia o deposición preferente del material en puntos de la matriz que no

acumulan tensión debido, precisamente, al efecto de las propias tensiones que hacen que parte del material se deposite en estos puntos. En este caso se plantea la hipótesis de que no toda la deformación libre medida experimentalmente se transformará en tensión efectiva.

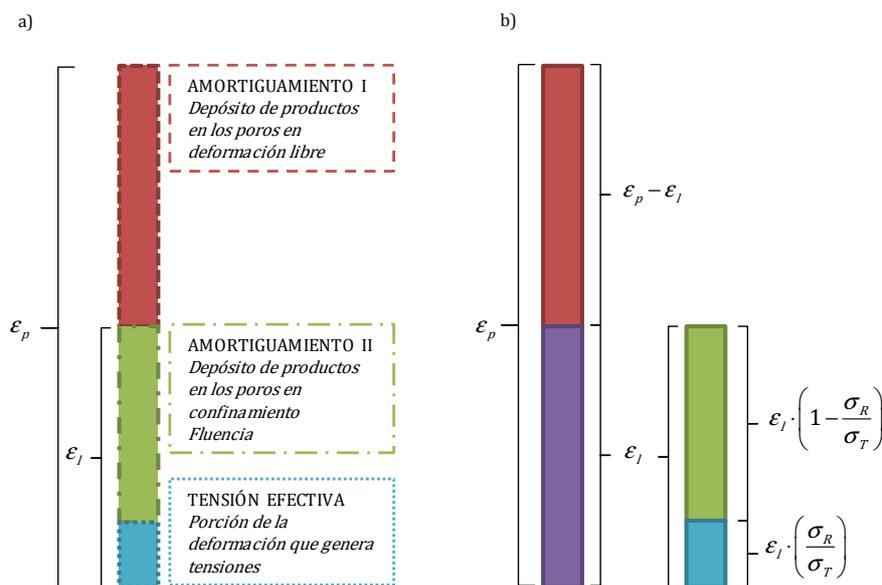


Figura 6.1 – Esquema representativo de la obtención de las deformaciones teóricas y reales

Una vez definidos los conceptos principales de este capítulo, en la figura 6.1b se presentan los parámetros de cálculo usados para su planteamiento numérico. En primer lugar, se observa que el *Amortiguamiento I* está relacionado directamente con la deformación y se obtiene de la resta entre la deformación potencial y la deformación libre. Por otra parte, los parámetros que aparecen en cada uno de los tramos de subdivisión de la deformación libre se definen de la siguiente manera:  $\sigma_R$  es el valor de la tensión real del mortero obtenido experimentalmente y  $\sigma_T$  corresponde con el valor de la tensión teórica obtenido mediante los modelos de aproximación definidos en apartados posteriores.

En el caso de la ecuación que se usa para definir el *Amortiguamiento II* se observa que se multiplica la deformación libre por el coeficiente entre la tensión real y la teórica restado de uno. En el caso de la franja de deformación que genera tensiones efectivas, únicamente se multiplica  $\epsilon_l$  por el mismo coeficiente anterior sin restarlo de uno. Al restar de la unidad el coeficiente, se discrimina entre la tensión efectiva y la amortiguada.

### 6.3 Estimación de la deformación potencial

#### 6.3.1 Hidratación de la cal

En este apartado se evalúa la capacidad expansiva de pastas con adición de cal. Mediante el cálculo teórico de la transformación de CaO en Ca(OH)<sub>2</sub> se analizará si los valores de portlandita obtenidos en los ensayos de DRX se acercan al valor teórico de cálculo obtenido.

Mediante la ecuación [6.1] se obtiene que para cada mol de CaO añadido se obtiene un mol de Ca(OH)<sub>2</sub>. Por otro lado, las masas molares del CaO y del Ca(OH)<sub>2</sub> son 56,0774g/mol y 74,0927g/mol, respectivamente. Teniendo en cuenta que se ha añadido un 7% (0,21g) y un 14% (0,42g) de CaO sobre el peso de cemento (3,0g) los valores de Ca(OH)<sub>2</sub> que deberían formarse en

cada pasta son los que se muestran en la columna “Ca(OH)<sub>2</sub> Teórico” de la tabla 6.1. En dicha tabla se muestran también los gramos reales de Ca(OH)<sub>2</sub> obtenidos a partir del ensayo de DRX a las 48 horas.



Dosificación	CaO añadido (%)	CaO (g)	Ca(OH) <sub>2</sub> Teórico (g)	Ca(OH) <sub>2</sub> Real (g-48h)
MC45-0	0	0	-	0,45 (15,0%)
PA1Na45-7	7	0,21	0,28	0,59 (19,5%)
PA2Ad45-7	7	0,21	0,28	0,47 (15,5%)
PA3Ad45-7	7	0,21	0,28	0,48 (16,0%)
PB1Na45-7	7	0,21	0,28	0,51 (17,0%)
PB2Ad45-7	7	0,21	0,28	0,48 (16,0%)
PB1Na45-14	14	0,42	0,55	0,66 (22,0%)
PB2Ad45-14	14	0,42	0,55	0,65 (21,5%)

Tabla 6. 1 – Relación entre el contenido inicial de CaO y el contenido final de Ca(OH)<sub>2</sub> formado a las 48 horas

Con base en los resultados obtenidos se observa que la cantidad real de Ca(OH)<sub>2</sub> formada es mayor a la teórica calculada a partir de la hidratación del CaO. Esto se debe a que la cantidad final de portlandita es el resultado de la suma de la porción formada por el CaO añadido y la porción que proviene de los silicatos, principalmente del C<sub>3</sub>S. Es decir, se establece la relación descrita en la ecuación [6.2].

$$CH_{\text{final\_DRX}} = CH_{\text{CaOañadido}} + CH_{(\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S})} \quad [6.25]$$

A partir de las curvas de disolución del CaO mostradas en el apartado 4.7 del Capítulo 4 se establece que la cantidad de CaO a las 24 horas del inicio del mezclado es igual a 0, por lo que se asume que todo el CaO se ha disuelto. Conocidos estos datos se establece que las cantidades de Ca(OH)<sub>2</sub> que corresponden a cada compuesto son las que se presentan en la tabla 6.2. En dicha tabla se muestra el listado de dosificaciones analizadas, la cantidad de Ca(OH)<sub>2</sub> real según el ensayo de DRX a las 48 horas, la cantidad de Ca(OH)<sub>2</sub> teórico procedente de la disolución completa del CaO añadido, la cantidad de Ca(OH)<sub>2</sub> formada por los silicatos y el porcentaje en que este valor se reduce al añadir cal al mortero. Como dato más destacado se observa que la cantidad de cal obtenida por parte de los silicatos es inferior en las pastas con adición de cal (columna “C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S”).

Dosificación	Ca(OH) <sub>2</sub> Real (g-48h)		Ca(OH) <sub>2</sub> Teórico (g)	C <sub>3</sub> S y C <sub>2</sub> S (g)	Reducción (%)	Sup. específica CaO (m <sup>2</sup> /g)	
MC45-0	0,45	=	0,00	+	0,45	-	-
PA1Na45-7	0,59	=	0,28	+	0,31	32,22	2,27
PA2Ad45-7	0,47	=	0,28	+	0,19	58,89	2,00
PA3Ad45-7	0,48	=	0,28	+	0,20	55,56	2,77
PB1Na45-7	0,51	=	0,28	+	0,23	48,89	2,12
PB2Ad45-7	0,48	=	0,28	+	0,20	55,56	2,55
PB1Na45-14	0,66	=	0,55	+	0,11	75,56	2,12
PB2Ad45-14	0,65	=	0,55	+	0,09	78,89	2,55

Tabla 6. 2 – Relación entre el Ca(OH)<sub>2</sub> proveniente de la hidratación del CaO y de los silicatos

Con la finalidad de visualizar de una manera más fácil los resultados obtenidos, estos se han representado gráficamente en la figura 6.3. En esta figura se muestran las cantidades de Ca(OH)<sub>2</sub>

formado en gramos (figura 6.3a) y los valores porcentuales absolutos (figura 6.3b) para cada una de las pastas analizadas.

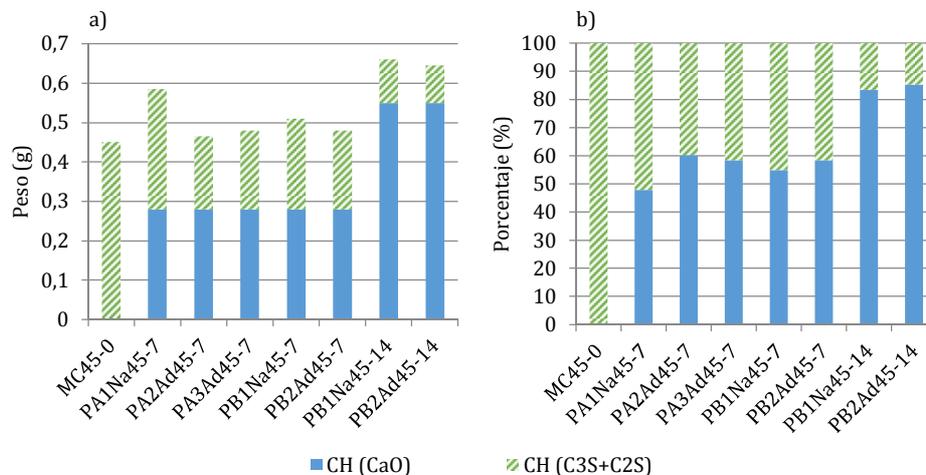


Figura 6.2 - Cantidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que aporta el  $\text{CaO}$  y los silicatos a las 48 horas del inicio del mezclado; a) valores en gramos b) valores porcentuales absolutos

En la figura 6.2a, se observa que la presencia de cal reduce de manera significativa la cantidad de portlandita formada por los silicatos. Se observa que del 100% de portlandita formada por los silicatos en la dosificación de referencia (MC45-0), al añadir cal, este porcentaje se reduce más del 50%. Esta diferencia se hace más patente en las dosificaciones que contienen un 14% de adición de cal en las que el porcentaje absoluto de portlandita formada supera el 80% del total. Como ya se comentó en capítulos anteriores, la reducción de la cantidad de portlandita formada por los silicatos puede deberse a la inhibición de la disolución de estos por la presencia de portlandita procedente de la hidratación de la cal (Patrick Juilland et al., 2010).

Al analizar las variables específicas del tipo de cal, se observa que existe una influencia de la aditivación de la cal añadida. Así, al comparar las pastas con las cales A1Na y A2Ad y, por otra parte, B1Na y B2Ad, se observa que la cantidad de portlandita formada por los silicatos es menor en las pastas que contienen la cal aditivada (2Ad). Este fenómeno puede estar vinculado a la inhibición de la disolución de los silicatos por la presencia de  $\text{CaO}$ . Las cales aditivadas tardan más en disolverse, por lo que la presencia de portlandita en el medio permanecerá durante un período de tiempo mayor y de manera más constante.

El incremento de la superficie específica genera un incremento en la cantidad de portlandita formada por los silicatos del cemento. En este caso, aunque la cal A3Ad es aditivada, el aumento de la superficie específica con respecto a su homóloga A2Ad, permite que esta se hidrate de una manera más rápida y el medio quede saturado con respecto a la portlandita dificultando la disolución de los silicatos.

Finalmente, al analizar el gráfico de la figura 6.2b se observa que cada una de las cales influye de manera distinta en el porcentaje final de portlandita formado por cada fase. Así, en la dosificación con la cal A1Na cada fase aporta aproximadamente el 50% de la portlandita total. En el resto de dosificaciones con el 7% de adición el porcentaje de portlandita formado por los silicatos se reduce hasta el 40% en el menor de los casos. Las cales con el 14% de cal, como se ha comentado al inicio de la explicación, solamente un 20% de la portlandita proviene de los silicatos. Todos estos resultados son acordes a los valores finales de alita mostrados en el Capítulo 4, dónde se observó que

efectivamente el remanente de alita es superior en las dosificaciones con adición de cal con respecto a la de referencia.

### 6.3.2 Estimación de la expansión generada

Una vez obtenida la cantidad de portlandita generada por la adición de cal y por los silicatos presentes en el cemento, es necesario determinar la expansión teórica que puede llegar a generar este compuesto y compararlo con la deformación real obtenida mediante el ensayo del método del molde mixto. Según Nagataki *et al* (Nagataki & Gomi, 1998) el volumen de  $\text{Ca(OH)}_2$  es aproximadamente el doble del de la partícula original de  $\text{CaO}$ , valor que se obtiene de dividir el volumen molar del  $\text{Ca(OH)}_2$  entre el volumen molar del  $\text{CaO}$  (tabla 6.3).

Propiedad	CaO	Ca(OH) <sub>2</sub>
Peso molar (g/mol)	56,08	74,09
Densidad específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,33	2,24
Volumen molar (cm <sup>3</sup> /mol)	16,80	33,10

Tabla 6.3 – Propiedades del  $\text{CaO}$  y del  $\text{Ca(OH)}_2$  (Courard *et al.*, 2014)

Con la finalidad de obtener el valor de la expansión para cada uno de los morteros estudiados se aplican las ecuaciones [6.3] a [6.6]. Estas ecuaciones se han obtenido del estudio realizado por J.R. Clifton *et al* y R. Tixier *et al* (Clifton & Pommersheim, 1994; Tixier & Mobasher, 2003). En ambos estudios se usa la ecuación [6.5] para obtener la deformación volumétrica que produce un ataque sulfático en el hormigón. Esta ecuación ha sido usada también en la tesis doctoral de F. Pardo (Pardo, 2014) para caracterizar la expansión de la calcita en presas de hormigón.

Aunque las ecuaciones originales plantadas por los autores se usaron para caracterizar la expansión producida por el ataque sulfático, en esta tesis se han adaptado para determinar la influencia de la cal, ya que, por analogía, el  $\text{CaO}$  también genera expansión al hidratarse. A diferencia del ataque sulfático, la expansión producida por el  $\text{CaO}$  es favorable para el tipo de material estudiado.

$$CaO_{libre} = \frac{\%CaO_{añadido} \cdot D_{cemento}}{M_{CaO_{libre}}} \quad [6.26]$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_{productos} - V_{reactivos}}{V_{reactivos}} = \frac{V_{Ca(OH)_2} - V_{CaO}}{V_{CaO}} \quad [6.27]$$

$$\varepsilon_v = [CaO_{libre}] \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot (a^{CaO} \cdot m^{CaO}) - f\Phi \quad [6.28]$$

$$Expansión_{lineal} = \frac{\varepsilon_v}{3} \quad [6.29]$$

El primer paso consiste en calcular la cantidad de óxido de calcio libre presente en el material según la ecuación [6.3]. Este valor se obtiene de multiplicar el porcentaje de cal libre presente en la mezcla ( $\%CaO_{añadido}$ ) por los kilogramos de cemento por metro cúbico ( $D_{cemento}$ ) y dividir el producto por la masa molar del  $\text{CaO}$  ( $M_{CaO_{libre}}$ ). El segundo paso es calcular la variación volumétrica esperable en el material mediante la ecuación [6.4], donde  $\Delta V/V$  es la variación de volumen entre reactivos y

productos,  $V_{productos}$  es el volumen en  $\text{g/cm}^3$  del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $V_{reactivos}$  es el volumen del  $\text{CaO}$  en las mismas unidades.

La expansión volumétrica del material se calcula mediante la ecuación [6.5]. Además de los dos parámetros calculados anteriormente, en esta ecuación interviene también  $a^{CaO}$  que es el coeficiente estequiométrico entre los moles de  $\text{CaO}$  y moles de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que para este caso es 1, ya que 1 mol de  $\text{CaO}$  equivale a 1 mol de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;  $m^{CaO}$  que se define como el volumen molar del  $\text{CaO}$  y  $f$  representa la porción de porosidad que se llena y está asociado con el amortiguamiento de la expansión. Según Tixier *et al* (Tixier & Mobasher, 2003) el rango de valores para este parámetro está comprendido entre 5% y 40%. Finalmente,  $\Phi$  representa la porosidad del material. Para este caso se han usado los datos de porosidad obtenidos para las probetas en deformación libre que se encuentran en la tabla 5.5 del Capítulo 5. Finalmente, para obtener la deformación lineal a partir de la deformación volumétrica se aplica la ecuación [6.6].

En la tabla 6.4 se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación [6.6]. En esta tabla se muestran los valores usados para las ecuaciones anteriores, el resultado teórico calculado mediante la ecuación [6.6] y el resultado real obtenido mediante el ensayo del molde metálico a las 48 horas del inicio del ensayo.

Dosificación	Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	CaO (%)	$\Phi$ (%)	$f$ (%)	Expansión Teórica (mm/m)	Expansión Real (mm/m)
MA1Na45-7	530,23	7	16,42		4,81	4,37
MA3Ad45-7	529,60	7	15,91	13	4,75	2,82
MB1Na45-7	530,13	7	16,40		4,82	3,04
MB2Ad45-7	530,08	7	15,89	-----	5,04	2,22
MB1Na45-14	517,63	14	16,96	23	10,29	9,19
MB2Ad45-14	517,55	14	17,30		10,02	9,84

Tabla 6. 4 - Parámetros para la obtención de la expansión teórica. Resultados teóricos y reales

En la tabla 6.4 se observa que el valor de  $f$  es distinto para cada uno de los porcentajes de cal añadido. Teniendo en cuenta que el ratio de disolución de la cal es el mismo, la cantidad de esta fase disuelta en los morteros con el 14% de adición es mayor que para los que contienen el 7% en el mismo tiempo. Esto se ha observado en los resultados de DRX, en los que las 24 horas del inicio del mezclado toda la cal se había disuelto independientemente del porcentaje de cal añadido en la pasta. Por lo que, durante la fase plástica de la mezcla, se amortigua una mayor cantidad de portlandita en las dosificaciones con el 14% de cal. Al variar los valores de  $f$  se consigue una mayor aproximación a los resultados reales para cada una de las dosificaciones. Así se obtiene que la diferencia entre los valores de expansión teóricos y los medidos se encuentra entre 0,4 y 2,8mm/m para los morteros con el 7% de cal, y entre 0,2 y 1,1mm/m para los que contienen un 14% de adición. La ecuación [6.5] se planteó para determinar la expansión que generan las partículas al expandir en un medio sólido, es decir, cuando el material ya ha fraguado.

Con tal de obtener los valores reales de expansión a partir de la ecuación [6.6] es necesario multiplicar el resultado por un coeficiente  $K_b$ . Este se obtiene de dividir la expansión real entre la teórica. En la tabla 6.5 se muestran los valores de este coeficiente y, a su vez, en la ecuación [6.7] se muestra la ecuación final para calcular la expansión real de en los morteros estudiados.

	MA1	MA3	MB1	MB2	MB1'	MB2'
$K_D$	0,91	0,59	0,63	0,44	0,89	0,98

Tabla 6. 5 - Valores  $K_D$  para la obtención de la deformación real

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_v \cdot k_D}{3} \quad [6.30]$$

## 6.4 Análisis y modelización de las curvas de expansión

### 6.4.1 Parametrización de las curvas de deformación

Una vez obtenidas las curvas de deformación mediante el método del molde mixto, se pretende obtener una ecuación analítica que permita reproducir las curvas de deformación libre con base en las características de deformación que estas presentan. Mediante el software OriginPro8.6 se ha obtenido la ecuación de la curva de regresión de los morteros con adición de cal (ecuación [6.8]).

$$y = A2 + \frac{A1 - A2}{1 + (x/x_0)^p} \quad [6.31]$$

Los parámetros presentes en la ecuación [6.8] se definen de la siguiente manera:  $A1$  representa el valor de “y” en el eje de ordenadas;  $A2$  es el valor asintótico de la curva;  $x_0$  representa el punto de cambio de pendiente y, finalmente,  $p$  es un factor que controla la forma de la sigmoide. En la figura 6.3 se define gráficamente la influencia de cada uno de los parámetros en las curvas. En cada uno de los gráficos se ha substituido el valor del parámetro a analizar por los valores que se muestran en su leyenda, asimismo, las flechas mostradas en cada gráfico indican la evolución en el comportamiento de la curva a medida que se aumenta el valor del parámetro.

En la figura 6.3a se observa que la variación del parámetro  $A1$  modifica el punto en que la curva interseca con el eje de ordenadas ( $y$ ). Como consecuencia, se modifica la pendiente del tramo central hasta alcanzar el valor constante de la curva, que no se ve modificado. Por otra parte, en la figura 6.3b se observa que la variación del parámetro  $A2$  modifica el valor en el cual la curva se estabiliza. Los valores introducidos en la ecuación para el parámetro  $A2$  son los mismos en que la curva se estabiliza en el eje de ordenadas.

En la figura 6.3c se muestra que el parámetro  $p$  influye principalmente en la pendiente del tramo central de la curva cuyo punto pivote se encuentra en el punto medio del valor absoluto de la suma de  $A1$  y  $A2$ . Se observa que los valores bajos de  $p$  presentan curvas cuyo tramo central inicia antes y en las que se tarda más en alcanzar el valor de la estabilización. Por otra parte, a medida que el valor de  $p$  aumenta, el inicio de la pendiente central se retrasa, la pendiente de este tramo aumenta y se alcanza antes la estabilización de la curva en su valor máximo. Cabe destacar que los valores superiores a 6 no introducen modificaciones significativas en la curva, ya que todas ellas (valores de 6 a 12) se encuentran casi solapadas en el gráfico. Finalmente, en la figura 6.3d se observa que el parámetro  $x_0$  tiene un comportamiento parecido a  $p$  pero sin un punto pivote central. En este caso, el aumento en el valor de la variable genera curvas en las que la pendiente del tramo central se retrasa

y su valor se reduce. Asimismo, el aumento del valor de este parámetro retrasa el punto de estabilización de la curva.

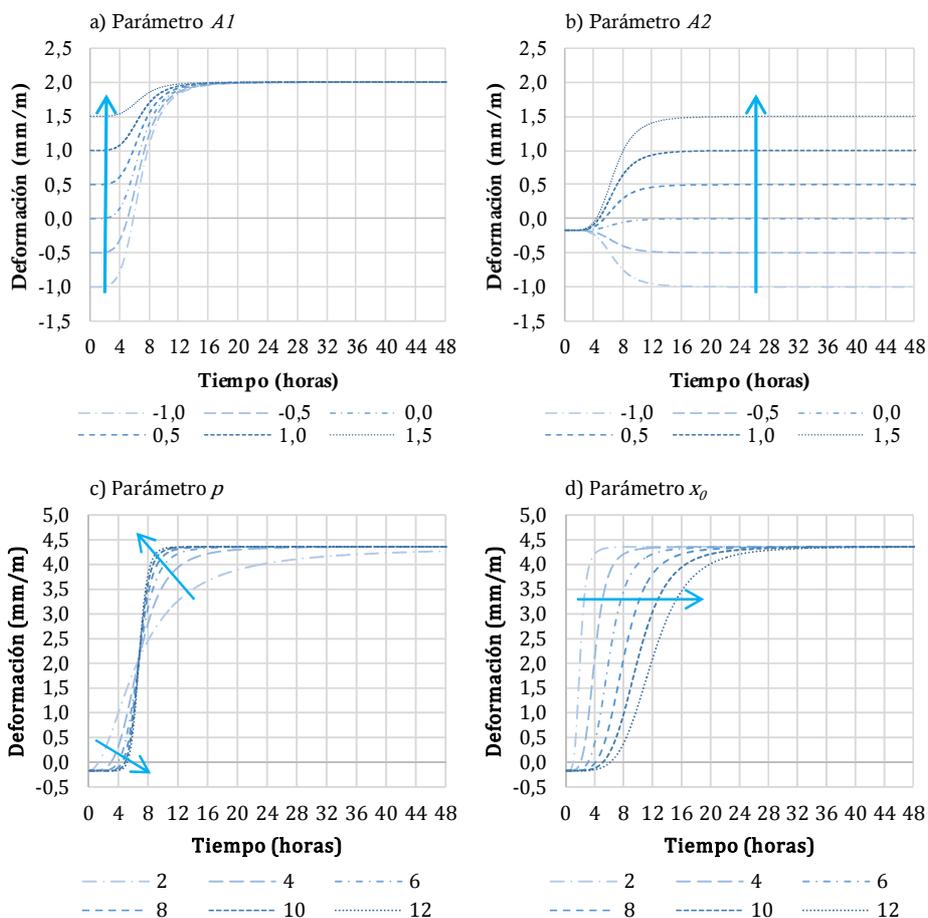


Figura 6.3 - Influencia de los parámetros  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $p$  y  $x_0$  en las curvas

A manera de ejemplo, en la figura 6.4 se muestra la curva real de deformación obtenida experimentalmente junto con la obtenida mediante la ecuación [6.8] para el mortero MA1Na45-7. Se observa que la curva teórica reproduce de una forma análoga la curva experimental desde el inicio de la expansión del material, es decir, una vez superado la primera fase de retracción. Se observa que la ecuación no es capaz de reproducir la primera fase de retracción de la curva comprendida entre el inicio de la medición y el valor máximo de retracción.

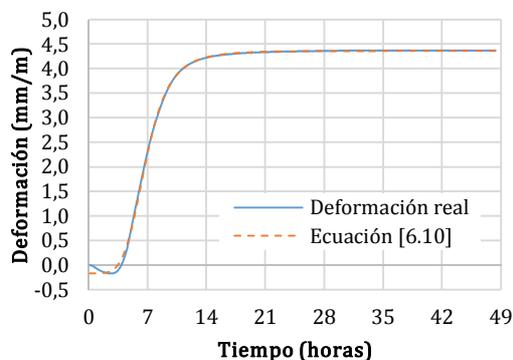


Figura 6.4 - Curva de deformación real vs. Curva obtenida con la ecuación [6.8] para el mortero MA1Na45-7

Los parámetros obtenidos para cada una de las curvas de deformación de los morteros con cal, a partir de la ecuación [6.8], son los que se muestran en la tabla 6.6. En la tabla se muestra además el valor de  $R^2$  que representa el ajuste entre la curva real y la teórica. Para las curvas analizadas se observa que la ecuación reproduce de manera precisa la forma de la curva experimental, ya que todos los valores se encuentran por encima de 0,99.

Dosificación	A1	A2	x0	p	R2
MA1Na45-7	-0,17	4,36	6,79	4,87	0,9995
MA3Ad45-7	-0,40	2,81	9,09	7,87	0,9983
MB1Na45-7	-0,27	3,03	7,14	4,90	0,9992
MB2Ad45-7	-0,36	2,22	8,44	6,44	0,9988
MB1Na45-14	-0,40	9,13	8,27	5,08	0,9996
MB2Ad45-14	-0,13	9,81	8,51	6,35	0,9999

Tabla 6. 6 - Valor de los parámetros de la ecuación [6.8] de las curvas de deformación de los morteros

En la tabla 6.6 se observan grupos de datos con valores cercanos al comparar los mismos parámetros. Por ejemplo, los valores de los parámetros  $A1$ ,  $x_0$  y  $p$  son similares en los morteros MA1Na45-7 y MB1Na45-7 y por otra parte en los morteros MA3Ad45-7 y MB2Ad45-7. Con base en los resultados de la tabla 6.6 se han definido valores constantes para algunos de los parámetros, mediante la agrupación de morteros con valores similares, con la finalidad de simplificar la ecuación. Los valores de los parámetros de cada una de las ecuaciones se han obtenido de la media de los valores de cada uno de los grupos de morteros que se muestran en la tabla 6.7.

Parámetros	Ajuste 1		Ajuste 2		Ajuste 3			Ajuste 4			
	MA1Na45-7	MB1Na45-7	MA3Ad45-7	MB2Ad45-7	MA1Na45-7	MB1Na45-7	MB1Na45-14	MA3Ad45-7	MB2Ad45-7	MB1Na45-14	MB2Ad45-14
A1	-0,22	-0,22	-0,40	-0,40	-0,30	-0,30	-0,30	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40
A2	4,40	3,00	2,81	2,22	4,40	3,00	9,13	2,81	2,22	9,13	9,81
x0	7,00	7,00	8,80	8,80	7,00	7,00	7,00	8,50	8,50	8,50	8,50
p	4,90	4,90	7,20	7,20	4,90	4,90	4,90	6,40	6,40	6,40	6,40

Tabla 6. 7 - Valores de los parámetros de la ecuación [6.8] para los morteros estudiados agrupados según los ajustes de las curvas realizados

En la tabla 6.7 se muestran los valores de los parámetros  $A1$ ,  $x_0$  y  $p$  para cada grupo de morteros. El valor de  $A1$  influye en la forma de la curva pero dadas las características de los morteros estudiados se puede considerar un mismo valor en cada uno de los ajustes realizados. El valor de  $x_0$  es muy similar entre los morteros de cada uno de los grupos por lo que la influencia de este parámetro no será significativa en el conjunto de la ecuación para el caso estudiado. Finalmente, cabe destacar que el parámetro  $p$  presenta una variación pequeña entre las muestras por lo que también se puede fijar su valor al valor medio de los morteros agrupados. En el caso específico del parámetro  $A2$  su ajuste resulta inviable para los grupos de morteros analizados. Esto se debe principalmente a que su valor indica la deformación máxima alcanzada para cada mortero. Con el propósito de no modificar valor se han mantenido los datos iniciales obtenidos para este parámetro (tabla 6.6). En los siguientes apartados se exponen los resultados obtenidos para cada uno de los ajustes realizados.

a) Ajuste 1 y 2

En la figura 6.5 se muestran las curvas reales medidas experimentalmente y las teóricas, basadas en las regresiones a partir de la ecuación propuesta, para los morteros MA1Na45-7 y MBNa45-7. De esta manera se pueden comparar visualmente los resultados de sustituir los parámetros del *Ajuste 1* en la ecuación [6.8].

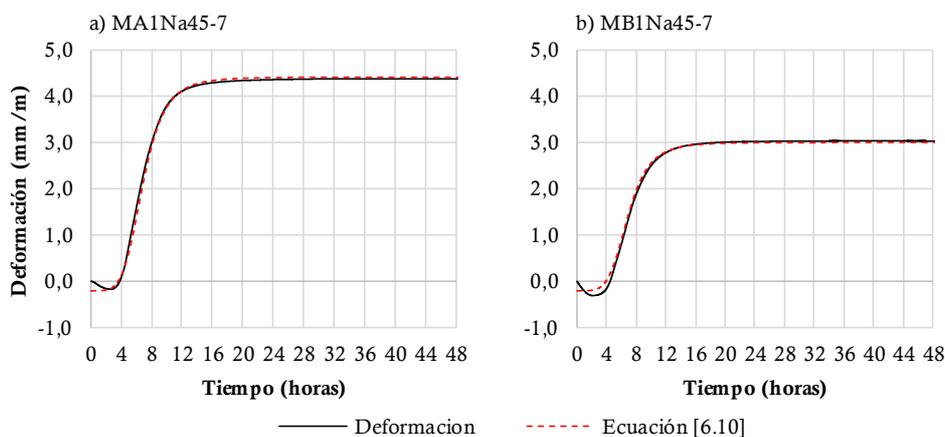


Figura 6. 5 – Curva de deformación experimental y teórica con los parámetros de la tabla 6.6 de los morteros MA1Na45-7 y MB1Na45-7 (*Ajuste 1*)

En la figura 6.5 se observa que la ecuación con los parámetros propuestos reproduce de una manera precisa las curvas originales de deformación en los morteros estudiados partir del momento en que las deformaciones son positivas. Los parámetros  $A1$ ,  $x_0$  y  $p$  calculados a partir de la media de los dos valores del *Ajuste 1* son capaces de adaptar la curva teórica de regresión a la curva real de tensión para ambas curvas.

Las curvas de tensión reales y las de regresión para los morteros MA3Ad45-7 y MB2Ad45-7 son las que se muestran en la figura 6.6. En el caso del *Ajuste 2*, al introducir los parámetros mostrados en la tabla 6.7 en la ecuación [6.8] se observa el mismo comportamiento que para el *Ajuste 1*.

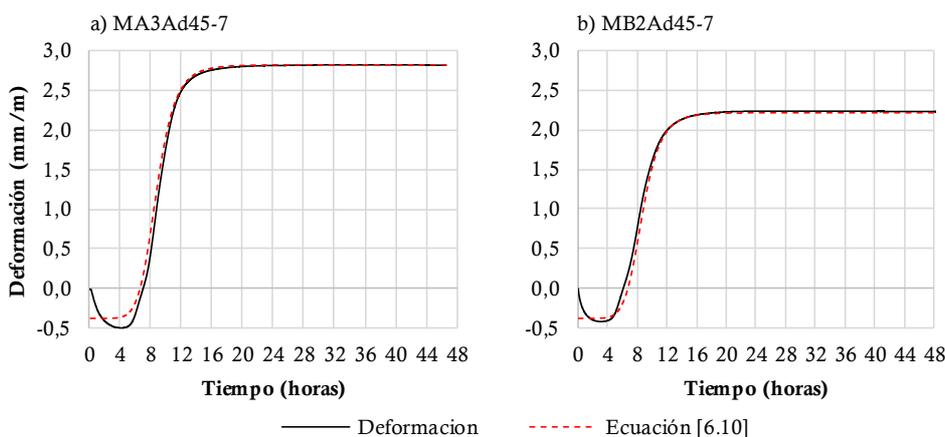


Figura 6. 6 – Curva de deformación experimental y teórica con los parámetros de la tabla 6.7 de los morteros MA3Ad45-7 y MB2Ad45-7 (*Ajuste 2*)

b) Ajuste 3

El *Ajuste 3* de las curvas contempla los tres morteros con las cales no aditivadas (1Na) para los dos porcentajes de cal añadidos. En la figura 6.7 se muestran los resultados de las curvas reales de deformación junto con las regresiones calculadas a partir de los parámetros de la tabla 6.7.

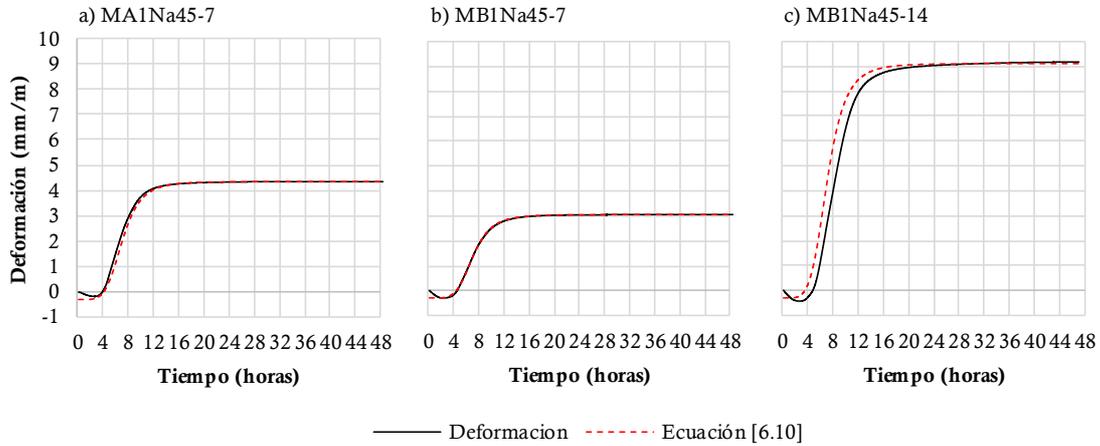


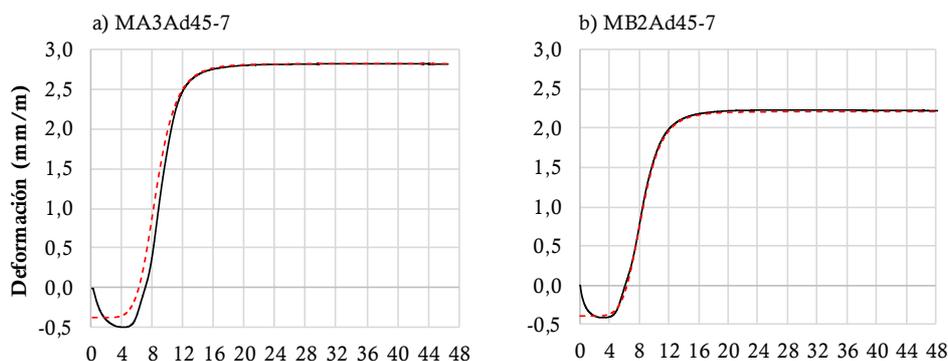
Figura 6.7 – Curva de deformación experimental y teórica con los parámetros de la tabla 6.7 de los morteros MA1Na45-7, MB1Na45-7 y MB1Na45-14 (*Ajuste 3*)

En la figura 6.7c se observa que la curva de regresión, en su período de rápido aumento de la deformación, se adelanta a la curva de deformación real del mortero MB1Na45-14. Para esta curva, el parámetro  $x_0$  no se ajusta a la curva real de deformación. En el caso del *Ajuste 3* los valores obtenidos no permiten reproducir las curvas de deformación de los tres morteros.

c) Ajuste 4

Finalmente, se han analizado los morteros Ad45-7 y los Ad45-14 con tal de determinar la viabilidad de obtener una única ecuación capaz de reproducir el comportamiento de las cuatro dosificaciones. En la figura 6.8 se muestra el resultado de aplicar la ecuación [6.8] a las curvas originales de deformación usando los parámetros obtenidos para el *Ajuste 4* mostrados en la tabla 6.7.

En los cuatro gráficos de la figura 6.8 se observa que las curvas de regresión teóricas reproducen correctamente las obtenidas experimentalmente. Con base en estos resultados se observa que para el mortero MB1Na45-14, aunque esté fabricado con una cal no aditivada (1Na), los parámetros que mejor la ajustan son los presentados para el *Ajuste 4*.



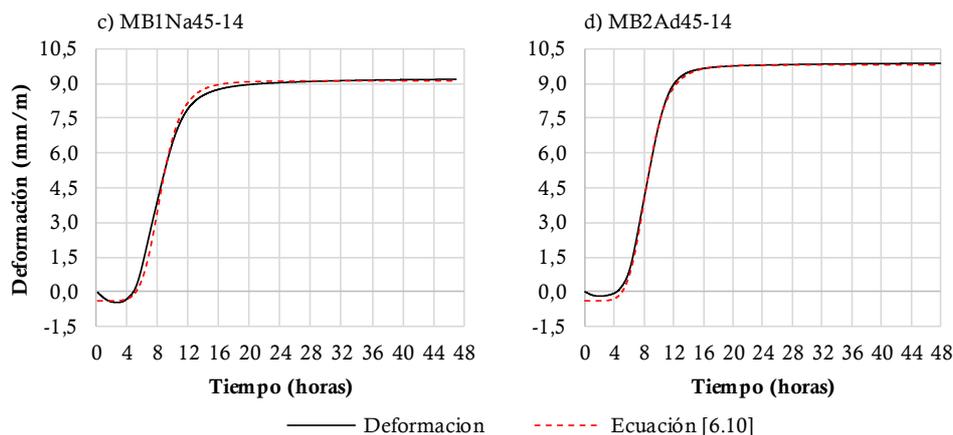


Figura 6. 8 – Curva de deformación experimental y teórica de los morteros MA3Ad45-7, MB2Ad45-7, MB1Na45-14 y MB2Ad45-14 (Ajuste 4)

d) Resultados

Una vez definida la viabilidad del uso de las ecuaciones mostradas en este apartado se resume que todas ellas pueden agruparse en dos ecuaciones, que son la [6.9] y la [6.10]. La primera para los morteros tipo 1Na45-7 y la segunda para el resto de morteros estudiados.

$$y = A2 + \frac{(-0,22) - A2}{1 + (x/7)^{4,9}} \tag{6.32}$$

$$y = A2 + \frac{(-0,4) - A2}{1 + (x/8,5)^{6,4}} \tag{6.33}$$

Una vez analizadas todas las curvas de deformación se ha observado que el parámetro A2 es el más decisivo en cuanto a la adaptación de la curva. Este parámetro, como ya se ha definido anteriormente, es el que define el valor asintótico de cada una de las curvas. El resto de parámetros, teniendo en cuenta las características de las curvas, tienen una influencia menor en el ajuste entre la curva de regresión y el resultado experimental. El valor A1, que define el punto de corte con el eje vertical, no influye significativamente en la forma de la curva, únicamente se observa el desfase con respecto a la curva original debido a que esta tiene una pequeña retracción que la ecuación [6.8] no es capaz de reproducir. Por otra parte, los valores de x0 y p, que definen el punto de cambio de pendiente y la forma de la curva, respectivamente, han podido ajustarse a un único valor en cada una de las ecuaciones.

El punto de cambio de pendiente varía entre las dosificaciones con cal no aditivada (1Na) y las que sí que la tienen (Ad). En el caso de los morteros con el 14% de adición de cal se ha observado que ambas curvas pueden ajustarse igual que las dosificaciones Ad45-7, por lo que el porcentaje de cal no influye significativamente en la forma de la curva.

## 6.5 Ajuste de las curvas de expansión mediante ensayos de calorimetría y vicat

En este apartado se define la interacción entre los valores de calorimetría y temperatura de hidratación, vicat y deformación. Cabe destacar que los ensayos de calorimetría y vicat se realizaron con pastas de cemento, mientras que el ensayo de deformación, en el que también se midió la temperatura de hidratación, se realizó con morteros.

La comparación de los resultados entre pastas y morteros mostrará diferencias en cuanto a los tiempos en que se den los picos de temperatura y calorimetría principalmente debido a la configuración del ensayo usado en cada caso. Los ensayos de calorimetría se realizaron en condiciones adiabáticas, mientras que la temperatura se midió *in situ* en la probeta durante el ensayo del método del molde mixto. En todo caso, el componente que genera la reacción exotérmica en el material es el cemento y la cal, por lo que, en el caso de los morteros, al no reaccionar el árido químicamente con los materiales anteriores, no se producirá ninguna otra reacción que añada calor o varíe las curvas de temperatura.

### a) Análisis de la evolución de la temperatura y de la deformación

En el apartado 5.4.1 del Capítulo 5 se ha introducido de manera general la existencia de una relación entre la curva de deformación y la de temperatura de los morteros. En este apartado se parte de esta relación para estudiarla con mayor profundidad y analizar la evolución de las fases presentes en las pastas y su influencia en el proceso de expansión de los morteros. En la figura 6.9 se muestran nuevamente las curvas de deformación y temperatura de hidratación del mortero MB1Na45-7 junto con los tiempos de inicio (IF) y de final de fraguado (FF). Las flechas que aparecen en el gráfico muestran el punto en que se toma la medición del porcentaje de cada una de las fases (estos datos se muestran posteriormente en la tabla 6.8).

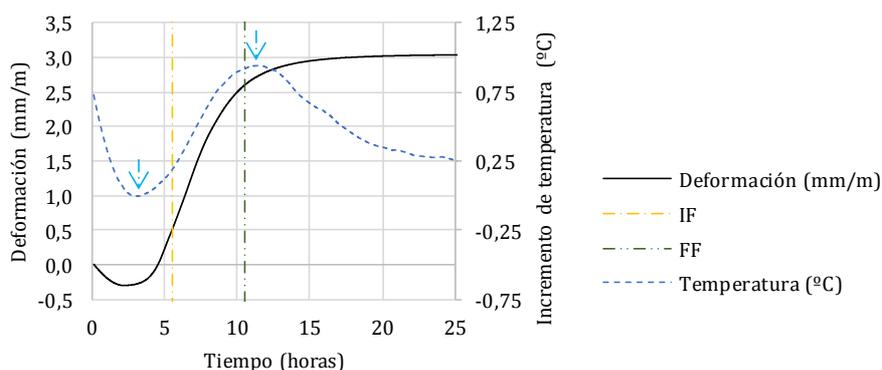


Figura 6. 9 – Gráfico de interacción de las curvas de temperatura, deformación y tiempos de inicio (IF) y final de fraguado (FF) para el mortero MB1Na45-7

Al relacionar la curva de temperatura mostrada en la figura 6.9 con la de calor de hidratación mostrada en el apartado 4.6 del Capítulo 4, para la misma pasta, se establece que el período en que se da el rápido aumento de la temperatura corresponde con el mismo período de aceleración de la curva de calor de hidratación de un cemento convencional (tabla 5.1 - Capítulo 5). En la figura 6.10 se muestra la curva de deformación junto con la de flujo de calor de la misma pasta así como los tiempos de inicio (IF) y de final de fraguado (FF). Se observa que existe un desfase entre la

deformación y la etapa de aceleración de la curva de flujo de calor. Este desfase se atribuye a que los datos que se obtienen de cada ensayo son distintos (calorimetría isotérmica y temperatura *in situ*) además de las condiciones de contorno de cada uno de ellos mencionadas al inicio del apartado.

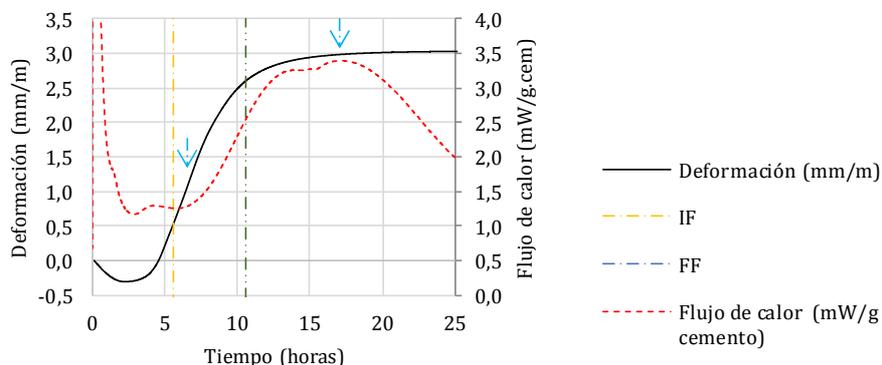


Figura 6. 10 – Gráfico de interacción de las curvas de flujo de calor, deformación y tiempos de inicio y final de fraguado para el mortero MB1Na45-7

Al comparar el período de aceleración de la curva de temperatura y la de flujo de calor, y establecer que el pico máximo de la curva de temperatura corresponde con el pico máximo de flujo de calor, se pueden obtener los porcentajes de cada una de las fases en dichos puntos. Esto es posible mediante la comparación de la curva de flujo de calor con los ensayos de DRX expuestos en el Capítulo 4. Los puntos comparados son los que se marcan con una flecha en la figura 6.10.

En la tabla 6.8 se presentan los datos de tiempos de fraguado, tiempos del período de deformación y porcentajes de fases de cada uno de los morteros analizados. Los tiempos de fraguado corresponden a los obtenidos para el ensayo de Vicat expuestos en el apartado 4.5 del Capítulo 4. La columna correspondiente a los tiempos de deformación presenta el momento en que se inicia el período de expansión de la curva y el momento en que se alcanza el máximo y se estabiliza. Finalmente, se muestran los porcentajes de cada una de las fases analizadas para los tiempos de deformación.

Dosificación	Tiempos de Fraguado (h)		Tiempos de Deformación (h)		Fases (%)					
	Inicio	fin	inicio	fin	CaO		Alita		Ca(OH) <sub>2</sub>	
					inicio	fin	inicio	fin	inicio	fin
MC45-0	9:15	14:35	5:07	17:50	0,0	0,0	40,0	21,5	0,2	11,5
MA1Na45-7	5:30	7:30	4:30	11:30	1,5	0,5	39,0	26,0	4,5	11,5
MA3Ad45-7	7:40	8:30	8:00	15:30	0,8	0,3	32,5	25,0	3,1	10,0
MB1Na45-7	5:30	10:30	6:30	13:30	1,0	0,4	38,0	27,5	5,0	12,5
MB2Ad45-7	6:40	8:15	7:20	14:00	1,5	0,3	46,0	34,0	2,7	10,0
MB1Na45-14	3:55	8:55	1:16	9:30	>4,6	1,1	*45,0	26,0	*5,0	15,5
MB2Ad45-14	5:11	9:10	2:00	12:00	>5,2	0,8	>43,0	28,5	*5,0	15,0

\* valores aproximados de las fases debido a que para dichos tiempos no se han obtenido datos de DRX

Tabla 6. 8 – Valores de alita, CaO y Ca(OH)<sub>2</sub> al inicio y al final de la pendiente máxima de deformación

Los tiempos de fraguado mostrados en la tabla 6.8 se han analizado en el apartado correspondiente del Capítulo 4. En este caso, al compararlos con los tiempos en que se da la deformación se observa que existen diferencias significativas en algunos de los casos. Estas

diferencias se deben a que el parámetro que se mide es distinto en cada uno de ellos. Mientras que los tiempos de fraguado vienen dados por una norma en función de la resistencia a la penetración de una aguja en el material, los tiempos de deformación se asocian a la hidratación de las fases y al proceso de expansión que el CaO experimenta a medida que el medio va endureciendo. De esta manera es de esperar que los tiempos finales de deformación sean mayores a los de final de fraguado, tal como se observa en la tabla 6.8.

En cuanto a los tiempos de inicio de la deformación se observa que, en todos los casos, los morteros con adición de cal, inician la deformación antes que el mortero de referencia. Por otra parte, los morteros con cal aditivada inician este proceso más tarde que sus homólogos con cales sin aditivar. El mismo fenómeno se observó para los tiempos de fraguado. En cuanto a los tiempos de final de deformación se observa la misma tendencia que para los iniciales en cuanto a la influencia de la aditivación. En estos casos, los morteros con las cales aditivadas tardaran más en iniciar el proceso de expansión y, al ser más lentos, tardaran más en estabilizarlo.

En el caso del CaO, el porcentaje presente al inicio de la deformación es aproximadamente 1% para los morteros con el 7% de cal y superior a 5% en el caso de las dosificaciones con el 14% de adición. Esto implica que al añadir una menor cantidad de cal a la mezcla se consigue que esta se disuelva más rápidamente ya que el medio se encuentra menos saturado. Al finalizar el proceso de expansión, el porcentaje de CaO remanente es inferior a 0,5% para los morteros con un 7% de adición de cal y es inferior a 1% en el caso de los que contienen el 14% de adición. En el caso de la cal, el porcentaje medido tanto al inicio como al final de la deformación es inferior al 1% lo que dificulta la identificación de tendencias en cuanto a la influencia de las características de las cales.

En el caso de la alita se observa que tanto al inicio como al final del proceso de expansión los valores medidos se encuentran generalmente por encima del valor de la referencia lo que está relacionado con la inhibición de la disolución de los aluminatos con la presencia de cal expuesto en el Capítulo 4.

Finalmente, el porcentaje de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formado al inicio del proceso de deformación es superior a la dosificación de referencia, a excepción de las dos dosificaciones con el 7% de cal aditivada. Al final del proceso de deformación, el porcentaje de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formado en las dosificaciones con adición de cal es inferior al contenido medido para la referencia, a excepción de las pastas con el 14% de adición. Esto implica que la portlandita sigue formándose en etapas posteriores, ya que tal como se ha visto en los ensayos de DRX analizados en el Capítulo 4, a las 48 horas su contenido es superior al de la dosificación de referencia.

La portlandita formada antes del inicio de la deformación está relacionada con la parte de esta fase que queda amortiguada por la matriz. Al calcular el porcentaje de esta fase con respecto a su máximo se observa que aproximadamente entre un 30% y un 40% de la portlandita no genera una deformación efectiva. Estos porcentajes son superiores a los del mortero sin cal en el que únicamente un 2% de la portlandita queda amortiguada. Esto se debe a que en los morteros con cal se amortigua la portlandita procedente de la adición de cal, mientras que en el mortero de referencia es la portlandita que precipita por la hidratación de los silicatos.

## 6.6 Modelo numérico para la determinación de la tensión

En este apartado se estudia el proceso mediante el cual se generan tensiones internas en el material a partir de las deformaciones observadas en el ensayo del método del molde mixto. El procedimiento de análisis para la obtención de las curvas de tensión teóricas es el que se muestra en la figura 6.11.

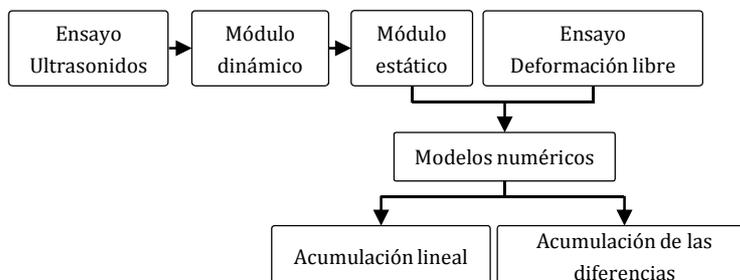


Figura 6. 11 – Esquema del planteamiento de los modelos numéricos a partir de los ensayos de ultrasonidos y de deformación

En la figura 6.11 se observa que en el planteamiento de los modelos numéricos existe una primera parte que es común. Se trata de la obtención del módulo de elasticidad estático. Este se calcula a partir del módulo de elasticidad dinámico que se obtiene mediante los resultados del ensayo de ultrasonidos en continuo. Las curvas de regresión obtenidas a partir de los modelos numéricos planteados se compararán con los valores reales de tensión obtenidos a partir del método del molde mixto. En los siguientes sub-apartados se expone el proceso de cálculo del módulo de elasticidad estático, así como el de los dos modelos numéricos.

### b) Determinación del módulo de elasticidad estático a partir del ensayo de ultrasonidos

El módulo de elasticidad dinámico puede determinarse a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de ultrasonido en continuo analizado en el apartado 5.6 del Capítulo 5, mediante la ecuación [6.11] (Rosell & Cantalapiedra, 2011; Urtubey, Loréfice, Etse, Universidad, & Santiago, 2002). En esta ecuación,  $V$  se define como la velocidad ultrasónica expresada en m/s,  $E_d$  se define como el módulo de elasticidad dinámico en kg/ms<sup>2</sup>,  $\nu$  es el valor de Poisson del material que para este cálculo se ha tomado un valor de 0,25 y, finalmente,  $\delta$  corresponde con la densidad del material expresada en kg/m<sup>3</sup>. Todos los parámetros se calculan en función del tiempo para poder determinar la evolución del módulo a medida que el mortero endurece.

$$V(t) = \sqrt{\frac{E_d(t) \cdot (1-\nu)}{\delta(t) \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad [6.34]$$

Para aplicar la ecuación [6.11] es necesario conocer la densidad del material en continuo. En este caso resultó inviable la determinación de este valor de manera continua, por lo que para este análisis se usan las densidades que corresponde con el parámetro  $\sigma$  obtenidas en el ensayo del método del molde mixto definidas en la tabla 5.5 del Capítulo 5. Se toma como densidad de partida un valor de 2.200kg/m<sup>3</sup> que corresponde con la densidad aproximada de una pasta de cemento en estado fresco. El resultado de la resta de ambos valores se divide entre el número total de intervalos de tiempo de la curva de velocidad para obtener una evolución lineal de la densidad.

Una vez definido el valor de  $E_d$  en función del tiempo se procedió a obtener el módulo de elasticidad estático ( $E_e$ ) a partir de la ecuación [6.12]. El parámetro  $\alpha$  es el coeficiente que multiplicado al módulo dinámico nos da como resultado el módulo estático. Los valores del coeficiente  $\alpha$  están comprendidos entre 0,5 y 0,8, y para este estudio se ha establecido un valor de 0,5.

$$E_e(t) = E_d(t) \cdot \alpha \quad [6.35]$$

### c) Modelo de acumulación lineal

El modelo de acumulación lineal asume que toda la expansión generada se transforma en tensión teniendo en cuenta el módulo en el instante  $t$ . Se basa en la obtención de la curva de regresión de la tensión a partir de la multiplicación directa del módulo elástico por la deformación real obtenida en el ensayo del método del molde mixto según la ecuación [6.13].

$$\sigma_{teórica}(t) = E_{estático}(t) \cdot \varepsilon_{real}(t) \quad [6.36]$$

Los parámetros mostrados en la ecuación [6.13] se definen como:  $\sigma_{teórica}(t)$  es el valor de la tensión,  $E_{estático}(t)$  corresponde con el módulo elástico calculado según el apartado a) y, finalmente,  $\varepsilon_{real}(t)$  es el valor de la deformación obtenido experimentalmente. Todos los parámetros se calculan para cada instante de tiempo de la curva del ensayo de ultrasonidos. En la figura 6.12 se muestran los resultados obtenidos de aplicar la ecuación [6.13] para los morteros MA1Na45-7 y MB2Ad45-14.

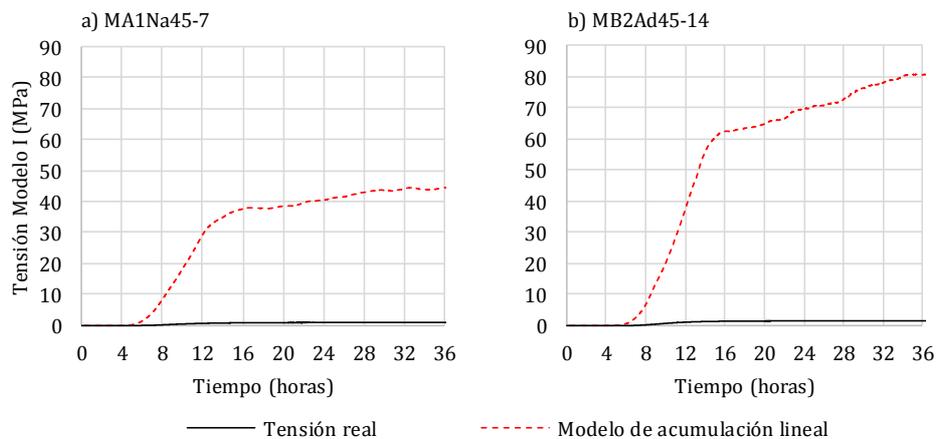


Figura 6.12 – Resultados obtenidos al aplicar el Modelo de acumulación lineal en los morteros MA1Na45-7 y MB2Ad45-14

El uso de la ecuación [6.13] para las curvas mostradas en la figura 6.12, que son representativas del resto de morteros estudiados, se observa que esta no es capaz de reproducir la forma de la curva de tensión. Por otra parte, los valores de tensión alcanzados mediante el modelo presentan diferencias significativas con respecto a los valores reales. Se observa que en el caso de la figura 6.12a, que corresponde con el mortero MA1Na45-7, el valor máximo de tensión a las 36 horas es de 45MPa, mientras que el valor real es de 0,65MPa. Lo mismo ocurre al analizar el mortero MB2Ad45-14 mostrado en la figura 6.12b, en el que la diferencia entre el valor real y el obtenido mediante el modelo es de 78Mpa.

Los resultados de este modelo muestran que, aunque es capaz de reproducir la cinética de generación de tensión del mortero real, los valores obtenidos difieren en gran medida de los reales y

no es capaz de reproducir la estabilización de la tensión. La diferencia entre los resultados numéricos está relacionada directamente con el valor de la deformación usado para su cálculo. Al inicio del capítulo se ha planteado la hipótesis de que no toda la deformación libre se transforma en tensión efectiva, lo que puede ser la causa de las diferencias entre la curva de regresión y la real. Por otra parte, la variación de la forma de la curva de regresión con respecto a la real puede deberse al error introducido al calcular el módulo mediante una aproximación lineal de la densidad del material. Este error se va acumulando a medida que se avanza en el tiempo y puede ser el causante de que la curva de regresión no llegue a un valor asintótico.

d) Modelo de acumulación de las diferencias

La segunda propuesta de aproximación al modelo se basa en la utilización de los mismos parámetros que para el modelo de acumulación lineal pero tomando como referencia intervalos consecutivos de tiempo. En este caso no se considera que toda la deformación produce una tensión proporcional al módulo en un momento determinado, sino que la tensión se va incrementando proporcionalmente al módulo que hay en cada instante. El cálculo se ha obtenido de la multiplicación del valor medio del módulo en un intervalo de tiempo por el valor de la deformación que se ha producido en ese mismo intervalo. Una vez obtenida la tensión del intervalo se ha sumado la tensión obtenida para el intervalo de tiempo anterior.

La ecuación usada para la aproximación a este modelo es la [6.14], donde  $\epsilon_n$  se define como el valor de la deformación en un instante de tiempo,  $\epsilon_{n-1}$  es la deformación en el instante de tiempo inmediatamente anterior y  $E_n$  y  $E_{n-1}$  corresponden con el módulo de elasticidad estático calculado según el apartado a) para los mismos instantes de tiempo que las deformaciones. Finalmente,  $\sigma_{n-1}$  es el valor de la tensión del instante de tiempo inmediatamente anterior.

$$\sigma_n = \left[ (\epsilon_n - \epsilon_{n-1}) \cdot \left( \frac{E_n + E_{n-1}}{2} \right) \right] + \sigma_{n-1} \tag{6.37}$$

Al igual que para el Modelo de acumulación lineal, en la figura 6.13 se muestra la comparación entre la curva real de tensión de los morteros MA1Na45-7 y MB2Ad45-14 y la curva correspondiente calculada mediante la ecuación [6.14].

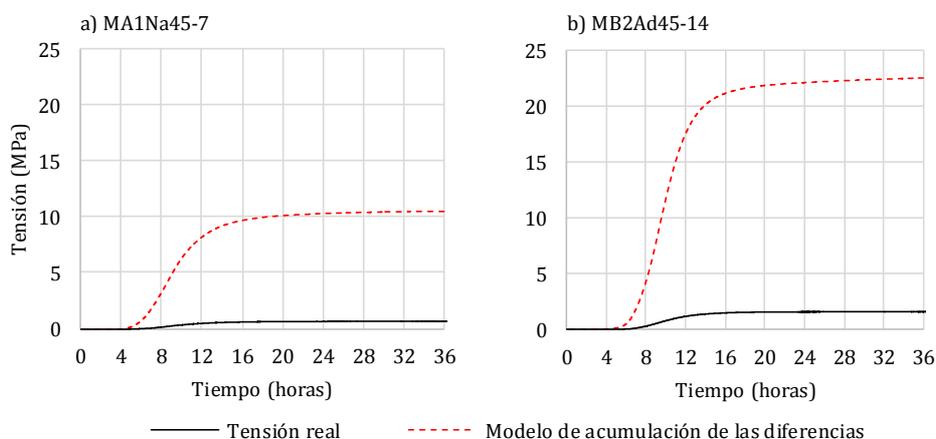


Figura 6. 13 – Resultados obtenidos al aplicar el Modelo de acumulación de las diferencias en los morteros MA1Na45-7 y MB2Ad45-14

En la figura 6.13 se observa que este modelo permite un mayor ajuste de la forma de la curva de tensión real de los morteros con respecto al modelo de acumulación lineal. A diferencia de este último, el modelo de acumulación de diferencias consigue reproducir la etapa de estabilización final de la tensión. En este modelo se mantiene el mismo error en el cálculo de la tensión que el descrito para el modelo de acumulación lineal, por una parte, los valores de la deformación usados y por otra el error introducido al calcular la densidad en continuo. El cálculo mediante intervalos de tiempo de este modelo permite reducir de manera consecutiva la influencia del módulo en la ecuación, así como reducir los valores de la tensión teórica. Teniendo en cuenta las mejoras obtenidas, la aplicación de la ecuación [6.14] tampoco se ajusta numéricamente a los valores reales de tensión, por lo que la hipótesis inicial del amortiguamiento de la deformación quedaría corroborada.

### 6.6.1 Análisis

Visto el mejor resultado obtenido con el modelo de acumulación de las diferencias se procede a aplicar este modelo para definir los parámetros de ajuste entre las dos curvas. En cuanto al desfase existente entre la curva de regresión y la real se plantea el uso de un coeficiente de amortiguamiento que permita esta adaptación. Este coeficiente indica, a través ratio entre la tensión real ( $\sigma_R$ ) y la tensión teórica ( $\sigma_T$ ), cuanto de la deformación libre se traduce de una manera efectiva en tensión. Este paso es el que se ha mostrado en la figura 6.1b mediante la aplicación de la ecuación [6.15]. Al dividir los valores de  $\sigma_R$  por los de la curva del modelo de acumulación de las diferencias ( $\sigma_T$ ) se obtienen los coeficientes por los que hay que multiplicar los valores de deformación real. Estos coeficientes son los que se muestran en la tabla 6.9.

$$\varepsilon = \varepsilon_j \cdot \left( \frac{\sigma_R}{\sigma_T} \right) \quad [6.38]$$

	MA1	MA3	MB1	MB2	MB1'	MB2'
$K_T$	0,06	0,05	0,10	0,07	0,07	0,07

Tabla 6. 9 - Valores de los coeficientes para la asimilación a la curva real de tensión

Una vez obtenido los valores de los coeficientes ( $K_T$ ) es necesario modificar la ecuación [6.14] para que los valores de deformación obtenidos mediante dicha ecuación permitan determinar de una manera directa la tensión real alcanzada. Esta quedaría tal como se define en la ecuación [6.16], donde el parámetro  $K_T$  corresponde con el valor del coeficiente correspondiente de la tabla 6.9. Finalmente, en la figura 6.14 se muestran las curvas de tensión real de los morteros MA1NA45-7 y MB2Ad45-14 junto con las de regresión calculadas a partir de la ecuación [6.16].

$$\sigma_n = \left[ [(\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \cdot k_T] \cdot \left( \frac{E_n + E_{n-1}}{2} \right) \right] + \sigma_{n-1} \quad [6.39]$$

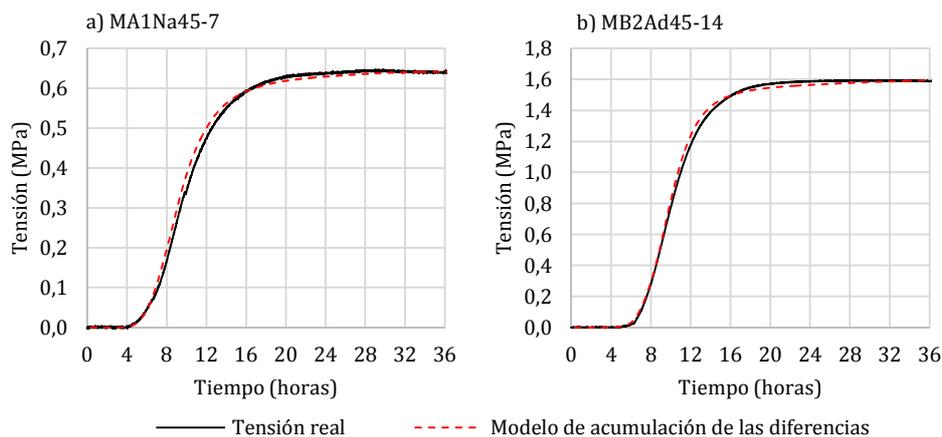


Figura 6.14 – Resultados obtenidos al aplicar la ecuación [6.16] para la determinación de la tensión en los morteros MA1Na45-7 y MB2Ad45-14

En la figura 6.14 se observa que la ecuación [6.16] reproduce de una manera ajustada la curva real de tensión obtenida experimentalmente. En este caso se valida el uso del modelo de acumulación de las diferencias junto con el coeficiente  $K_T$  para la determinación de la tensión en los morteros estudiados.

## 6.7 Conclusiones parciales

Este capítulo se ha basado en el estudio de las deformaciones y de las tensiones de los morteros mediante la parametrización de las mismas y el planteamiento de un modelo que permite explicar el comportamiento observado en la campaña experimental. Las conclusiones principales obtenidas de estos estudios son las que se enumeran a continuación.

- Se verifica la hipótesis de que no todo el CaO añadido, al transformarse en  $\text{Ca(OH)}_2$ , genera expansión efectiva. Es decir, se ha demostrado que la cantidad de portlandita teórica formada a partir de los gramos de CaO añadidos a la mezcla no se transforma en expansión real. Se ha observado que los valores teóricos son superiores a los reales, por lo que parte de la expansión generada queda amortiguada en la microestructura.
- Mediante la parametrización de las curvas de deformación, ha sido posible obtener dos ecuaciones capaces de reproducir la forma de las curvas experimentales. Por otra parte, no se ha podido determinar la influencia del tipo de cal y del porcentaje de adición en las ecuaciones, ya que los valores de los parámetros mostrados se agrupan en dos ecuaciones, una para los morteros MA1Na45-7 y MB1Na45-7 y otra para los morteros MA3Ad45-7, MB2Ad-457, MB1Na45-14 y MB2Ad45-14. De la ecuación planteada se ha determinado que el parámetro que tiene una mayor influencia en las curvas es el denominado  $A_2$ . Para este parámetro no se ha podido establecer una constante aplicable a todas las mezclas ya que su valor corresponde al punto de estabilización de la deformación en el eje de ordenadas y varía para cada mortero, es decir, el parámetro define la deformación máxima del mortero.
- La obtención de los valores de las fases presentes en las mezclas al inicio y al final del proceso de deformación han mostrado distintos fenómenos. En primer lugar,

se ha observado que casi un 80% de la cal se ha consumido en el momento en que se empieza a medir la deformación, y en este mismo instante se ha formado una media de 35% de portlandita para cada uno de los morteros con cal con respecto a su porcentaje a las 48 horas. Según estos datos la portlandita formada antes del inicio de la deformación queda amortiguada por la matriz y no genera deformación efectiva, tal como se planteó al inicio del capítulo.

- Finalmente, de los dos modelos planteados el Modelo de acumulación de las diferencias reproduce de una manera más veraz la forma de la curva real de tensión obtenida experimentalmente. En este caso se valida también la hipótesis de partida que planteaba que no toda la deformación medida generaría tensión. Mediante los valores resultantes de la aplicación del modelo y los obtenidos experimentalmente se ha obtenido un coeficiente que al introducirlo en la ecuación es capaz de reproducir los resultados reales.

# 7 | Experiencias reales del HRC en elementos de hormigón

## 7.1 Introducción

A diferencia de las mezclas realizadas en un laboratorio, en las que se pueden controlar las condiciones ambientales y de ejecución, en una obra el ritmo de trabajo es distinto, así como el procedimiento de mezclado, la puesta en obra y las condiciones climáticas, que pueden variar en pocas horas.

En este caso resultaba improbable que los operarios no realizaran modificaciones en el hormigón o que se pudieran prever condiciones óptimas de puesta en obra y curado. Por este motivo se optó por adaptar el material a las condiciones de contorno previsibles en la obra. Un total de 22 obras fueron realizadas durante el período comprendido entre abril de 2013 y noviembre de 2014. En la tabla 7.1 se presenta la relación de experiencias ordenadas por fechas de realización. Además se muestran los datos completos de identificación, así como el elemento que se ha hormigonado y el volumen (superficie y espesor) del elemento.

Ref. Obra	Data	Obra	Localidad	Elemento	Sup. (m <sup>2</sup> )	Grosor (cm)	Anchura (m)
1	27.04.13			losa	380		30,0
2	28.04.13	Vinagreres		pasillo	33	17	1,5
3	25.10.13		Pacs del Penedès	blandón	45	22	3,2
4	31.10.13	Cales de Pachs (C. de P.)	(P. del P.)	aparcamiento	380		10,2
5	31.10.13			aparcamiento	32	20	7,0
6	14.11.13	Farinera	Els Monjos	Losa entrada	125		5,0
7	15.11.13	C. de P.	(P. del P.)	Carril báscula	165		2,5
8	11.12.13	Rasos de	Ciutat Meridiana	Plaza	340		10,0
9	11.12.13	Paguera nº 97	(C.M.)	Entrada plaza	80	15	10,0
10	12.12.13	Planta Betón	Montcada i Reixac	Prueba	2 m <sup>3</sup>		
11	13.12.13	Farinera	Els Monjos	Reparación zanja	60	20	0,75
12	18.12.13	R.P. nº 97	(C.M.)	Carril	105	15	2,5
13	19.12.13	Mas la Creu	Pla del Penedès	Pavimento sótano	200	10	10,0
14	20.12.13	Farinera	Els Monjos	Reparación rasa	45	20	0,75
15	19.03.14	Túnel N-240	Borges Blanques	Canal 80 m largo	400	10	5,0
16	2.04.14/ 4.04.14	Nave Ochoa	Cornellá	Carriles de 2,5m	1300	9	2,5
17	10.04.14	Acera Nave	La Munia	Acera de 15 m	2 m <sup>3</sup>	16	0,8
18	11.04.14			Losa sin cortar	403	17	15,0
19	29.04.14	Vinagreres	(P. del P.)	Losa comparación	900		20,3
20	30.04.14			Losa comparación	850	19	25,3
21	30.09.14	Lluís de Borrassa	Barcelona	Zanja	64 m	80	0,6
22	19.11.14	Vallvidriera	Barcelona	Zanja	100 m	15-20	0,2

Tabla 7. 1 – Relación de experiencias realizadas con HRC

Hay que señalar que mayoritariamente las experiencias han sido en el exterior, con espesores de 15 a 22 cm, siendo este espesor función del tipo de tráfico superior, en general, tráfico de camiones. Mientras que en las experiencias en interiores (Obras nº 13, 15 y 16) el espesor se ha situado entre 9 y 10 cm, debido a que las cargas de tráfico son menores. Las experiencias se han ajustado a las técnicas usuales para cada uno de los tipos de aplicaciones, sin intentar cambiar las mismas. El análisis que se realiza con posterioridad en el apartado 7.2, no se trata de una descripción de las obras recogidas en el Anejo A2, sino un análisis de las enseñanzas adquiridas realizado por variables principales.

### 7.1.1 Materiales y dosificaciones

En la tabla 7.2 se muestran las dosificaciones de los hormigones usados para cada una de las obras. La nomenclatura de las dosificaciones es acorde con la norma de hormigón estructural española EHE-08. En la columna de cemento se muestran los kilos de este junto con su clase resistente. A continuación se muestra la relación a/c y los kilos de cal introducidos, junto con el porcentaje que dicho valor representa por kilo de cemento (% spc). Finalmente se muestra la cantidad de fibras usadas, así como el tipo.

Ref	Suministrador	Nomenclatura <sup>1</sup>	Dosificación (kg/m <sup>3</sup> )					Tipo
			Cemento	a/c	Cal (% spc)	Fibras		
1	PROMSA	HM-20/20/B	230 (42,5)	0,58	12,0	(5,22%)	0,6	mFPp <sup>2</sup>
2	PROMSA	HM-20/20/B	230 (42,5)	0,58	12,0	(5,22%)	0,6	mFPp
3	BETON	HM-50/15/F	450 (52,5)	0,33	33,3	(7,40%)	4,5	MFPe <sup>3</sup>
4	BETON	HM-35/12/F	350 (52,5)	0,43	25,0	(7,14%)	0,9	mFPp
5	BETON	HM-50/15/F	450 (52,5)	0,33	33,3	(7,40%)	1,2	mFPp
6	BETON	HM-35/20/F	350 (52,5)	0,43	25,0	(7,14%)	0,6	mFPp
7	BETON	HM-50/15/F	450 (52,5)	0,33	37,5	(8,33%)	1,2	mFPp
8	BETON	HM-20/20/B	235 (52,5)	0,58	16,6	(7,06%)	0,9	mFPp
9	BETON	HM-30/20/B	330 (52,5)	0,47	21,0	(6,36%)	0,9	mFPp
10	BETON	HM-50/12/F	450 (52,5)	0,33	37,5	(8,33%)	1,2	mFPp
11	BETON	HM-35/20/F	350 (52,5)	0,43	28,5	(8,14%)	0,9	mFPp
12	BETON	HM-50/12/F	450 (52,5)	0,33	37,5	(8,33%)	1,2	mFPp
13	BETON	HM-30/20/B	300 (52,5)	0,58	25,0	(8,33%)	0,9	mFPp
14	BETON	HM-35/20/F	350 (52,5)	0,43	28,5	(8,14%)	0,9	mFPp
15	BETON	HM-30/20/B	330 (52,5)	0,50	30,0	(9,09%)	-	--
16	BETON	HM-20/20/B	235 (52,5)	0,58	15,6	(6,64%)	20,0	F + ME <sup>4</sup>
17	UNILAND	HM-20/B/20/I	245 (42,5)	0,65	25,0	(10,20%)	-	-
18	UNILAND	HM-20/B/20/I	245 (42,5)	0,65	25,0	(10,20%)	15,6	F.acero
19	UNILAND	HM-20/B/20/I	245 (42,5)	0,65	25,0	(10,20%)		ME
20	UNILAND	HM-20/B/20/I	245 (42,5)	0,65	-	-		ME
21	PROMSA	HM-20/B/20/I	235 (42,5)	0,66	25,0	(10,64%)	-	-
22	PROMSA	HM-20/B/20/I	235 (42,5)	0,66	25,0	(10,64%)	-	-

<sup>1</sup> Según EHE-08 (Art. 39.2); <sup>2</sup> microfibra de polipropileno; <sup>3</sup> macrofibras de polietileno; <sup>4</sup> malla electrosoldada

Tabla 7.2 – Dosificación de los hormigones

Es necesario mencionar que debido a la distinta localización de las obras fueron necesarios tres suministradores de hormigón. Aun así, los valores de cemento y agua usados por cada uno de ellos es muy similar. Por ejemplo, para la dosificación HM-20 la diferencia es de 15kg/m<sup>3</sup> de cemento y de 0,08 en la relación a/c. Se observa que a medida que aumentan las prestaciones mecánicas del hormigón también lo hace la cantidad de cemento. Por otra parte, la relación a/c se reduce (tabla 7.2). También hay que observar que para los hormigones intermedios los valores de cemento y relación a/c se mantienen entre los límites mencionados.

La cal usada ha sido la misma en todos los casos (A3Ad). Esto ha sido verificado por la empresa fabricante y suministradora del material. Puede observarse que el porcentaje por kilo de cemento añadido en cada uno de los casos presenta una tendencia creciente, es decir, el porcentaje es mayor en las últimas obras realizadas. La introducción de la cal en la mezcla se realizó manualmente, y en función del caso, en la central dosificadora o directamente en el camión.

Finalmente se usaron distintos tipos de armado. En la mayoría de los casos se usaron microfibras de polipropileno (mFPp). En el resto de los casos se usaron macrofibras de polietileno (MFPe), armado convencional, mallazos o la suma de dos de ellos. En el caso de las obras 15, 17, 21 y 22 el HRC se usó como hormigón en masa. Cabe destacar que en estos cuatro casos el elemento se encontraba totalmente confinado lateralmente. Las fibras también se introdujeron de manera manual en la mezcla de hormigón contemplando las dos opciones descritas para la cal. Respecto a este punto hay que señalar que la cal no introduce incompatibilidad alguna ya sea con las fibras o bien con la armadura, en definitiva, se le puede ver como un material inerte.

### 7.1.2 Influencia de la puesta en obra

En la tabla 7.3 se presentan las distintas características de puesta en obra de cada una de las experiencias realizadas. Entre estas características están: el sistema de vertido del hormigón, el acabado superficial, el tipo de curado, así como las incidencias u observaciones de la obra.

Con respecto al vertido, tal como puede verse en la tabla 7.3, la mayor parte de las obras ha sido mediante vertido directo por la canaleta del camión (figura 7.1a) (todos excepto en las experiencias 8 y 9 que ha sido bombeado). Ello requiere una consistencia alta (figura 7.1b) para facilitar la descarga y para las necesidades posteriores de puesta en obra. Dado que las experiencias han sido en pavimentos, regleados y fratasados, la consistencia alta era adecuada. En las citadas experiencias no se han hecho medidas del cono de Abrams, tal como se puede ver en el Anejo A2.

Ref. nº	Vertido	Acabado superficial	Curado	Observaciones de puesta en obra
1	DMC (*)	Regleado	Aspersores	
2	DMC (*)	Regleado	4 días	Fratasado en inicio del tramo
3	DMC (*)	Regleado y fratasado	No curado (N.C.)	Demasiado fluido - reducción aditivos
4	DMC (*)	Regleado y fratasado	Aspersores	
5	DMC (*)	Regleado y fratasado	4 días	
6	DMC (*)	Regleado+ fratasado y espolvoreado posterior	L.C.	Se espolvoreó 1,2 Kg/m <sup>2</sup> de endurecedor de la zona de rodadura
7	DMC (*)		Agua	
8	Bombeado		Agua	
9	Bombeado		Agua	Abierto al tráfico camiones a los 7 días
10	DMC (*)		Agua	
11	DMC (*)		L.C.	
12	DMC (*)	Regleado mecánico + Denudado	Agua	Parte del carril (2,5m) acabado con denudado y otro con regla vibrante
13	Cubilote camión pluma	Fratasado	Agua	
14	DMC (*)	Fratasado	L.C.	
15	Dumper	Regleado	Agua al terminar	Descarga del camión 1,5 h desde salida de central
16	DMC (*)	Regleado y fratasado	L.C.	Coloreado (verde)
17	DMC (*)	Impreso	No (N.C.)	Correcciones de la cantidad de agua en obra
18	DMC (*)	Regleado y fratasado	No (N.C.)	Banda rodadura negra
19	DMC (*)	Regleado y fratasado	No (N.C.)	Correcciones de la cantidad de agua en obra
20	DMC (*)	Regleado y fratasado	No (N.C.)	Correcciones de la cantidad de agua en obra
21	Dumper	Regleado y fratasado	No (N.C.)	Llovía durante la ejecución
22	DMC (*)	Regleado	No (N.C.)	Nubes y claros durante ejecución

(\*) DMC: Directo mediante canaleta      (\*\*\*) L.C. Líquido de curado

Tabla 7.3 – Características de la puesta en obra

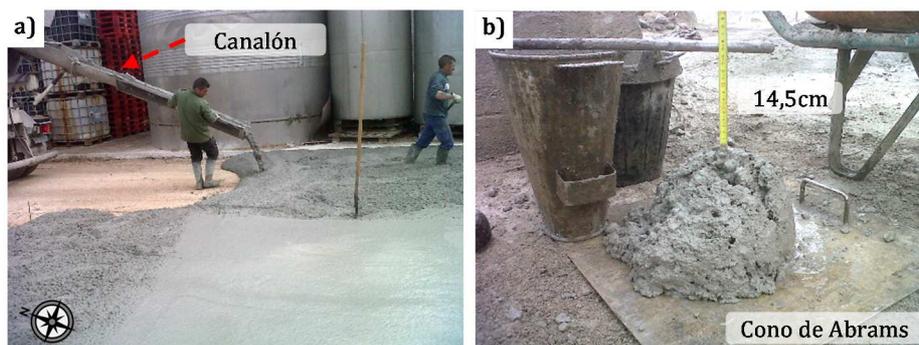


Figura 7.1 – a) vertido del hormigón; b) cono de Abrams

La trabajabilidad se dejaba, en cierta medida, a la experiencia de los técnicos que colocaban el hormigón en obra corrigiendo, si era preciso, la cantidad de agua en la misma obra. Este es el caso de las experiencias 19 y 20 en las que se añadió en el camión, un total de 150/190 litros de agua para hacer el material más fluido. La mitad del pavimento se realizó con material con más de 1h de salida de planta y se añadió agua para poder reglear y fratasar. Estas indefiniciones son poco convenientes para el resultado final de la obra, debiéndose articular un procedimiento que sistematice la forma de proceder, con cierta flexibilidad.

El acabado superficial, asociado al tipo de experiencias realizado, ha sido, mayoritariamente, el de regleado y fratasado posterior, en especial en los elementos de mayor superficie. Pensando en la extrapolación a otras técnicas de acabado, parece que la cal no introduce o condiciona la forma de hacer el acabado.

Los sistemas de curado utilizado en las distintas experiencias, van desde aspersores con agua, líquidos de curado (L.C.) hasta el no curado (N.C.). Con esta última alternativa se pretendía simular las condiciones más realistas de la obra, en las que nos podemos encontrar esos tipos de escenarios. En la citada tabla 7.3 puede verse que la actuación de no curar es la mayoritaria. Ello responde a la poca responsabilidad estructural que se da a los elementos donde se aplica, si bien, siempre debería recomendarse curar, especialmente, cuando se emplean altos contenidos de cemento. En caso contrario, se observa que no es tan determinante.

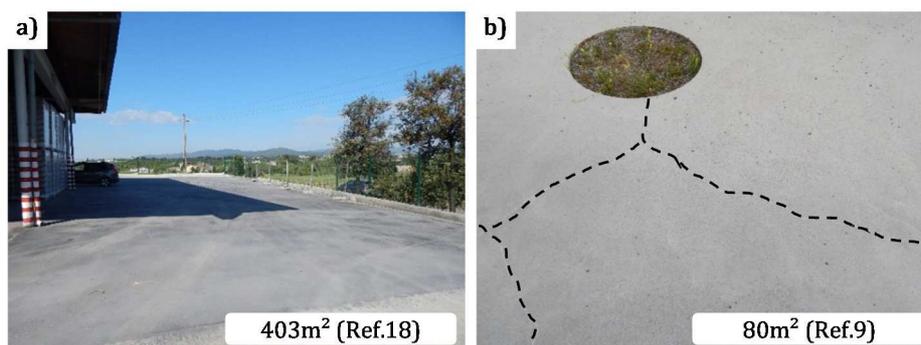


Figura 7.2 – Fisuración en losas: a) losa no fisurada (Ref.18) y b) losa con fisuras (Ref.9)

En la figura 7.2 se muestran dos losas, una en la que no aparecen fisuras (figura 7.2a) y otra en la que sí aparecen (figura 7.2b), a pesar de tener una geometría relativamente similar. Corresponden a las obras nº 18 y 9 respectivamente. En el primero de los casos, el contenido de cemento era menor y de tipo II (categoría 42,5); mientras que el de cal era mayor. En el segundo de los casos, el cemento era de tipo I con mayor contenido de cemento y menor de cal (tabla 7.2).

Otro aspecto sobre el que reflexionar a este respecto es de si el hormigón con expansión controlada debe utilizarse para las aplicaciones más básicas sin control de curado. En esta etapa exploratoria parece razonable, si bien, en planteamientos de futuro, sería más dudoso ya que al aportar valor añadido a la aplicación ello debería tener repercusión, tanto en el proceso como en los costes.

### 7.1.3 Hormigón endurecido

En la tabla 7.4 se presentan distintas prestaciones del hormigón endurecido en cada una de las experiencias realizadas. Entre estas prestaciones están: resistencia a compresión ( $f_c$ ), existencia o no de fisuras y momento de aparición de las mismas, existencia de despegue de zonas de contacto.

Ref. nº	$f_c$ (MPa)			Despegues Si/No	Fisuras Si/No	Fisuración existente
	4	7	28			
1	Lab: 32	Lab: 37 Exp: 19,5	Lab: 40	No	Si, en cruce No en 500 días	Tras el verano, muy puntual. Probablemente por efectos térmicos Pasillo-losa coaccionado en el lado corto en toda la longitud (30 m) Aparecen al 4º día. Dosificación alta de cemento
2	53,3	58,1	63,4	No	Si	
3	--	21,0	30,0	Pequeño	Si	Aparecen en tempranas edades. Incrementan con el tiempo
4	36,0	39,0	51,0	Pequeño	Si	
5	32,2	42,2	47,6	No	Si	Probable: Fisuras de retracción Escalonamiento con losa adjunta Aparecen a los 90 días. Incrementan con el tiempo
6	28,0 <sup>1</sup>	41,0	50,0 <sup>2</sup>	No	Si	Diverso tipo. Aparecen en meses y aumentan en el tiempo (nº y ext.)
7	--	--	--	No	Si	
8	52,0 <sup>3</sup>	54,0 <sup>3</sup>	56,5 <sup>3</sup>	--	--	--
9	--	--	--	Si	Si	--
10	El mismo hormigón que la R.O.nº 10			Si	Si	Aparecen en meses y aumentan en el tiempo. Perpendiculares al carril
11	--	--	--	No	Si	Aparece a los 120 días en la arqueta
12	--	--	--	Si	Si	Aparecen a los 90 días Incrementan con el tiempo
13	--	--	--	--	--	No se dispone de información
14	--	--	--	No	Si	Fisuras transversales a la dimensión principal. Pequeña anchura fisura. Pequeño incremento nivel
15	--	--	--	No	No	No visible
16	--	--	--	No	No	Gran superficie sin fisura
17	--	19,4	24,9 <sup>4,6</sup>	No	Si	
18	--	15,9	18,9 <sup>5,7</sup>	Si	Si	Junta cada 5 mm en losa sin cal
19	--	27,8	--	No	No	No visible
20	--	18,6	--	No	No	No visible
21	--	--	--	No	No	No visible
22	--	--	--	No	No	No visible

1: 1 día, 2: 48 días, 3: Valores medios de probetas realizadas en UPC y empresa, 4: 28,6 MPa a 180 días, 5: 24,8 MPa a 180 días, 6: 17,8 MPa en testigos a 28 días y 7: 24,7 MPa en testigos a 28 días

Tabla 7. 4 - Prestaciones de los hormigones analizados

Respecto al tema de resistencias cabe señalar que no se han dispuesto de datos de todas las experiencias, algunas de ellas, por la poca importancia estructural que se daba a la misma o bien,

porque la razón principal de la experiencia era estudiar aspectos de puesta en obra, dando por supuesto que cumplía la resistencia mínima requerida para la aplicación.

Las diferencias de los resultados de las resistencias a compresión responden a las distintas cantidades de cemento incorporadas en las dosificaciones, tal como puede verse en la tabla 7.4. Así, para dosificaciones en el entorno de 230 a 235kg de cemento por metro cúbico, los resultados en las experiencias a 7 días rondan los 19MPa (Ref. nº 1, 2 y 22), mientras que si el contenido de cemento es de 350 (kg/m<sup>3</sup>) la resistencia se sitúa en 42,2 MPa (Ref. nº 6) y si el contenido de cemento es de 450 (kg/m<sup>3</sup>) la resistencia se sitúa en 58,1 MPa (Ref. nº 3); lo que representa un incremento medio de unos 20MPa por cada 100kg más de cemento (aunque en realidad ese incremento no será lineal, siendo razonable en el rango considerado).

Por otro lado, en las referencias 1 y 2 hay una notable discrepancia entre los resultados obtenidos en los ensayos previos de laboratorio (Lab) y los de la propia experiencia de obra (Exp). Los resultados de Laboratorio muestran, por un lado, una rápida saturación, ya que el incremento de resistencias entre 4 y 28 días es relativamente bajo; mientras que, por otro lado, la discrepancia de los resultados a 7 días introduce dudas respecto a si se trata de la misma dosificación, no pudiéndose despejar con la información disponible (ver Anejo A2).

Con relación al tema de despegue en el contacto entre elementos de hormigón con expansión controlada y los elementos vecinos, cabe señalar que de forma muy mayoritaria no se observan despegues, incluso en elementos que si tienen fisuración. Ello muestra la existencia de una cierta deformación residual que compensa la posible retracción del hormigón. Esta deformación residual, también es visible en algunas de las obras, ya que aparecen desniveles entre elementos adyacentes. Estos desniveles, en cualquier caso, son de un valor muy pequeño (usualmente, menores a 2mm), como corresponde a elementos de no gran espesor.

El comportamiento con respecto a la fisuración no tiene la misma uniformidad. Así, en diferentes aplicaciones ya sean de gran longitud o gran superficie no aparecen fisuras (por ejemplo, obras nº 2 y nº 18), mientras que en otras de análogas dimensiones y características sí que aparecen. Cuando aparecen fisuras, también se presentan dos tipos de comportamiento: fisuras sistemáticas perpendiculares al lado largo de la aplicación y fisuras aleatorias, tipo enramado sin un patrón conocido, tal como puede verse en el plano de alzamiento de fisuras de las obras nº 4 y 5 (figura 7.3).

En el primero de los casos (fisuras sistemáticas) se puede pensar que son fisuras, principalmente de retracción, como consecuencia de la geometría del elemento; mientras que en el segundo de los casos (fisuras aleatorias), podría responder, entre otras, a dos causas principales: existencia de nódulos de cal en la mezcla y razones derivadas de la base (no del hormigón).

Respecto a la existencia de nódulos, si bien es posible y se dio en un caso, no parece probable, tanto porque no ha sido sistemático como porque la aportación de la cal ha sido responsabilidad directa de los técnicos de la empresa suministradores de la cal, en la mayoría de los casos y, han puesto un gran cuidado en esa actuación. Los testigos extraídos de esa obra, ponen en evidencia la ausencia de nódulos de cal.

En consecuencia, quedan los problemas asociados a la base, como posible origen de algunas de estas fisuras, como es el caso de la obra nº 5. La misma se sitúa en un terreno con arcillas. Hay que señalar que prácticamente en todos los casos, se ha hecho un desbroce del terreno, y se ha vertido el hormigón encima, sin hacer tratamiento alguno en las bases.

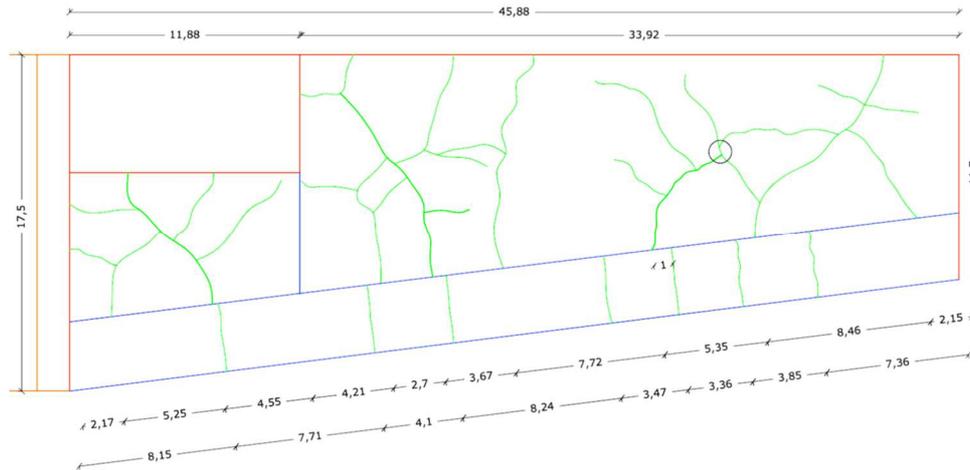


Figura 7.3 – Fisuración en losas Ref.: 4 y 5: a) sistemática en carril y b) aleatoria en superficie

Por último, hay que remarcar que algunas de las fisuras han seguido variando con el tiempo, aumentando la anchura de las mismas. Ello puede ser reflejo de que la expansión potencial aportada por la cantidad de cal añadida era insuficiente con respecto a la retracción del hormigón fruto tanto de la retracción endógena (basada en la cantidad de cemento y el tipo de cemento) como en la retracción de secado (basada, principalmente, en la relación agua/cemento). A este respecto, la probabilidad de fisuración es mayor para las mezclas con cemento tipo I (referencias de obra: 4 a 16, inclusive) que con las de cemento tipo II (referencias de obra: 1 a 4 y 17 a 22).

## 7.2 Conclusiones parciales

Las conclusiones de este apartado se presentan más bien como enseñanzas adquiridas durante la ejecución y el análisis de resultados de las losas. A continuación se describen las observaciones más significativas.

- El óxido de cal (CaO) con cinéticas de reacción controladas, aportado por la empresa Cales de Pachs para estas experiencias piloto, se ha mostrado efectivo en todos los casos (incluso en los que aparecen fisuras), dando lugar en esta situación a un menor número de fisuras. En cualquier caso, no se tiene todos los factores controlados, por lo que resulta poco concluyente encontrar una fórmula única que dé respuesta.
- El óxido de cal (CaO) no introduce dificultad alguna tanto en los procesos de amasado como de colocación y tratamiento posterior. Siempre es recomendable evitar la formación de nódulos de cal durante el vertido a la central amasadora o dosificador.
- Si bien hay resultados contrapuestos con respecto al curado de las experiencias piloto, sigue pareciendo razonable el empleo de sistemas de curado para, por un lado, aumentar la probabilidad de la hidratación del óxido de cal (CaO) a corto plazo y, por otro lado, evitar el desecado rápido en superficie que favorezca la fisuración en tempranas edades.
- En ningún caso se han presentado problemas de endurecimiento rápido; esto es, la cinética de la reacción ha estado bien controlada y los tiempos abiertos de las mezclas, cubren un amplio espectro de aplicaciones.

- Las resistencias mecánicas que se puede alcanzar con este tipo de hormigones son importantes, acorde con la cantidad y tipo de cemento y la cantidad de CaO añadida. Ésta en las experiencias utilizadas se sitúa en el entorno de 8% de cemento. Los incrementos de resistencia respecto a un patrón sin cal, se puede situar en valores superiores al 10%, función de los contenidos de cal y cemento, así como el tipo de este.
- Desde el punto de vista estructural, dado que ha habido experiencias diferentes de fisuración, parece razonable no hablar tanto de cantidades añadidas, sino de prestaciones requeridas. Por ello parece conveniente exigir una deformación residual total a largo plazo (incluido retracción y expansión). Esta debería situarse a lo largo de la vida útil prevista para el elemento que fuese inferior a - 0.2mm/m para elementos de poca responsabilidad estructural y de 0,0mm/m para el caso de elementos de mayor responsabilidad estructural.



# 8 | Conclusiones

## 8.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo exponer las conclusiones principales derivadas de los distintos estudios que se han llevado a cabo en el marco de la presente tesis doctoral. Las conclusiones se dividen en dos apartados principales que son, las conclusiones generales y las específicas. Las conclusiones generales (apartado 8.2) dan respuesta a los objetivos generales planteados en el Capítulo 1. Dicho objetivo consiste en estudiar la interacción entre el cemento y la cal en mezclas expansivas.

Las conclusiones específicas mostradas en el apartado 8.3 dan respuesta a los objetivos específicos mencionados también en el Capítulo 1. Estas conclusiones exponen los aspectos concretos de la interacción del cemento y la cal, del proceso de expansión y de la modelización de las curvas de tensión obtenidas experimentalmente. Además, se profundiza en el aspecto químico de la interacción entre ambos materiales con tal de darle un sentido a los comportamientos físicos como son la deformación en estado libre y la tensión en estado confinado. Finalmente, se presentan

propuestas de futuras líneas de investigación en esta temática. Cabe destacar que las conclusiones que se muestran a continuación están limitadas al contexto de las campañas experimentales realizadas en el transcurso de esta tesis.

## 8.2 Conclusiones generales

Como se ha podido observar a lo largo de la tesis, se han llevado a cabo una serie de ensayos a nivel de laboratorio y, por otra parte, directamente en elementos reales como losas. Los ensayos de laboratorio, en los que se han podido controlar todos los parámetros, han demostrado que existe una sinergia entre el cemento y la cal capaz de generar morteros cuya tensión interna obtiene valores algo superiores a los establecidos en la bibliografía para los materiales de retracción compensada. Al aplicar estos conocimientos a elementos reales, en los que el control de las variables no resulta tan fácil, se ha observado que pueden realizarse hormigones de retracción compensada a partir de la adición directa de CaO a la dosificación de un hormigón convencional y obtener elementos en los que, sin la ejecución de juntas de retracción, no aparezcan fisuras. Por otra parte, cabe destacar que en los elementos en los que han aparecido fisuras, la cantidad de estas ha sido menor y en algunos casos debidas a las condiciones de contorno.

Con esto se quiere decir que se ha comprobado la viabilidad del uso de la adición de cal para la obtención de hormigones de retracción compensada, si bien, el curado posterior del hormigón, junto con la buena colocación del hormigón fresco por parte de los operarios juegan un papel importante en el uso de estos hormigones.

## 8.3 Conclusiones específicas

Con el fin de dar una visión de las principales aportaciones, se indican las conclusiones específicas más relevantes divididas por temas: ensayos usados para la caracterización de los materiales; proceso de hidratación del cemento con adición de cal; estudio del proceso de deformación del mortero y la modelización de las curvas de tensión obtenidas experimentalmente.

### *Estudio del proceso de hidratación de materiales cementicios con adición de cal*

- La superposición matemática de los procesos de hidratación no equivale a la curva resultante de la mezcla de los dos componentes lo que indica que existe una interacción entre ambos componentes. Se ha observado que la adición de CaO camufla la etapa durmiente presente en la curva de calor de hidratación de un cemento convencional. En una pasta convencional, después de la rápida reacción de los aluminatos al entrar en contacto con el agua, el yeso inhibe su disolución y la pasta se queda en un estado latente en el que las reacciones que se dan son poco exotérmicas. Por otra parte, al añadir cal a la mezcla, esta empieza a hidratar desde el primer contacto con el agua y continua hasta que la cal se consume, por lo que en ningún momento dejan de darse reacciones en la mezcla y la curva de calor sigue marcando picos de hidratación (*figuras 4.30 y 4.31 Capítulo 4*).
- La adición de cal en las mezclas genera materiales con un mayor contenido final de portlandita. La portlandita de las pastas de cemento proviene principalmente de los silicatos de cemento. Al añadir cal, se obtiene un aporte extra de esta fase que se traduce

en un aumento del 15% con respecto a la pasta de cemento sin cal hasta un 23% en las que contienen un 14% de adición a las 48 horas del mezclado (*Figura 4.59 Capítulo 4*). El aumento del contenido de esta fase incrementa la alcalinidad de la mezcla endurecida, por lo que el tiempo de pasivación de los elementos de acero embebidos en el material será mayor.

- Los tiempos de fraguado se reducen al añadir cal a la mezcla. En el análisis de los tiempos de fraguado se ha observado un adelanto en los tiempos de inicio de fraguado de las pastas que contenían cal con respecto a la de referencia. Se han observado adelantos de hasta 4 horas en los puntos de inicio y final de fraguado para las dosificaciones con la relación a/c de 0,45 y con un 7% de cal. La reducción del porcentaje de cal en las pastas reduce en mayor medida la diferencia con la pasta de cemento de referencia (*figura 4.25 Capítulo 4*).
- La adición de cal en las mezclas influye de manera distinta en función del porcentaje de cal añadido y de la relación a/c usada. En los ensayos de temperatura de hidratación y calorimetría isotérmica se ha observado que es a partir del 4% de adición de cal sobre el peso del cemento cuando la curva de temperatura y calor de hidratación presenta una mayor variación con respecto a la de la pasta sin cal (*figura 4.9, 4.10 y 4.11 Capítulo 4*). Para el pico máximo de temperatura la variación del valor para el 1% de adición de cal es de como máximo de un 5%, mientras que para el 7% de adición este porcentaje aumenta del 14% hasta el 69%. En el caso de la relación a/c se ha observado que su influencia es la misma en las pastas sin cal y con cal. En todos los ensayos, para el mismo porcentaje de cal añadido, el aumento de la relación a/c reduce los valores máximos de temperatura alcanzados y retrasa una media de 4 horas la curva de hidratación con respecto a las de menor contenido de agua (*figura 4.23 y 4.24 Capítulo 4*).
- La adición de CaO genera mezclas más exotérmicas, lo que puede comportar un efecto negativo en elementos de gran volumen de hormigón dado el posible incremento de temperatura máxima alcanzada. En función del espesor del elemento, este incremento de temperatura podría conllevar a la aparición de un gradiente térmico entre el núcleo de la masa y sus extremos en contacto con el ambiente exterior, lo que podría generar tensiones internas que derivaran en la fisuración del elemento.
- El aumento de la temperatura por encima de los 70°C inhibe la formación de etringita primaria. En relación con el punto anterior, el aumento de temperatura observado en las mezclas puede dar lugar a la formación diferida de etringita. Esta se forma una vez la temperatura del elemento se encuentra por debajo de los 70°C, lo que puede darse tiempo después del final de fraguado. La formación de etringita diferida se daría en un medio rígido en el que no hay espacio suficiente para acomodarla, por lo que terminaría por fisurar el elemento. Cabe destacar que en algunas de las mezclas con cal se han alcanzado incrementos de temperaturas de 60°C con respecto a la mezcla de referencia (*figura 4.12 Capítulo 4*).
- La aditivación de las cales influye en las propiedades de la mezcla durante el proceso de hidratación. Se ha observado que las mezclas fabricadas con cales aditivadas (2Ad) presentan una curva de hidratación más lenta con respecto a sus homólogas sin aditivar. Además, los valores de los picos de la curva de calor de hidratación y de temperatura son menores a los de las dosificaciones realizadas con las cales no aditivadas (1Na) (*figura 4.17 y 4.39 Capítulo 4*). Por otra parte, las dosificaciones con las cales sin aditivar (1Na) son las

más exotérmicas, principalmente las mezclas que contienen la cal A1Na. En esta dosificación, es en la que el proceso de hidratación de la mezcla se da en un tiempo menor.

- Se ha observado que el aumento de la superficie específica de las cales también influye en el proceso de hidratación de las mezclas. Se ha visto que al usar la misma cal, pero una de ellas con mayor superficie específica (A2Ad vs. A3Ad), la dosificación con la cal más fina obtiene valores algo superiores de calor independientemente del porcentaje de cal añadido y de la relación a/c. En el caso de los tiempos se ha observado que la curva de hidratación se da antes para el menor contenido de agua, mientras que el aumento de la relación a/c genera una inversión de la tendencia y la curva se retrasa con respecto a la de la cal con menor superficie específica (*figura 4.37 y 4.38 Capítulo 4*).
- La presencia de cal en el medio modifica el proceso de disolución de la alita. Se ha observado que la portlandita inhibe la disolución de los silicatos y el contenido de alita remanente a las 48 horas del mezclado es superior al de la dosificación sin cal. La diferencia entre la disolución de la pasta de referencia se traduce en una reducción del 25% como valor mínimo y del 66,6% como máximo (*figura 4.60 Capítulo 4*). Esta reducción de la disolución de la alita puede reducir la formación del gel CSH y, por consiguiente, afectar a la resistencia final, ya que es este gel el encargado de conferir rigidez al material.
- La rápida formación de portlandita en el medio líquido influye en el proceso de formación de la etringita. Se ha visto que el pico máximo de formación de etringita se adelanta al de la dosificación de referencia unas 18 horas. Por otra parte, los valores máximos alcanzados se encuentran entre el 10% y el 15%. Por otra parte, a las 48 horas del inicio del ensayo, el contenido de etringita con respecto a la dosificación de referencia presenta valores menores en la mayoría de los casos, lo que implica que esta se transforma antes en monosulfato. El contenido de monosulfato obtenido del ensayo de DRX presenta a valores inferiores al 1% por lo que no es pudieron obtener tendencias claras.

#### Estudio del proceso de deformación

- El ensayo de caracterización de la expansión de la cal mediante la configuración del ensayo Lambe para arcillas no permite obtener resultados fiables. Esto es debido a la baja repetitividad del sistema por la configuración del mismo. Aunque el sistema de montaje y preparación de la mezclas fue el mismo en todos los casos, el problema principal se da en el momento de la hidratación de la cal dentro del recipiente de medición. La adición del agua al recipiente donde se encuentra la cal induce a una expansión irregular de la superficie en contacto con la pieza móvil. Esto se debe a que este contacto no se produce de una manera uniforme, sino que filtra a través de unas pequeñas oberturas que presenta el recipiente. De esta manera, la expansión generada en cada punto del recipiente variará y el desplazamiento de la pieza móvil no será uniforme, por lo que puede quedar trabada y no transmitir la deformación real al LVDT. En algunos de los casos se observó que los huecos de penetración del agua hacia la mezcla quedaban colmatados e impedían que el agua siguiera fluyendo.
- Los ensayos definidos en normativas para evaluar el proceso expansivo de mezclas no han permitido caracterizar el comportamiento de las mezclas de cemento y cal. La causa fundamental está relacionada con la dificultad, según los métodos tradicionales definidos en normativa, de registrar la evolución de la expansión durante las primeras 24 horas. Los

estudios realizados en este trabajo muestran que ese período es clave para identificar el valor de la expansión total de las mezclas con cal. Mediante la comparación de los resultados de deformación obtenidos por la norma UNE 80113 y por el Método del molde mixto se ha observado que en este último la expansión del material se da a las 3 horas aproximadamente del mezclado, por lo que la deformación medida en el ensayo normalizado se puede presentar como la deformación por descompresión del material.

- El ensayo del Método del anillo, aunque permite medir la deformación en continuo del material, presenta una alta velocidad de deterioro del sistema. En este ensayo intervienen tres factores que se han determinado como los que más influyen en la degradación del anillo. En primer lugar las condiciones ambientales en las que se realizó el ensayo no fueron las más idóneas para un sistema de medición basado en puentes de galgas extensiométricas adheridos al acero. Aunque el sistema de medición mediante galgas constaba de una protección a la humedad realizada por una empresa especializada, no fue suficiente para el 95% de humedad presente en la cámara húmeda. Por otra parte, se observó que el anillo perdió su forma original y empezó a ovalizarse, por lo que las fuerzas ejercidas sobre las paredes del mismo variaron, así como la medición de las galgas. Finalmente, al ensayar un material expansivo, la única manera de extraer el mortero endurecido del anillo fue mediante un martillo neumático. Las vibraciones que se inducían en el sistema de medición, la humedad ambiente y la deformación del material propiciaron el descarte de este ensayo con esa configuración (*figura 5.7 y 5.8 Capítulo 5*).
- El ensayo del Método del molde mixto para la obtención de los valores en continuo de la deformación y de la tensión de morteros presente una alta reproducibilidad y unos valores coherentes a las dosificaciones usadas. Este ensayo presenta mejoras con respecto al Método del anillo. Entre ellas se encuentran las siguientes: fácil desmoldado, no deformable, el sistema de medición es independiente al molde, posibilidad de configurar dos ensayos con el mismo molde, obtención de probetas de medidas normalizadas según la norma UNE-EN 196-1. Al tratarse de un molde de piezas independientes unidas mediante tornillos tipo Allen, la probeta puede extraerse entera sin necesidad de romperla como se hacía en el Método del anillo. Además, al tratarse de piezas de espesor aproximado 30mm el material se encuentra confinado en un espacio prácticamente indeformable y que permitirá que los ensayos consecutivos se realicen en las mismas condiciones que el primero. El lugar de ejecución del ensayo no está limitado por la longitud de los cables del sistema de medición, sino que se puede moverse según las necesidades una vez desconectado el LVDT o la célula de carga. La posibilidad de configurar dos ensayos con el mismo molde permite mantener las condiciones de contorno en que se confina el material y ahorrar espacio y recursos económicos en los ensayos. Finalmente, al haberse diseñado el recipiente donde se introduce el mortero con las mismas medidas que las probetas que se obtienen para el ensayo basado en la norma UNE-EN 196-1 se puede ensayar mecánicamente la probeta resultante con el mismo sistema que especifica la norma mencionada.
- Ninguno de los métodos de ensayo planteados permite medir retracciones o tensiones de tracción. Aunque en el caso de estudio de esta tesis el ensayo se planteó inicialmente para la obtención de datos de expansión y de tensiones de confinamiento, no se tuvo en cuenta la retracción que experimenta el material. En los datos iniciales del ensayo del Método del molde mixto en deformación se ha observado que se da una retracción inicial del material. Este efecto se debe al pegado del mortero con la pieza móvil, ya que en el momento en que

el material ha endurecido y el agua se ha evaporado, no se da el efecto de pegado y no se miden retracciones. Por otra parte, en la configuración de confinamiento, si se mide una relajación del material, ya que el valor de la tensión máxima no se estabiliza, sino que, en algunas curvas, el valor de la tensión empieza a decrecer de manera lenta. Es por este efecto que se esperaría que en el caso de la deformación se dé también una retracción en el material.

- Se ha observado que a partir de las 24 horas la tensión empieza a decrecer debido al fenómeno de la retracción propia del mortero. Este descenso en la tensión es mínimo, por lo que no se prevé que ninguno de los morteros llegue a contrarrestar, en su totalidad, la tensión interna del material. Esto se debe a que los valores de tensión alcanzados se encuentran dentro de las recomendaciones de la bibliografía para hormigones de retracción compensada (0,1-0,7MPa). La adición de cal a las mezclas de mortero genera mezclas más expansivas cuya tensión llega a alcanzar valores de entre 1,6 y 2,26MPa para los morteros con mayor contenido de cal (14%). En el caso de las mezclas con un 7% de adición, los valores de tensión se encuentran entre 0,65 y 0,99MPa, también por encima de los rangos marcados en la bibliografía. En todos los casos, la tensión introducida en el material permitiría que el material no llegara a fisurar por el efecto de la retracción, aunque la durabilidad de estos materiales no sea un tema tratado en esta tesis.

#### Modelización del proceso de hidratación y deformación de los morteros

- No toda la cal añadida genera expansión, parte queda amortiguada por la matriz durante el proceso de hidratación. Tal como se ha observado en el Capítulo 6, la deformación potencial y la libre (medida experimentalmente) no presentan el mismo valor (*tabla 6.4*). En todos los casos, la deformación potencial es mayor a la deformación libre debido a que la primera parte de la premisa de que toda la cal introducida generará deformación. Esta premisa no es del todo cierta ya que, por una parte, toda la cal introducida se hidratará y aumentará de volumen, pero solamente una parte se hidratará en un medio suficientemente rígido como para generar deformación. Es por este motivo que parte de la deformación generada por la cal introducida quedará amortiguada por la plasticidad del medio. Este parámetro de amortiguamiento se ha tenido en cuenta en la ecuación 6.6 para el cálculo de la deformación teórica y el valor se ha modificado en función del porcentaje de cal añadido. Así, se ha observado que a mayor contenido de cal mayor es el porcentaje de amortiguamiento que presenta el material (*tabla 6.4*).
- No toda la expansión medida genera tensiones en el material, sino que, al igual que para el punto anterior, se produce un segundo amortiguamiento. Se ha observado que al calcular la tensión mediante los valores de deformación libre los valores alcanzados eran significativamente superiores a los reales obtenidos experimentalmente. En el caso de los morteros MA1Na45-7 y MB2Ad45-14 la diferencia entre el valor real y el calculado es de 9MPa y 20,7MPa respectivamente (*figura 6.13*). En vista de los resultados obtenidos es necesario aplicar un coeficiente de corrección a los valores de deformación para obtener unos valores de tensión acordes a los reales (*tabla 6.9*). Estos coeficientes muestran que los rangos de deformación que se transforma en deformación efectiva se encuentran entre el 5% y el 10% de la deformación libre, por lo que el resto queda nuevamente amortiguado en la matriz.

- A partir de los datos de temperatura obtenidos en el ensayo de deformación libre y tensión de confinamiento se ha observado que la medición de la temperatura *in situ* es una medida indirecta de los tiempos en que se da el inicio y el final de ambos fenómenos. Esta asimilación podría traducirse en un proceso indirecto de control de calidad del material para saber tiempos de curado, desencofrado, puesta en uso del elemento, etc. Para ejecutar este ensayo es necesario únicamente una sonda capaz de medir la temperatura en continuo del material, lo que no implica una gran inversión, pero aporta una información importante del comportamiento interno del material.
- Se ha propuesto un modelo capaz de estimar la curva de deformación presentada por los morteros con cal en la campaña experimental. Del total de morteros estudiados se han obtenido dos ecuaciones capaces de reproducir el comportamiento real de la curva de deformación. Las ecuaciones constan de cuatro parámetros, de los cuales tres de ellos han podido agruparse en un solo valor para cada una de las ecuaciones. En el caso del parámetro  $A_2$  que define el valor máximo de la deformación, se ha mantenido el valor inicial del parámetro, ya que para cada mortero la expansión máxima era distinta.

## 8.4 Futuras líneas de investigación

Si bien ha habido un avance en este estudio, quedan líneas pendientes para el futuro desarrollo del material. En los siguientes puntos se presentan las líneas de investigación más representativas.

- Estudio de la durabilidad de materiales cementicios con adición de cal: Es evidente que el aporte de cal genera un contenido extra de portlandita. Este compuesto es el responsable de la alcalinidad del material y, por consiguiente, de la pasivación de la armadura. Aunque en las probetas de las obras reales se llevaron a cabo ensayos para determinar la presencia de cal remanente, se considera necesario profundizar en este tema. En el caso de la existencia de nódulos remanentes de cal estos podrían llegar a generar daños en los elementos al hidratarse en fases posteriores cuando exista un aporte nuevo de agua.
- Ampliación del modelo propuesto contemplando el uso de las mismas variables que para los ensayos de calorimetría: En este momento el modelo reproduce las dosificaciones con una relación a/c de 0,45 y con contenidos de cal del 7% y del 14%. Debido a los recursos disponibles no se realizaron pruebas con las relaciones a/c de 0,35 y 0,60 y con los porcentajes de cal del 1% y del 4%. La ampliación del modelo para abarcar también las dosificaciones no estudiadas permitiría un mayor conocimiento del material y una mejor aproximación teórica del modelo.
- Ampliación de la campaña experimental a nivel de laboratorio para hormigones: Pueden plantearse estudios añadiendo la variable del tipo de árido usado e investigando la influencia de este en los fenómenos de deformación del material. Las campañas experimentales llevadas a cabo contemplan el uso de árido normalizado de 2-4mm. En el caso de las losas realizadas con hormigones existían demasiadas variables a tener en cuenta para poder comparar el efecto de la cal en el material. Así mismo, las condiciones de contorno y ambientales variaban para cada una de ellas. La ejecución de ensayos en un ambiente controlado y contemplando la variación de una variable en cada paso facilitaría el entendimiento de la influencia del árido durante el proceso de deformación, ya sea por

la forma de este o por la composición del árido y su posible reacción química con la pasta de cemento y cal.

- Uso de aditivos reductores de retracción en la dosificación y determinación de su influencia en el proceso de curado del material: En la bibliografía consultada se ha observado que cada vez es más común el uso de aditivos reductores de retracción para la confección de hormigones de retracción compensada. Estos mejoran el proceso de curado del material ya que favorecen la retención del agua por parte del hormigón y alargan el tiempo en que esta se evapora. El estudio de la incorporación de este aditivo en las mezclas realizadas permitiría comparar la durabilidad del material en un hormigón sin curar, uno con aditivo reductor de retracción, un elemento cubierto con un plástico y uno curado mediante regado. De esta manera se obtendría información importante en cuanto al mejor método de curado para obtener las máximas prestaciones del hormigón de retracción compensada a partir de la adición de cal.
- Profundizar en la interacción de la cal con las fases independientes del cemento: Se ha observado que la adición de cal a la mezcla influye en los patrones de disolución y formación de algunas de las fases del cemento. En esta tesis se ha abordado este tema a partir de la interacción del cemento con la cal mediante el ensayo de DRX pero no a nivel de cada una de las fases de manera independiente. Para poder profundizar más en el comportamiento de los materiales cementicios con adición de cal es necesario determinar la influencia de la cal en cada uno de ellos. Así, por ejemplo, se puede contemplar el estudio de la inhibición de la disolución de la alita, la determinación del porcentaje de  $\text{Ca(OH)}_2$  formado al mezclarlo con cal por cada una de las fases y la influencia del porcentaje que esta última pueda ejercer sobre la alita. El mismo estudio puede extrapolarse a la etringita para estudiar los tiempos en que se alcanza el máximo pico de formación de esta fase, la presencia de yeso remanente y la formación de monosulfato, así como las cantidades formadas. En el caso del yeso y del monosulfato, los valores obtenidos se encontraban por debajo del 1%, por lo que se podría plantear otro sistema de medición más preciso para poder obtener valores fiables y facilitar el estudio a nivel químico de la influencia de la cal.
- Estudio de la microestructura de las pastas y los morteros mediante SEM: Mediante las imágenes obtenidas al aplicar este proceso de análisis de las muestras puede observarse la estructura cristalina del material. Esto permitiría estudiar los amortiguamientos de la portlandita mediante la comparación de la microestructura en una pasta en deformación libre y otra confinada. Se podría observar dónde se forma el  $\text{Ca(OH)}_2$  y donde queda depositado. Por otra parte, el ensayo SEM permitirá comparar la dimensión de los cristales formados y estudiar la influencia de distintas variables. Entre las más importantes se encuentran el estudio del confinamiento del material y la influencia del porcentaje de cal, así como de la relación a/c. Por otra parte el estudio de los cristales que forman cada una de las cales usadas también aportaría información para entender la diferencia de los comportamientos de cada una de ellas.

---

**-referencias-**

- ACI Committee. (2010). *ACI 223R-10 Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete*.
- ACI Committee 360. (2010). *360R-10 Guide to Design of Slabs-on-Ground*.
- AENOR. (2005). *UNE-EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*.
- AENOR. (2009a). *UNE-EN 12350-5 Ensayos de hormigón fresco. Parte 5: Ensayo de la mesa de sacudidas*.
- AENOR. (2009b). *UNE-EN 196-3. Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen*.
- AENOR. (2013). *UNE 80113: Determinación de la expansión en autoclave*.
- Aguado, A., Carrascón, S., Cavalaro, S., Puig, I., & Senés, C. (2010). *Manual para el proyecto, construcción y gestión de pavimentos bicapa de hormigón*. Barcelona.
- Aparicio, S., Ranz, J., Fernández, R., Albert, V., Fuente, J. V., & Hernández, M. G. (2012). Non-destructive monitoring of curing process in precast concrete. *Materials Science and Engineering*, 42(12050), 5. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/42/1/012050>
- Arandigoyen, M., & Alvarez, J. I. (2007). Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 767-775. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.023>
- ASTM. (1995). *ASTM C806-95 Standard Test Method for Restrained Expansion of Expansive Cement Mortar 1*.
- ASTM. (1996). *ASTM C845 Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement* (Vol. 4).
- ASTM. (2006). *ASTM C 642-06 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.
- ASTM. (2009). *ASTM C878/C878M-09 Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete*.
- Bailey, D. A., Barbour, E. J., Cupp, S. W., Holland, J. A., & Knight, D. W. (2001). Gatorade Floor: Quenching Thirst, Joints, Cracks, and Curl. *Concrete International*, 23(1), 23-29. Retrieved from [http://www.ssiteam.com/files/file/Gatorade Floor Quenching Thirst Joints Cracks and Curl.pdf](http://www.ssiteam.com/files/file/Gatorade%20Floor%20Quenching%20Thirst%20Joints%20Cracks%20and%20Curl.pdf)
- Birss, F. W., & Thorvaldson, T. (1955). THE MECHANISM OF THE HYDRATION OF CALCIUM OXIDE, 881-886.
- Canovas, M. F. (2007). *Hormigón - 8ª edición*. (E. D. I. DE CAMINOS, Ed.). Madrid.
- Chatterji, S. (1995). Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnt CaO and MgO. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 51-56.
- Chiaia, B., Fantilli, A. P., & Ventura, G. (2012). A chemo-mechanical model of lime hydration in concrete structures. *Construction and Building Materials*, 29, 308-315. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.013>
- Cizer, O., Balen, K. Van, Gemert, D. Van, & Elsen, J. (2008). Blended lime-cement mortars for conservation purposes: Microstructure and strength development. *Structural Analysis of Historic Construction*, 965-972.
- Clifton, J. R., & Pommersheim, J. M. (1994). *Sulfate attack of cementitious materials: Volumetric relations and expansions. NISTIR 5390, National Institute of Standards and Technology*.
- Collepari, M., Borsoi, A., Collepari, S., Ogoumah Olagot, J. J., & Troli, R. (2005). Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. *Cement and Concrete Composites*, 27(6), 704-708. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.020>
- Collepari, M., Troli, R., Bressan, M., Liberatore, F., & Sforza, G. (2008). Crack-free concrete for outside industrial floors in the absence of wet curing and contraction joints. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 887-891. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.07.002>
- Corinaldesi, V. (2012). Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 36, 758-764. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.129>
- Courard, L., Degée, H., & Darimont, A. (2014). Effects of the presence of free lime nodules into concrete: Experimentation and modelling. *Cement and Concrete Research*, 64, 73-88. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.005>
- Ecole d'Avignon. (2003). *Techniques et pratique de la chaux*. (EYROLLES, Ed.) (2ª edición).

- Eskildsen, S., Jones, M., & Richardson, J. (2009). No More Pour Strips. *Concrete International*, 31(10), 42–47. Retrieved from [http://www.eisenwall.com/Articles/Article\\_KSC\\_NoMorePourStrips.pdf](http://www.eisenwall.com/Articles/Article_KSC_NoMorePourStrips.pdf)
- Fourmentin, M., Faure, P., Gauffinet, S., Peter, U., Lesueur, D., Daviller, D., ... Coussot, P. (2015). Porous structure and mechanical strength of cement-lime pastes during setting. *Cement and Concrete Research*, 77, 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.06.009>
- Garrault, S., Finot, E., E. Lesniewska, & Nonat, A. (2005). Study of C-S-H growth on C3S surface during its early hydration. *Materials and Structures*, 38(278), 435–442. <http://doi.org/10.1617/14343>
- Gruner, P. W., & Plain, G. A. (n.d.). Type K Shrinkage- Compensating Cement in Bridge Deck Concrete. *Concrete International*, 15(10), 44–47. Retrieved from <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx.aspx?m=details&i=3863>
- Hewlett, P. C., Bensted, J., Bleazard, R. G., Brown, B., Capmas, A., Edmeades, R. M., ... Lawrence, C. D. (1988). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*.
- Hewlett, P. C., Bensted, J., Bleazard, R. G., Brown, B., Capmas, A., Edmeades, R. M., ... Sims, I. (2004). *LEA'S Chemistry of cement and concrete*. (P. C. Hewlett, Ed.).
- Hewlett, P. C., & Massazza, F. (2003). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 471–635. <http://doi.org/10.1016/B978-075066256-7/50022-9>
- Hoffman, M. W. (1980). Portland Cement Versus Expansive Cement in Post-Tensioned Concrete Structures. In *Cedric Wilson Symposium on Expansive Cement, SP-64, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI* (pp. 205–237). Retrieved from <http://concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx?m=details&i=6679>
- Hu, J., Ge, Z., & Wang, K. (2014). Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times. *Construction and Building Materials*, 50, 657–663. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.011>
- IECA. (2013). *Diseño y ejecución de juntas en pavimentos y soleras de hormigón*.
- Juillard, P., & Gallucci, E. (2015). Morpho-topological investigation of the mechanisms and kinetic regimes of alite dissolution. *Cement and Concrete Research*, 76, 180–191. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.06.001>
- Juillard, P., Gallucci, E., Flatt, R., & Scrivener, K. (2010). Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration. *Cement and Concrete Research*, 40(6), 831–844. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.01.012>
- Keith, F. R., Walker, W. W., & Holland, J. A. (1996). A Peach of a Pavement Using Shrinkage-Compensating Concrete. *Concrete International*, 18(5), 26–32. Retrieved from [http://ssiteam.com/files/file/A\\_Peach\\_Of\\_A\\_Pavement\\_Using\\_Shrinkage-Compensating\\_Concrete.pdf](http://ssiteam.com/files/file/A_Peach_Of_A_Pavement_Using_Shrinkage-Compensating_Concrete.pdf)
- Kirchheim, a. P., Fernández-Altale, V., Monteiro, P. J. M., Dal Molin, D. C. C., & Casanova, I. (2009). Analysis of cubic and orthorhombic C3A hydration in presence of gypsum and lime. *Journal of Materials Science*, 44(8), 2038–2045. <http://doi.org/10.1007/s10853-009-3292-3>
- Klein, N. S. (2012). *El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland*. Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from <http://www.tdx.cat/handle/10803/107994>
- Madrid, T. G., & Largacha, P. H. (1985). Hormigones y morteros sin retracción. *Revista de Obras Públicas*, 973–996.
- Makar, J. M., & Chan, G. W. (2008). End of the induction period in ordinary portland cement as examined by high-resolution scanning electron microscopy. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(4), 1292–1299. <http://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02304.x>
- Maltese, C., Pistolesi, C., Lolli, a., Bravo, a., Cerulli, T., & Salvioni, D. (2005). Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2244–2251. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.021>
- Mather, B. (1970). *Expansive Cements*. Vicksburg (Mississippi).
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete. Microstructure, properties and materials*.
- Miller, T. C. (1960). A study of the reaction between calcium oxide and water. Washington: National Lime Association. Retrieved from [http://anfcal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Otros\\_Usos\\_Relacionados/A\\_STUDY\\_OF\\_THE\\_REACTION\\_BETWEEN\\_CALCIIUM\\_OXIDE\\_AND\\_WATER.pdf](http://anfcal.org/media/Biblioteca_Digital/Otros_Usos_Relacionados/A_STUDY_OF_THE_REACTION_BETWEEN_CALCIIUM_OXIDE_AND_WATER.pdf)
- Min, D., Dongwen, H., Xianghui, L., & Mingshu, T. (1995). Mechanism of expansion in hardened cement pastes with hard-burnt free lime. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 440–448.

- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.).
- Ministerio de Fomento. (2008). *EHE-08. Instrucción del Hormigón Estructural*.
- Mora, J., Aguado, A., & Gettu, R. (2003). Influencia de los aditivos reductores de retracción sobre la retracción plástica. *Materiales de Construcción*, 53(271-272), 10.
- Nagataki, S., & Gomi, H. (1998). Expansive admixtures (mainly ettringite). *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3), 163-170. [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00064-4](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00064-4)
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Harlow (England): Pearson Education Limited. Retrieved from <https://igitgeotech.files.wordpress.com/2014/10/properties-of-concrete-by-a-m-neville.pdf>
- Nicoleau, L., Nonat, A., & Perrey, D. (2013). The di- and tricalcium silicate dissolutions. *Cement and Concrete Research*, 47, 14-30. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.01.017>
- Onoda Cement Company. (n.d.). ONODA EXPAN. The shrinkage control admixture for concrete.
- Pardo, F. (2014). *Gestión integral de obras hidráulicas de hormigón: del diagnóstico a la inversión*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Quennoz, A., & Scrivener, K. L. (2013). Interactions between alite and C3A-gypsum hydrations in model cements. *Cement and Concrete Research*, 44, 46-54. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.018>
- Ramey, G. E., Pittman, D. W., & Webster, G. K. (1999). Shrinkage Compensating Concrete for Bridge Decks. *Concrete International*, 21(4), 29-34.
- Reinhardt, H. W., & Grosse, C. U. (2004). Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 18(3), 145-154. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.10.002>
- Rosell, J. R., & Cantalapedra, I. R. (2011). Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto, aplicado a morteros de cal y cemento. *Materiales de Construcción*, 61(301), 39-48. <http://doi.org/10.3989/mc.2010.53509>
- Ruiz, M. A. S. (2009). La retracción por secado del hormigón. *Premios BASF - The Chemical Company*, 19-26.
- Russell, H. G. (1973). Design of Shrinkage-Compensating Concrete Slabs. In *Klein Symposium on Expansive Cement Concretes* (pp. 193-226).
- Russell, H. G., Stadler, R. A., & Gelhardt, H. G. (2002). Shrinkage-Compensating Concrete Made with an Expansive Component. *Concrete International*, 24(8), 71-75.
- Salvador, R. P., Cavalaro, S. H. P., Segura, I., Figueiredo, A. D., & Pérez, J. (2016). Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete. *Construction and Building Materials*, 111, 386-398. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.101>
- Shi, H., Zhao, Y., & Li, W. (2002). Effects of temperature on the hydration characteristics of free lime, 32(January 2001), 789-793.
- Taylor, H. F. W. (1990). *Cement Chemistry*. (A. Press, Ed.) (Vol. I). London.
- Tixier, R., & Mobasher, B. (2003). Modeling of Damage in Cement-Based Materials Subjected to External Sulfate Attack. II: Comparison with Experiments. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, 314-322.
- Troli, R., & Collepardi, M. (n.d.). *Shrinkage-compensating concretes for special structures*.
- UNICEMENTO. (2008a). *UNI-EN 8148 Non metallic expansive agents for cement mixings. Determination of restrained expansion of concrete*.
- UNICEMENTO. (2008b). *UNI 11307. Prova sul calcestruzzo indurito. Determinazione del ritiro*.
- Urtubey, I. E., Loréface, I. M. S. R., Etse, I. G., Universidad, F. C. E., & Santiago, N. De. (2002). Estudio de la propagación de una onda ultrasónica a través de un sólido elastoplástico, 9.



# A 1

## Ensayo del anillo Planos del molde mixto

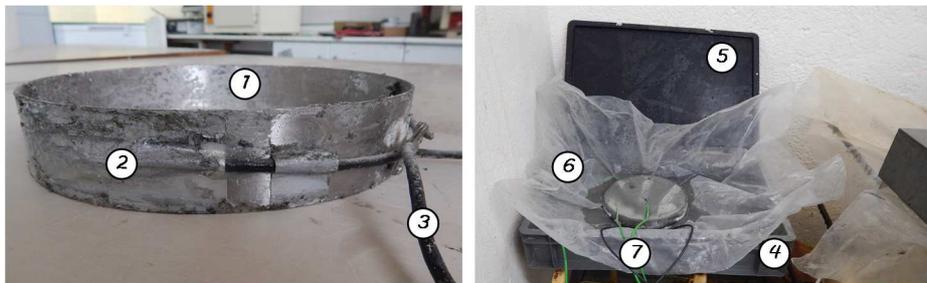
### 9.1 Introducción

De manera complementaria a los ensayos mostrados anteriormente, se planteó el diseño de un sistema de ensayo que permitiera medir tanto expansión como la tensión remanente del material generado por la adición de CaO. De este modo se planteó realizar los ensayos de expansión bajo confinamiento, empleando para ello un anillo de acero inoxidable de tipo AISI 316L, instrumentado mediante dos puentes de medición, formados por dos galgas en tracción directa y dos en compresión en Poisson, colocados diametralmente. La instrumentación del anillo fue realizada de tal modo que no se viera afectada por las condiciones de humedad de la cámara, para ello se encargó el montaje a la empresa UTILCELL. Mediante la deformación del anillo, y conociendo sus características, se determinó la tensión que generaba la expansión del material en función del tiempo. Las características del sistema se muestran en la tabla A1.1.

Propiedad	Valor
Módulo de Young (E, GPa)	200
Coefficiente de dilatación ( $\alpha$ , °C <sup>-1</sup> )	1,20·10 <sup>-5</sup>
Módulo de Poisson ( $\nu$ )	0,28
Diámetro ( $\emptyset$ , mm)	220
Espesor (e, mm)	1
Altura (h, mm)	40
Factor de galga (GF)	2,11

*Tabla A1. 1 – Características del sistema desarrollado para determinar la expansión de morteros*

En la figura A1.1 se muestra un detalle del anillo empleado, con la instrumentación del mismo. Los ensayos de expansión fueron realizados dentro de la cámara húmeda, cubriendo todo el sistema de medida con un plástico para evitar un aporte externo de agua al material.



*Figura A1. 1 – Anillo para ensayo de expansión*

En la figura A1.1 se describen los distintos elementos que componen el sistema de ensayo. Los números mostrados se definen como: (1) anillo de acero inoxidable sin juntas; (2) galga extensiométrica protegida; (3) cable de alimentación y adquisición de datos de las galgas; (4) caja de plástico para ambiente húmedo; (5) tapa; (6) plástico para evitar el contacto del agua de la caja con el anillo; (7) sondas de temperatura tipo K. Cabe destacar que la caja se llenaba de agua hasta el límite de altura del anillo para que la temperatura exterior de este fuera lo más constante posible.

Paralelamente a la medición de la deformación del aro, se midió también la temperatura de la mezcla en el centro del anillo y en el perímetro en contacto con el acero. De esta manera, se pudo determinar la influencia de la temperatura en la deformación del aro y restarla de la propia del mortero. En la figura A1.2 se muestra el sistema de adquisición usado para la obtención de los datos. En el caso de las galgas se obtuvieron medidas de deformación a partir del aparato denominado HBM MGCPlus AB22A ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) (1) y para la temperatura se usó un equipo Agilent 34970A (°C) (2). El sistema de medición se ubicó en el exterior de la cámara húmeda y los cables de medición se pasaron a través de un agujero (4) hasta el punto de ensayo. El software de adquisición de datos es el denominado Agilent BenchLink Data Logger.

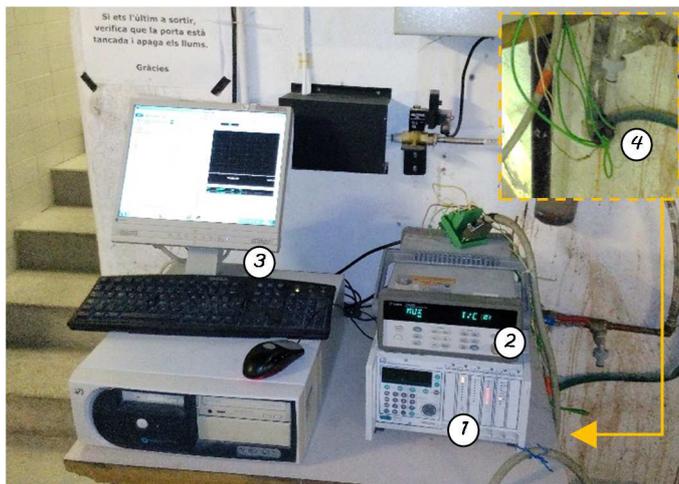


Figura A1. 2 - Adquisición de datos de las galgas y de las sondas de temperatura

Para este ensayo se usó el sistema de dosificación basado en las densidades de los materiales. Las mezclas empleadas en este caso fueron morteros, con relación cemento arena de 1:3. La relación a/c de las mezclas se fijó en 0.45, para lograr una consistencia adecuada para el moldeo de las muestras en el anillo, pero así mismo evitar que la mezcla fuera tan fluida que se perdiera material por las juntas. Se estudió únicamente un porcentaje de contenido de CaO - 7% spc - para estudiar el efecto máximo de esta variable. El árido empleado para fabricar los morteros era arena normalizada de naturaleza silíceica, de granulometría 0-2mm. Las muestras de CaO estudiadas fueron la A3Ad, B1Na, B2Ad.

Una vez pesados los materiales se introducían en la amasadora normalizada de la norma UNE EN 196-1 pero variando el sistema de mezclado. En primer lugar se introducía el agua con el aditivo para evitar que quedara cemento sin hidratar en la base. Seguidamente se introducía el cemento y la cal y se mezclaba durante 2 minutos a velocidad baja. Se introducía la arena y se mezclaba durante 1:30 minutos a velocidad baja. Se paraba la amasadora durante 30 segundos y se volvía a poner en marcha a velocidad alta durante 1 minuto. Una vez finalizada la mezcla se introducía en el anillo y se enrasaba. Seguidamente se introducían las galgas para medir la temperatura y finalmente se cubría con un plástico y se tapaba la caja para evitar el aporte extra de agua en el mortero.

### 9.1.1 Base teórica del ensayo de expansión

La expansión que puede llegar a generar el mortero resulta difícil de medir, dado que la esta tiene lugar a medida que el material endurece. Es por este motivo que se ha planteado este ensayo complementario al de la norma UNE 80113 (AENOR, 2013). A diferencia del ensayo normalizado este sistema permite medir la deformación de acero generada por el material expansivo desde el momento posterior al amasado. La expansión y tensión generadas por este sistema no es un dato directo, sino que es necesario plantear unas bases de cálculo que permitan obtener dicho resultado.

En la figura A1.3 se muestra la base teórica del ensayo del anillo donde se definen los valores de expansión que deben tenerse en cuenta para el cálculo. En dicha figura se representan tres probetas de distintas longitudes para poder visualizar gráficamente los valores de las expansiones mencionadas. Así mismo se muestran las expansiones definidas en las probetas para el caso del anillo.

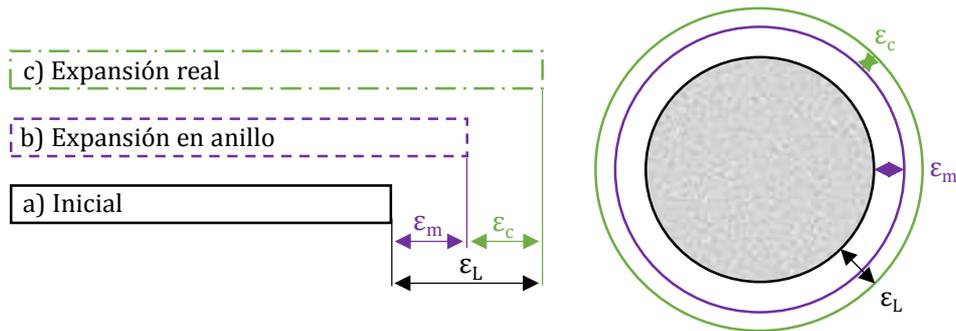


Figura A1.3 - Esquema de las deformaciones contempladas para el cálculo

Los tres rectángulos mostrados en la figura A1.3 representan tres probetas que muestran la longitud inicial del material (a), la longitud alcanzada mediante el ensayo del anillo (b) y la longitud final en un estado de libre movimiento (c). Como se observa, mediante el ensayo planteado, únicamente se mide una parte de la expansión total del material, por lo que para obtener dicha deformación habrá que tener en cuenta el confinamiento que nos genera el anillo de acero. En base a esto, el cálculo de la expansión libre del mortero se definirá según la ecuación [A1.1]:

$$\varepsilon_L = \varepsilon_m + \varepsilon_c \quad [A1.1]$$

dónde  $\varepsilon_L$  es la expansión libre;  $\varepsilon_m$  es la expansión mediada con el anillo y  $\varepsilon_c$  es la expansión de confinamiento que genera el anillo de acero. Para poder determinar el valor de estas variables se deberán definir las fuerzas que actúan en el sistema del ensayo.

En la figura A1.4 se ha representado gráficamente las fuerzas que intervienen durante el ensayo, que se definen como  $F_I$  y  $F_A$ , que representan la fuerza generada por el mortero al expandir y la fuerza que ejerce el anillo sobre el material respetivamente.

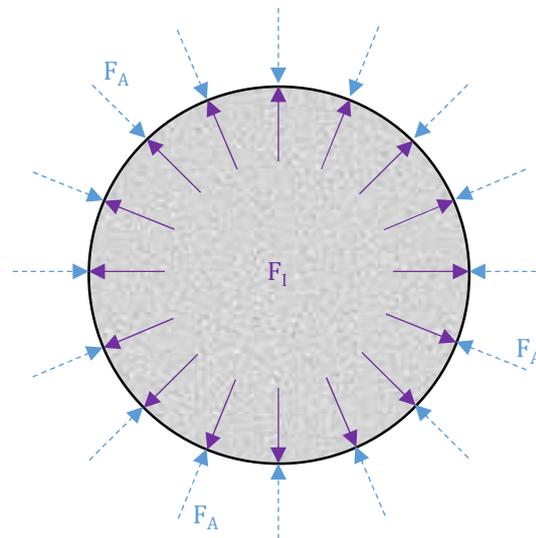


Figura A1.4 - Fuerzas actuantes durante el ensayo de expansión confinada

Al centrar el cálculo en un parte infinitesimal del anillo de acero se obtienen las fuerzas actuantes y se puede realizar la descomposición de estas. En la figura A1.5 se esquematizan las tensiones que aparecen en el anillo y en el hormigón, juntamente con la descomposición de las tensiones del anillo en fuerzas.

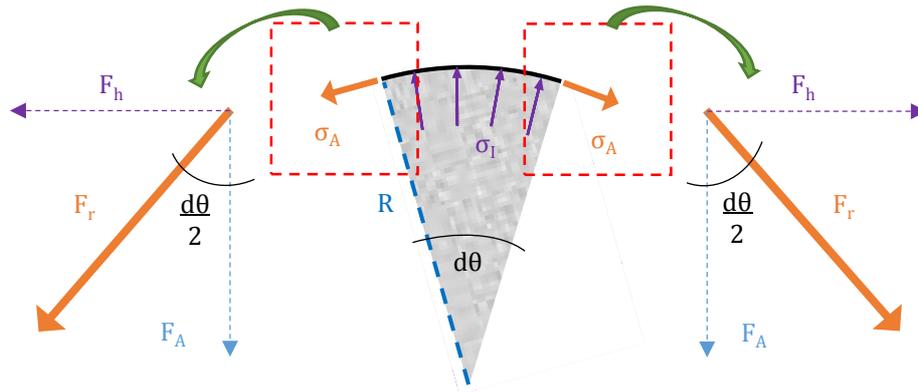


Figura A1.5 – Descomposición de las tensiones actuantes en el acero del anillo de confinamiento

dónde  $\sigma_A$  y  $\sigma_I$  corresponden a las tensiones del acero y del material respectivamente;  $d\theta$  es el ángulo;  $R$  es el radio del anillo y  $F_A$  y  $F_h$  representan la descomposición de la fuerza resultante del anillo que es  $F_r$ .

La figura A1.5 permite identificar las fuerzas y tensiones actuantes en una sección del anillo. Se observa que al analizar esta sección por ambos lados, puede descomponerse las tensiones  $\sigma_A$  en una fuerza horizontal y una vertical. Dicha descomposición se realiza mediante la ecuación [A1.2]. En el caso de la tensión que genera el material ( $\sigma_I$ ) se puede realizar la misma descomposición.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{e \cdot h} \quad [A1.2]$$

dónde  $\sigma$  es la tensión,  $F$  es la fuerza;  $A$  el área de la sección que se calcula mediante los valores de  $e$  que es el espesor del anillo y  $h$  que es la altura. Al aplicar la ecuación [A1.2] para descomponer ambas tensiones se obtienen como resultado las fuerzas  $F_A$  y  $F_I$  que corresponden a las fuerzas verticales que genera la tensión del anillo y la del material respectivamente. Las fuerzas horizontales que se descomponen de ambas tensiones se anulan por ser del mismo valor y de sentido contrario. La ecuación que resulta para  $F_A$  y  $F_I$  se muestra en las ecuaciones [A1.3] y [A1.4], respectivamente:

$$F_A = h \cdot e \cdot \sigma_A \cdot \frac{d\theta}{2} \quad [A1.3]$$

$$F_I = \sigma_I \cdot h \cdot R \cdot d\theta \quad [A1.4]$$

Hay que tener en cuenta que para ambas ecuaciones, al haberse considerado un diferencial del ángulo ( $d\theta$ ), el seno de dicho ángulo puede considerarse igual al ángulo. Una vez obtenidas las fuerzas actuantes que se derivan de cada material debe realizarse el equilibrio de estas, que se define mediante la ecuación [A1.5]:

$$F_I = 2 \cdot F_A \quad [A1.5]$$

Al sustituir las ecuaciones [A1.3] y [A1.4] en la ecuación [A1.5] se obtiene la ecuación [A1.6]. Finalmente, al despejar los términos se obtiene la ecuación [A1.7].

$$\sigma_I \cdot h \cdot R \cdot d\theta = 2 \cdot h \cdot e \cdot \sigma_A \cdot \frac{d\theta}{2} \quad [A1.6]$$

$$\sigma_I = \frac{e \cdot \sigma_A}{R} \quad [A1.7]$$

De las variables que se muestran en la ecuación [A1.7] únicamente el espesor del anillo ( $e$ ) y el radio ( $R$ ) son valores conocidos, por lo para poder introducir la deformación del anillo ( $\varepsilon_A$ ) es necesario introducir dicho término en la ecuación. Esta sustitución puede realizarse al aplicar la ecuación [A1.8] y sustituir en la ecuación [A1.7].

$$\sigma_A = E_A \cdot \varepsilon_A \quad [A1.8]$$

dónde  $E_A$  es el módulo de Young del acero del anillo y  $\varepsilon_A$  es la deformación del acero. Al sustituir dichos términos en la ecuación [A1.7] se obtiene la ecuación [A1.9] en la que ya puede determinarse el valor de la tensión que está ejerciendo el material sobre el anillo.

$$\sigma_I = \frac{e \cdot E_A \cdot \varepsilon_A}{R} \quad [A1.9]$$

Como se ha comentado anteriormente al aumentar de temperatura del material, el acero experimenta una dilatación que genera una expansión del anillo, por lo que el término  $\varepsilon_A$ , que se define en la ecuación [A1.9], debe de considerar este valor de deformación para restarlo de la deformación propia que genera el material. La deformación que experimenta el anillo se descompone según la ecuación [A1.10]:

$$\varepsilon_A = \varepsilon_{A_m} = \varepsilon_{A_E} + \varepsilon_T \quad [A1.10]$$

dónde  $\varepsilon_{A_m}$  se define como la deformación medida en el acero;  $\varepsilon_{A_E}$  corresponde a la deformación propia del acero y  $\varepsilon_T$  es la deformación debida a la dilatación térmica del acero. Al aislar la deformación propia del acero de la ecuación [A1.10] y sustituir  $\varepsilon_T$  por la ecuación de dilatación térmica se obtiene la ecuación [A1.11]:

$$\sigma_I = \frac{e \cdot E_A \cdot (\varepsilon_{A_m} - \varepsilon_T)}{R} = \frac{e \cdot E_A \cdot (\varepsilon_{A_m} - \alpha \cdot \Delta T)}{R} \quad [A1.11]$$

dónde  $\alpha$  y  $\Delta T$  corresponden al coeficiente de dilatación y al incremento de temperatura del acero respectivamente. Para el cálculo de  $\varepsilon_{A_m}$ , y en base al sistema de puentes con galgas usado, se ha aplicado la ecuación [A1.12]:

$$\varepsilon = \frac{-2V_r}{GF[(\nu + 1) - V_r(\nu - 1)]} \quad [A1.12]$$

dónde  $\varepsilon$  es la expansión (adimensional);  $\nu$  es el coeficiente de Poisson del acero y  $V_r$  se define según la ecuación, donde  $V_{out}$  corresponde al voltaje de salida y  $V_{in}$  al voltaje de alimentación de los puentes:

$$V_r = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad [A1.13]$$

Llegados a este punto se puede definir la deformación real del acero sin el efecto de la temperatura y el valor de la tensión interna del material, aunque con estos dos valores no se puede determinar todavía la deformación libre del material. Si volvemos a la ecuación [A1.1] podemos ver que para poder determinar la deformación libre del material es necesario determinar el valor de la deformación de confinamiento que genera el anillo ( $\varepsilon_c$ ). Para poder determinar la deformación de confinamiento es necesario conocer la tensión de confinamiento y el módulo del material. La tensión

de confinamiento es la que se debe a las fuerzas que ejerce el anillo sobre el material y que evitan que este expanda libremente. En este caso, las variables que han de intervenir para el cálculo de dicha tensión son las que se muestran en la ecuación [A1.14]:

$$\sigma_c = E_H \cdot \varepsilon_c \quad [A1.14]$$

dónde  $\sigma_c$  es la tensión de confinamiento;  $E_H$  es el módulo de Young del material analizado y  $\varepsilon_c$  es la deformación de confinamiento. Como la tensión de confinamiento es la que genera el anillo sobre el material, se puede igualar dicha tensión con la calculada en la ecuación [A1.11]. Por lo que para el cálculo de la deformación de confinamiento la tensión usada se asimilará a [A1.15]:

$$\sigma_I = \sigma_c \quad [A1.15]$$

Al haberse igualado la tensión interna  $\sigma_I$  a la tensión de confinamiento  $\sigma_c$ , se puede definir el cálculo de esta a partir de las ecuaciones [A1.11] y [A1.14]. Al sustituir los términos correspondientes y aislar la deformación de confinamiento se obtiene la ecuación [A1.16]:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_H} = \frac{e \cdot E_A \cdot (\varepsilon_{Am} - \alpha \cdot \Delta T)}{R \cdot E_H} \quad [A1.16]$$

En la ecuación [A1.16] se observa que para el cálculo de deformación de confinamiento intervienen tanto las características del acero del anillo, como las del material ensayado. Hay que tener en cuenta que el material se ensaya desde su etapa plástica hasta su endurecimiento, por lo que sus características, y con ellas se refiere al módulo ( $E_H$ ), variarán en función del tiempo, por lo que la ecuación [A1.16] deberá de contemplar este aspecto en el cálculo. Al realizar este cambio de variable, la ecuación [A1.16] se reescribiría tal como se muestra en la ecuación [A1.17]:

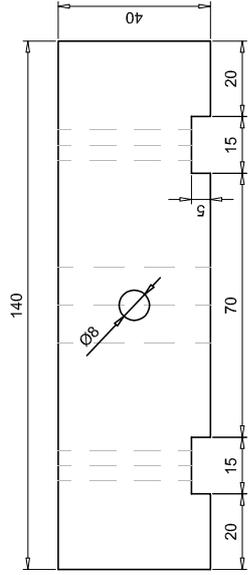
$$\varepsilon_c = \frac{e \cdot E_A \cdot (\varepsilon_{Am} - \alpha \cdot \Delta T)}{R \cdot E_H(t)} \quad [A1.17]$$

Para poder calcular la variación del módulo del material con el tiempo deberán de contemplarse ensayos complementarios.

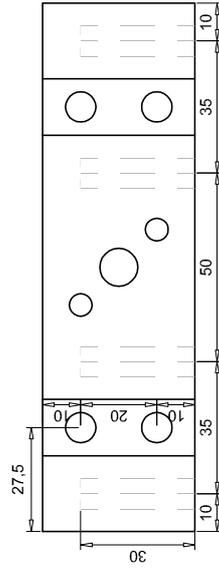
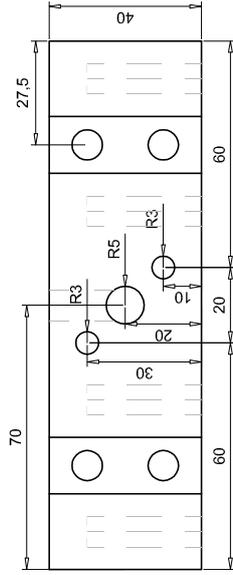
### 9.1.2 Planos de despiece del molde usado en el Método del molde mixto

En las siguientes páginas se adjuntan los distintos planos que contienen la geometría de cada una de las piezas que conforman el molde del Método del molde mixto. Así mismo se adjuntan dos planos adicionales donde se muestra la configuración en deformación libre y en confinamiento usadas en la campaña experimental.

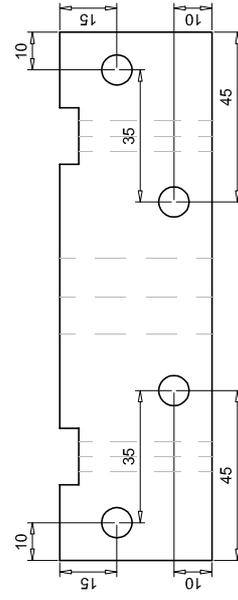
Planta



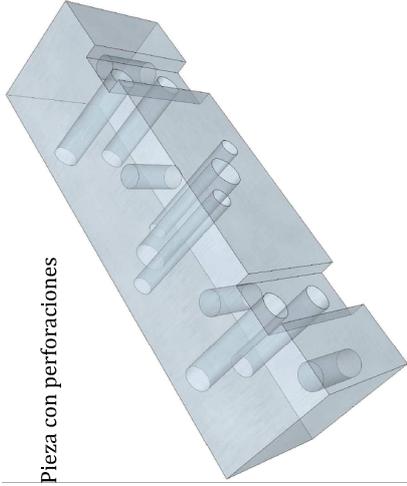
Alzado



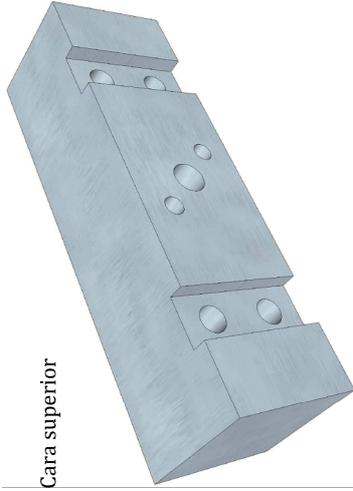
Base



Pieza con perforaciones



Cara superior



Base



Molde metálico expansión/fuerza

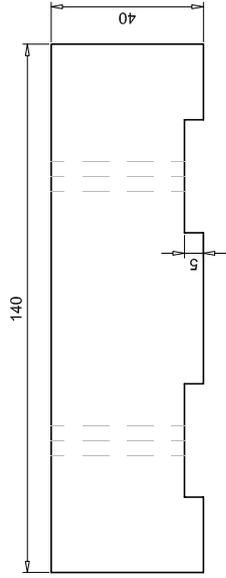
D.1

Plano de despiece - Pieza extremo I

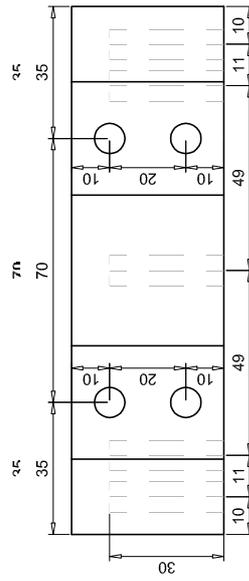
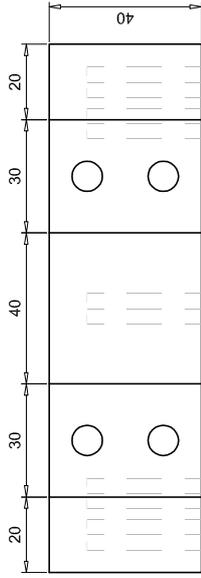
E1:2

UPC - ETSSECPB. Laboratori d'Estructures (LTE)

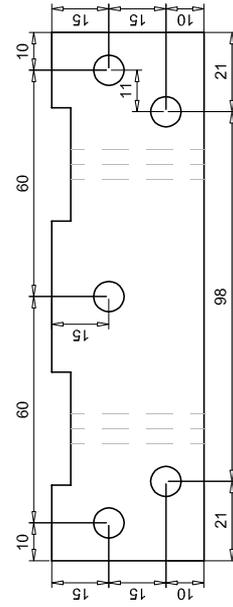
Planta



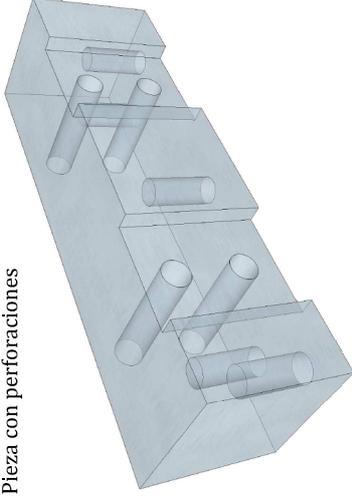
Alzado



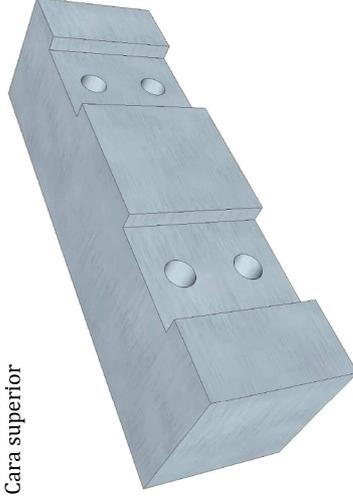
Base



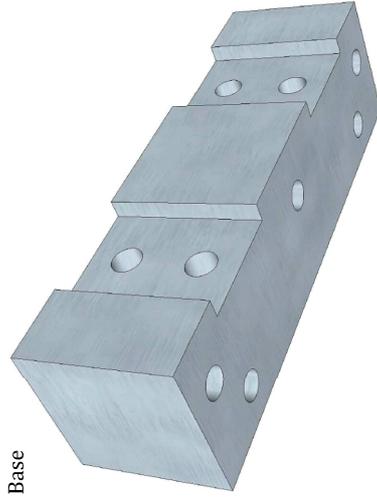
Pieza con perforaciones



Cara superior



Base

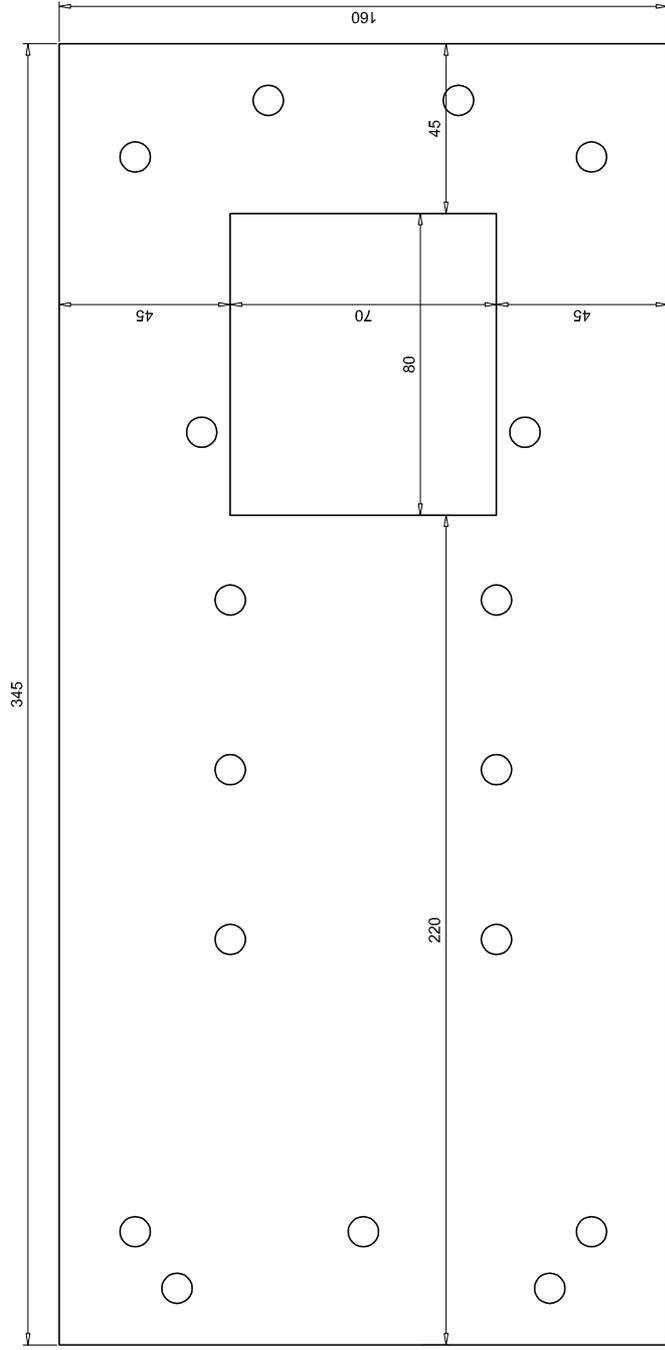


Molde metálico expansión/fuerza	D.2
Plano de despiece - Pieza extremo II	E1:2
UPC - ETSSECPB. Laboratori d'Estructures (LTE)	

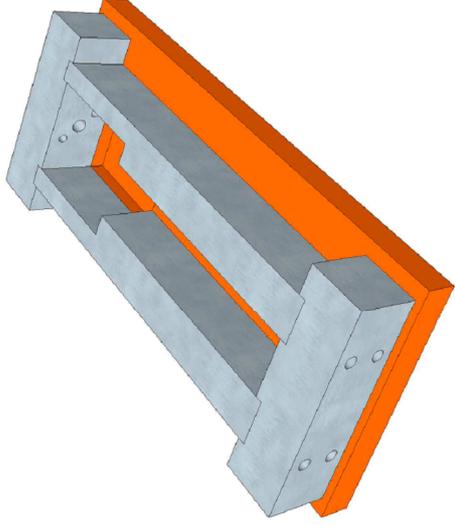




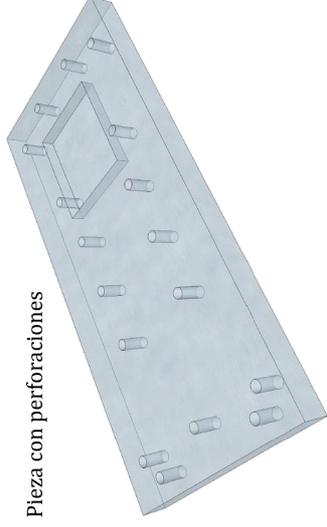
Planta



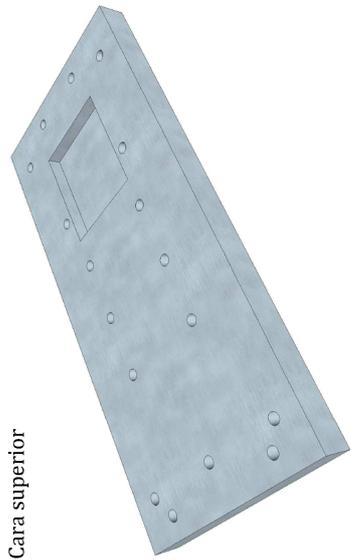
Alzado



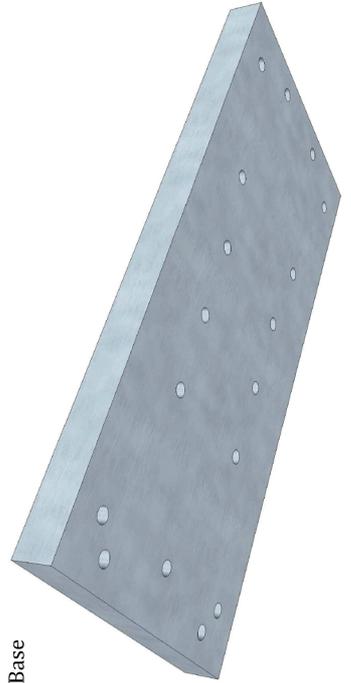
Pieza con perforaciones



Cara superior



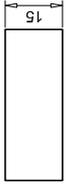
Base



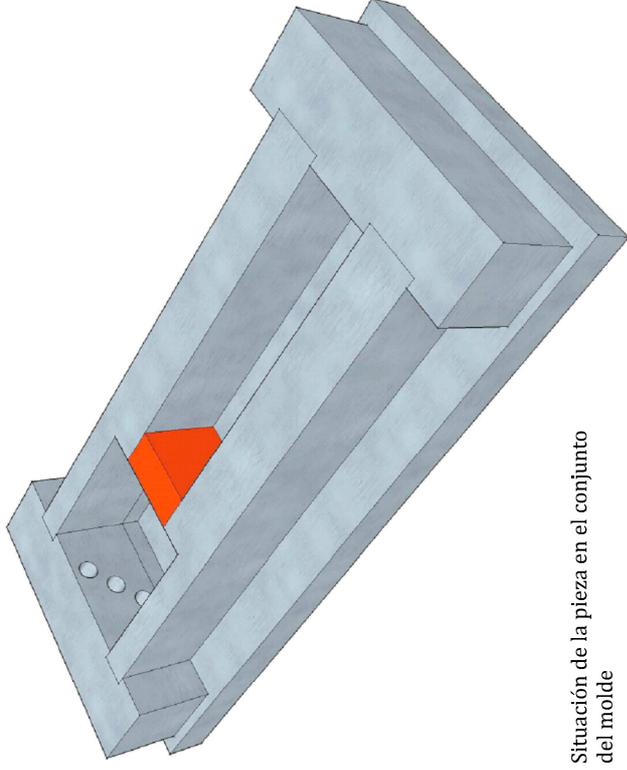
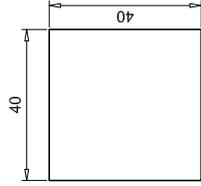
Molde metálico expansión/fuerza	D.5.1
Plano de despiece - Pieza base	E1:2
UPC - ETSSECCPB. Laboratori d'Estructures (LTE)	



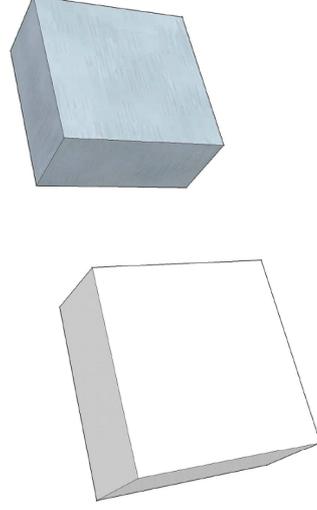
Planta



Alzado

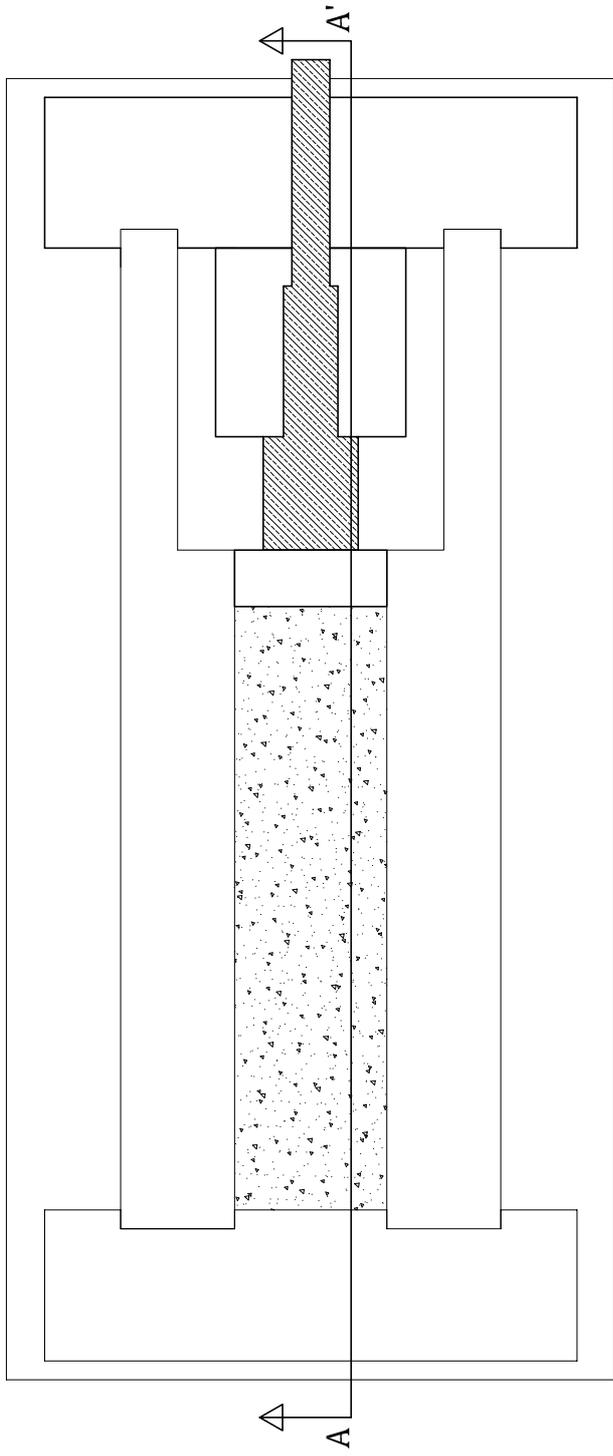


Situación de la pieza en el conjunto del molde

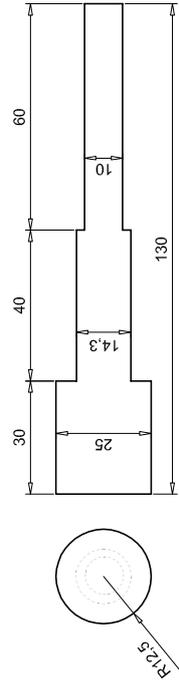
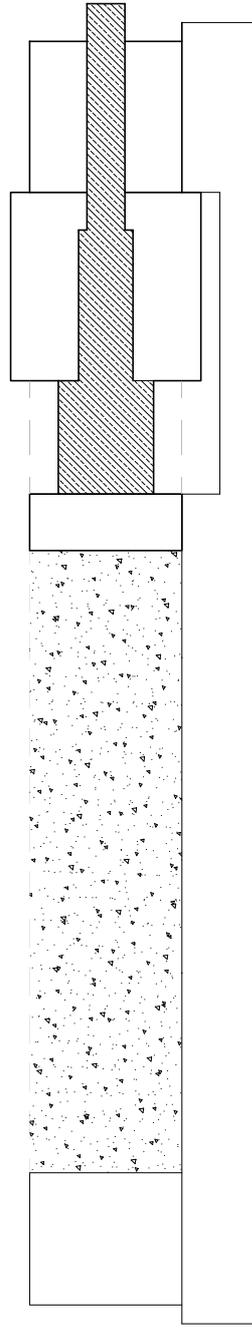


Molde metálico expansión/fuerza	D.6
Plano de despiece - Pieza móvil	E1:2
UPC - ETSSECCPB. Laboratori d'Estructures (LTE)	

Planta

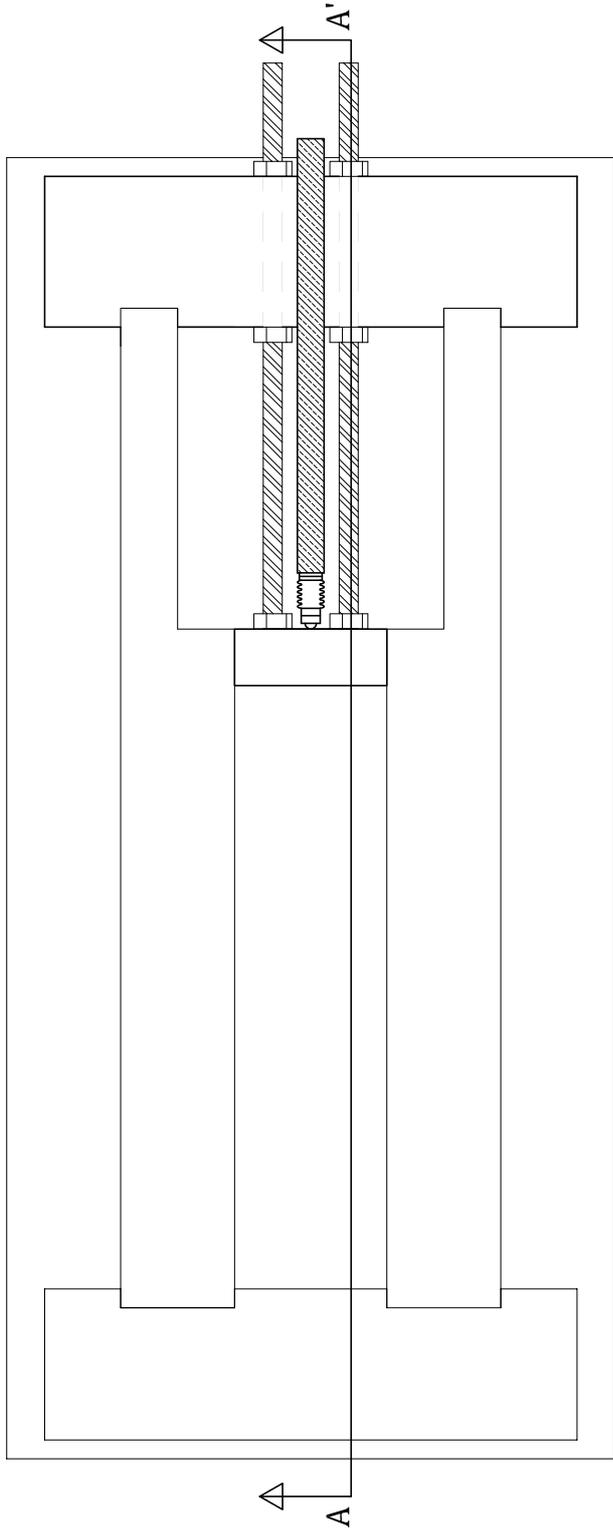


Alzado A-A'

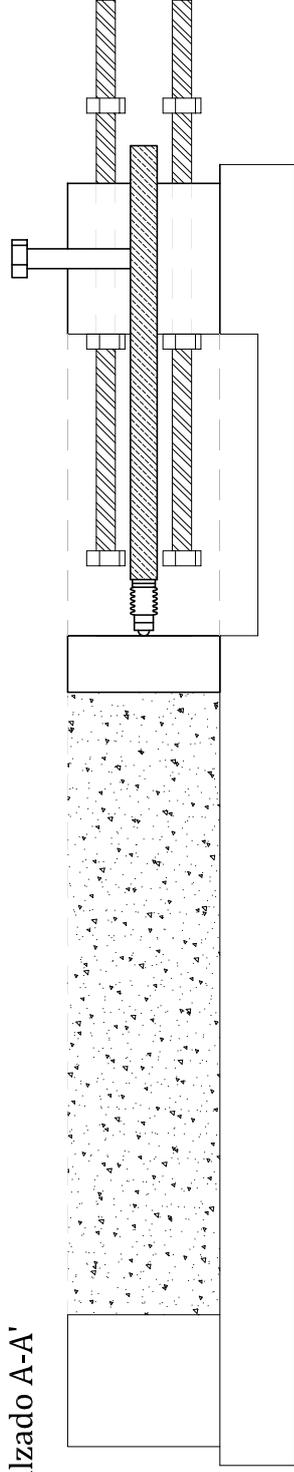


Molde metálico expansión/fuerza	D.7
Plano de despiece - Pieza auxiliar ( $\sigma$ )	E1:2
UPC - ETSSECCPB. Laboratori d'Estructures (LTE)	

Planta



Alzado A-A'



Molde metálico expansión/fuerza

D.8

Plano de despiece - Pieza auxiliar ( $\epsilon$ )

E1:2

UPC - ETSECCPB. Laboratori d'Estructures (LTE)