



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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESIS D'ESPECIALITAT

### Títol

**ESTUDIO RELATIVO A LA CARACTERIZACIÓN DE  
ADITIVOS ACELERANTES PARA HORMIGÓN  
PROYECTADO POR VÍA HÚMEDA**

### Autor/a

**Isaac Galobardes Reyes**

### Tutor/a

**Lluís Agulló Fité**

**Tomás Garcia Vicente**

### Departament

**Ingeniería de la Construcción**

### Intensificació

**Tecnología y construcción de estructuras**

### Data

**Julio 2009**

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Dr. Luis Agulló, tutor de este trabajo, por haberme dado la oportunidad de realizarlo y por la ayuda y dedicación mostrada durante el desarrollo del mismo. Así mismo quiero agradecerle la gran ayuda y el gran apoyo que me ha dado durante estos últimos años que he estado en la universidad.

Mención especial para Tomàs Garcia, co-tutor del trabajo, por su enorme ayuda durante las tareas realizadas y por sus sugerencias a la hora de enfocar el análisis de resultados en la presente memoria.

Gracias también a D. Jorge J. Pérez y D. Ángel Rueda miembros de la empresa Industrias Químicas del Ebro (IQE) por la confianza mostrada tanto a la Universidad Politécnica de Cataluña como a mi persona, y por la colaboración prestada durante la realización de este trabajo.

Agradecer al equipo de técnicos del Laboratorio de Tecnología de Estructuras y a Jussara Limeira por su valiosa ayuda durante la realización de la campaña experimental.

A mis padres, Joan y Clara. Sin ellos no estaría hoy en día donde estoy y no sería quien soy. Gracias por el esfuerzo que durante estos muchos años han realizado para darme la posibilidad de estudiar y por apoyarme siempre. Y a Joel, mi hermanazo, el cual siempre me ha entendido y me ha apoyado, tanto en los momentos buenos como en los malos. Os quiero.

A Elisenda, por estar siempre a mi lado y, por apoyarme y entenderme como sólo tú sabes hacerlo. Gracias por ser como eres y quererme tanto.

---

## ESTUDIO RELATIVO A LA CARACTERIZACIÓN DE ADITIVOS ACELERANTES PARA HORMIGÓN PROYECTADO POR VÍA HÚMEDA

Autor: Isaac Galobardes Reyes

Tutor: Lluís Agulló Fité / Tomàs Garcia Vicente

En el contexto del proceso constructivo de obras de hormigón resulta de especial interés, desde un punto de vista económico, la conjunción de dos etapas del proceso, colocación y compactación, en una sola acción. Esta característica la cumple perfectamente el hormigón proyectado. En esta técnica la propia puesta en obra incluye el proceso de compactación. Esto se consigue mediante la proyección a alta velocidad del material y aire a presión.

La proyección del hormigón tiene también inconvenientes, como por ejemplo el rebote del hormigón una vez proyectado, o la disminución de la adherencia de los áridos que conforman el hormigón. Por este motivo se está estudiando la manera de reducir estos inconvenientes y una de las soluciones más eficaces es el uso del aditivo acelerante. De aquí su importancia y el porqué del presente estudio.

Tras la realización de este estudio se ha observado que las características de los aditivos acelerantes libres de álcali son similares a las de los aditivos acelerantes basados en aluminatos, pero la similitud en las características se consigue con una mayor cantidad de acelerante libre de álcali respecto al contenido del acelerante basado en aluminatos. Además, con el estudio de diferentes familias de aditivos acelerantes libres de álcalis, se ha observado que la variación de los ácidos que componen los aditivos, tienen diferentes efectos en las características de cada uno de ellos.

Este estudio ha seguido la metodología que se describe seguidamente:

En el capítulo 1 se han definido el marco general y los objetivos principales que se persiguen en este trabajo así como los aspectos metodológicos utilizados para tales fines.

En el capítulo 2, fruto de una amplia revisión bibliográfica y, a falta de referencias técnicas sobre el objeto central de estudio de este trabajo, se presenta una vista general sobre el estado del conocimiento del material. Esta revisión se hace concretamente sobre propiedades del hormigón proyectado, campos de aplicación de este y, propiedades y características de las distintas tipologías de aditivos acelerantes para hormigón proyectado.

En el capítulo 3 se recogen los procedimientos de ensayo llevados a cabo durante la realización de la campaña experimental. Incluye todo lo relativo a los materiales que utilizarán para hacer las mezclas de las pastas de cemento y morteros a ensayar.

En el capítulo 4 se presentan los resultados y el análisis de los mismos, fruto de los ensayos llevados a cabo durante la realización de la campaña experimental. Este capítulo se articula a partir de las familias de acelerante estudiadas y de los acelerantes patrones.

En el capítulo 5 se recogen las conclusiones extraídas de la realización de los diferentes trabajos, adjuntándose un último punto con la bibliografía referenciada en el texto y otras publicaciones de carácter técnico consultadas durante la realización del estudio.

---

## STUDY RELATIVE TO CHARACTERIZE ADITIVES ACCELERATORS FOR THE DRY MIX METHOD SHOTCRETE

Author: Isaac Galobardes Reyes

Tutor: Lluís Agulló Fité / Tomàs Garcia Vicente

In context of the constructive process of concrete works it results specially interesting, from the economical point of view, the conjunction of two phases of the process, placing and compacting, in only one action. This characteristic is realized in concretes as shotcrete. In this technique, the own building placing included the compacting process. We can get it trough material's high velocity projection and using air compressed.

The concrete's projection has got disadvantages too. For example, the concrete's bounce when it has been projected, or the decrease of dry goods' stickiness. For that reason, scientists are studding about the way to reduce these disadvantages, and one of the most efficient solutions is the use of accelerator additives. Here, his importance and the reason of this study.

Alter the realisation of this study, it can be observed that the accelerator alkali-free additives' characteristics are similar to accelerator aluminates additives, but this characteristics' similarity can be gotten with a greatest alkali free accelerator quantity respect the aluminates accelerator content. Moreover, with the study about the different alkali-free accelerator additives' families, we observed that the acid components' additive variation have got different effects in them characteristics.

This study has followed that methodology:

In chapter 1 it was defined the general mark and the main objectives that were pursued in this study as well as the methodological questions used in order to get it.

In chapter 2, fruit of an extensive bibliographical revision and, due to the inexistence of technical references to the main object of study of this document, it is presented a general view of the state of art of the material. This revision it is done concretely on properties of the material, his applications and, proprieties and characteristics of the different accelerator additive typologies.

In chapter 3 are explained the procedure of test carried out during the realization of the experimental process. All relative about materials used to made to do the cement and mortar mixes are included.

In chapter 4 are presented the results and the analysis of those ones, resulting of the tests carried out during the realization of the experimental process. This chapter is articulated started from the different accelerator families studied and the two different referent accelerators.

In chapter 5 are explained the conclusions extracted during the realization of the different works of this study. It is attached a last point with bibliography referenced in text and other technical publications asked during the realization of the study.

---

## INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
Resumen.....	II
Abstract .....	III
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- ANTECEDENTES .....	1
1.2.- OBJETIVOS.....	2
1.3.-METODOLOGÍA.....	3
ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	5
2.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.2. EL HORMIGÓN PROYECTADO .....	6
2.2.1. Revisión histórica.....	6
2.2.2. Aspectos generales .....	6
2.2.3. Sistemas de proyección.....	7
2.2.4. Fabricación, puesta en obra y control de calidad.....	11
2.2.5. Características del hormigón proyectado .....	20
2.2.6. Aplicaciones .....	22
2.2.7. Componentes del hormigón proyectado .....	25
2.3. LOS ACELERANTES EN EL HORMIGÓN PROYECTADO.....	26
2.3.1. La hidratación del cemento y la relación con los acelerantes.....	28
2.3.2. Tipos de acelerantes para el hormigón proyectado.....	31
2.3.2.1. Silicatos Modificados .....	32
2.3.2.2. Aluminatos Sódicos o Potásicos .....	33
2.3.2.3. Álcali Free.....	36
PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	41
3.1. INTRODUCCIÓN.....	41
3.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	42
3.3. MATERIALES COMPONENTES.....	43
3.4. DOSIFICACIONES DE REFERENCIA.....	45

---

3.4.1. Dosificación de la pasta .....	46
3.4.2. Dosificación del mortero .....	48
3.5. FABRICACIÓN DE LAS MAZCLAS .....	49
3.5.1. Fabricación de pastas .....	49
3.5.2. Fabricación de morteros .....	49
3.6. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.....	50
3.6.1. Inicio/Final de fraguado en pastas .....	51
3.6.2. Inicio/Final de fraguado en morteros .....	52
3.6.3. Evolución de la temperatura en pastas y morteros .....	52
3.6.4. Resistencia a flexión y a compresión en morteros .....	54
3.6.5. Resistencia a la penetración en morteros .....	54
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
4.1. INTRODUCCIÓN.....	55
4.2. RESULTADOS RELATIVOS A LOS ENSAYOS REALIZADOS.....	56
4.2.1. Resultado y análisis de resultados relativos al inicio/final de fraguado en pastas.....	56
4.2.1.1. Acelerantes Patrones .....	56
4.2.1.2. Acelerantes AFA15XX.....	57
4.2.1.3. Acelerantes AFA16XX.....	58
4.2.1.4. Acelerantes AFA30XX.....	59
4.2.2. Resultado y análisis de resultados relativos al inicio/final de fraguado en morteros.....	60
4.2.2.1. Acelerantes Patrones .....	60
4.2.2.2. Acelerantes AFA15XX.....	62
4.2.2.3. Acelerantes AFA16XX.....	63
4.2.2.4. Acelerantes AFA30XX.....	65
4.2.3. Resultado y análisis de resultados relativos a la evolución térmica en pastas .....	67
4.2.3.1. Acelerantes Patrones .....	67
4.2.3.2. Acelerantes AFA15XX.....	68
4.2.3.3. Acelerantes AFA16XX.....	71

---

4.2.3.4. Acelerantes AFA30XX.....	74
4.2.4. Resultado y análisis de resultados relativos a la evolución térmica en morteros .....	76
4.2.4.1. Acelerantes Patrones .....	76
4.2.4.2. Acelerantes AFA15XX.....	78
4.2.4.3. Acelerantes AFA16XX.....	80
4.2.4.4. Acelerantes AFA30XX.....	82
4.2.5. RESULTADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS RELATIVOS A RESISTENCIAS A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN EN MORTEROS .....	84
4.2.5.1. Acelerantes Patrones .....	84
4.2.5.2. Acelerantes AFA15XX.....	87
4.2.5.3. Acelerantes AFA16XX.....	90
4.2.5.4. Acelerantes AFA30XX.....	94
4.2.6. RESULTADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS RELATIVOS A RESISTENCIAS A LA PENETRACIÓN EN MORTEROS.....	98
4.2.6.1. Acelerantes Patrones .....	98
4.2.6.2. Acelerantes AFA15XX.....	100
4.2.6.3. Acelerantes AFA16XX.....	102
4.2.6.4. Acelerantes AFA30XX.....	105
4.3. ANÁLISIS GLOBAL DE RESULTADOS RELATIVOS A LAS DISTINTAS FAMILIAS DE ACELERANTES.....	107
4.3.1. Acelerantes AFA15XX.....	107
4.3.2. Acelerantes AFA16XX.....	108
4.3.3. Acelerantes AFA30XX.....	109
CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	111
5.1. INTRODUCCIÓN.....	111
5.2. CONCLUSIONES GENERALES.....	112
5.3. CONCLUSIONES RELATIVAS .....	113
5.3.1. Conclusiones relativas a los ensayos AKF y ALNA.....	113
5.3.2. Conclusiones relativas a los ensayos Acelerantes AFA_15XX.....	115
5.3.3. Conclusiones relativas a los ensayos Acelerantes AFA_16XX.....	117

---

5.3.4. Conclusiones relativas a los ensayos Acelerantes AFA_30XX.....	120
5.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	122
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	125



## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1.- ANTECEDENTES

En el contexto del proceso constructivo de obras de hormigón resulta de especial interés, desde un punto de vista económico, la conjunción de dos etapas del proceso, colocación y compactación, en una sola acción. Esta característica la cumple perfectamente el hormigón proyectado. En esta técnica la propia puesta en obra incluye el proceso de compactación. Esto se consigue mediante la proyección a alta velocidad del material y aire a presión.

Esta técnica de hormigonado se consigue mediante dos maneras de proyección, la vía seca y la vía húmeda. Hoy en día la proyección vía húmeda tiene mayor peso respecto la vía seca, porque da una serie de ventajas a la hora de trabajar con hormigón proyectado.

La proyección del hormigón tiene también inconvenientes, como por ejemplo el rebote del hormigón una vez proyectado, o la disminución de la adherencia de los áridos que conforman el hormigón. Por este motivo se está estudiando la manera de reducir estos inconvenientes y una de las soluciones más eficaces es el uso del aditivo acelerante. De aquí su importancia.

Los aditivos acelerantes más utilizados en el mercado son los acelerantes basados en aluminatos. Estos aditivos acelerantes tienen la problemática de ser altamente corrosivos y dañinos para el medio ambiente. Por este motivo, la demanda de nuevos productos más "sostenibles" ha hecho que las empresas químicas hayan empezado a buscar solución al problema. El resultado ha sido un aditivo acelerante que, sin perder la eficacia de los acelerantes basados en aluminatos tradicionales, ofrece una mayor seguridad en obra, un menor

impacto medioambiental y unas mejores prestaciones en comparación con los anteriores aditivos. Estos acelerantes, denominados acelerantes alkali-free o libres de álcali, por sus propiedades químicas y prestaciones, son sin duda el empuje necesario para convertir el hormigón proyectado en una gran técnica en de la construcción moderna.

En este contexto el proyecto de investigación promovido por la empresa Industrias Químicas del Ebro (IQE), desarrollado conjuntamente con la Universidad Politécnica de Cataluña (Departamento de Ingeniería de la Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona) ha propiciado el marco idóneo para la realización de este estudio.

## 1.2.- OBJETIVOS

Dentro del campo del hormigón proyectado como material estructural, el presente estudio se centra, fundamentalmente, en la caracterización de diferentes familias de acelerantes para la proyección del hormigón por vía húmeda. Este estudio se ha desarrollado a nivel de pastas y morteros, como primer paso para caracterizar su comportamiento en el hormigón proyectado.

Los acelerantes utilizados han sido suministrados por Industrias Químicas del Ebro (IQE) y sus formulaciones corresponden a productos en etapa de desarrollo.

El estudio se ha realizado para una tipología de acelerantes, la libre de álcalis, para poderla comparar posteriormente con la tipología de acelerantes basados en aluminatos, que es la más usada hoy en día, pero también la que tiene mayor afección al medio ambiente y a la salud de las personas. Mediante dos patrones diferentes, un acelerante basado en aluminatos (ALNA) y otro acelerante libre de álcalis (AKF) se pretende caracterizar tres familias distintas de acelerantes libres de álcalis (AFA 15XX, AFA 16XX y AFA 30XX). Estas tres familias se componen de acelerantes de nueva fabricación que tienen el objetivo de ser usados para hormigón proyectado por vía húmeda, y cada una de estas familias se diferencia de la otra por tener una variación en ciertos componentes que conforman el aditivo acelerante.

Todo el estudio está orientado a conocer y establecer diferencias o similitudes de las propiedades de las distintas familias de acelerantes y de los patrones del estudio. Para ello se deberán realizar diferentes ensayos como son el inicio/final de fraguado, la evolución de la temperatura y el estudio de las resistencias.

Todos estos ensayos se realizan en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción y deben dar la información necesaria para poder caracterizar los aditivos acelerantes, de manera que para cada ensayo realizado se puedan obtener conclusiones para cada familia de acelerantes y para los

acelerantes patrones. Por esta razón uno de los primeros objetivos a considerar será el de conseguir una fabricación óptima de las muestras para que los ensayos con ellas den resultados admisibles.

Nos marcamos el objetivo general de llegar a comparar el comportamiento de los acelerantes libres de álcali y los acelerantes basados en aluminatos, para de esta manera ver si en la construcción se podría, o no, mejorar de esta manera, las condiciones en la obra y reducir el impacto medioambiental. Asimismo, en este objetivo general se incluye también el desarrollo y puesta de la metodología de ensayo para una caracterización eficiente de estos aditivos.

Durante la realización de este estudio nos hemos marcado también como objetivo analizar y comparar cada una de las familias de aditivos acelerantes libres de álcali que se ensayaran (AFA15XX, AFA16XX y AFA 30XX), y de la misma manera llegar a hacer lo mismo con los aditivos patrones (AKF y ALNA).

Finalmente se desea conocer las posibles variaciones de los aspectos vinculados a los procedimientos de ensayo utilizados, para de esta manera, poder mejorar posibles estudios futuros. Debemos tener en cuenta que, como se ha comentado anteriormente, cuanto mejor estén fabricadas las probetas a ensayar, y mejor se realicen los ensayos, más fiables serán los resultados obtenidos.

### 1.3.-METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos anteriormente se han llevado a cabo distintos trabajos, los cuales corresponden en gran medida a los diferentes capítulos de este estudio.

En el capítulo primero se ha definido, a través de los antecedentes y el marco general, el punto de partida de dicho estudio y sus desarrollos posteriores, así como el entorno en el que surge. Posteriormente se han definido los objetivos perseguidos con el presente trabajo así como la metodología seguida para su consecución.

En el segundo capítulo se presenta en primer lugar una revisión general de los aspectos más relevantes que inciden en el hormigón proyectado, prestando especial atención, en el proceso denominado vía húmeda. Se presentan en un primer momento aspectos básicos para, seguidamente, pasar a realizar una revisión histórica y, finalmente, describir los componentes, particularidades del proceso de fabricación, ejecución y ámbitos de aplicación del hormigón proyectado.

Por la gran importancia que tienen los aditivos acelerantes para que las aplicaciones constructivas del hormigón proyectado, se comentan los aspectos más importantes de estos aditivos. Se enumeran las familias que hoy en día se usan para acelerar el fraguado del hormigón proyectado, sus propiedades químicas, la manera con la que el hormigón proyectado adquiere sus resistencias debido a la incorporación de aditivos acelerantes y se mencionarán las características de funcionamiento, los mecanismo de actuación, y las ventajas e inconvenientes de cada una de las familias de acelerantes.

En el tercer capítulo presentamos el programa experimental que se ha seguido para realizar los ensayos de caracterización de los acelerantes basados en aluminatos, los acelerantes álcali free y sus familias modificadas, que como hemos visto en el capítulo anterior son los que están más solicitados en el mercado actual. Seguidamente se exponen las características de los materiales componentes utilizados, las dosificaciones de estos materiales y la manera en que se fabrican las muestras a ensayar. También se presentan los procedimientos de ensayo seguidos para poder caracterizar los aditivos acelerantes y se justifica el porque de cada uno de estos ensayos.

En el cuarto capítulo se exponen los resultados obtenidos y su análisis según los acelerantes estudiados. En primer lugar se presentan, para cada tipo de acelerante, los resultados de los ensayos que se han realizado tanto a nivel pasta como a nivel mortero, es decir, los ensayos de determinación de inicios y finales de fraguado y las evoluciones de temperaturas. Seguidamente, se presentan los resultados a nivel mortero con las resistencias a la flexión, a la compresión y a la penetración.

Una vez mostrados los resultados de cada ensayo, se comentan de forma general los análisis de estos resultados, para posteriormente poder concretar las conclusiones de este estudio.

En el capítulo quinto se presentan las conclusiones derivadas de las distintas tareas realizadas.

Finalmente se adjunta un apartado de bibliografía donde se recogen las diferentes fuentes consultadas, tanto las que aparecen citadas explícitamente en este texto como las que han servido para una mejor comprensión y conocimiento del objeto de estudio.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL CONOCIMIENTO

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

Se han comentado en el primer capítulo los antecedentes y los objetivos de esta tesina, y mencionado la metodología a seguir para obtenerlos, en este capítulo se presenta en primer lugar una revisión general de los aspectos más relevantes que inciden en el hormigón proyectado, prestando especial atención, en el proceso denominado vía húmeda -en la actualidad, técnica predominante frente a la vía seca especialmente en las obras de soporte de rocas, túneles y taludes-. Se presentan en un primer momento aspectos básicos para, seguidamente, pasar a realizar una revisión histórica y, finalmente, describir los componentes, particularidades del proceso de fabricación, ejecución y ámbitos de aplicación del hormigón proyectado.

Por la gran importancia que tienen los aditivos acelerantes para que las aplicaciones constructivas del hormigón proyectado, se comentan los aspectos más importantes de estos acelerantes. Se enumeran las familias que hoy en día se usan para acelerar el fraguado del hormigón proyectado, sus propiedades químicas, la manera con la que el hormigón proyectado adquiere sus resistencias debido a la incorporación de aditivos acelerantes y se mencionarán las características de funcionamiento, los mecanismo de actuación, y las ventajas e inconvenientes de cada una de las familias de acelerantes.

## 2.2. EL HORMIGÓN PROYECTADO

### 2.2.1. Revisión histórica

El hormigón proyectado o gunita, asociada a la máquina conocida como "Cement Gun", ha seguido un curioso camino desde su invención en 1909. Fue concebida inicialmente para recrear esqueletos de dinosaurios, por el naturalista Carl Akeley, pero no fue hasta la celebración de la "Cement Show" en New York en 1910 cuando se introdujo en el mercado de la construcción.

Rápidamente se fue extendiendo su uso hasta que en 1945 ya existían más de 5000 máquinas de Gunitar en más de 120 países, periodo en el cuál, se profundizó mucho en el conocimiento de la técnica, aplicándose en campos tan diversos como la reparación de estructuras, depósitos, chimeneas etc..

A principio de los 50's comenzó una época de crisis que duró hasta finales de los 70's, debido a la especulación económica de dicha industria, dañando la calidad y credibilidad de este proceso.

A principio de los 80's, gracias a los nuevos avances tecnológicos y al desarrollo de la química aplicada al hormigón, el hormigón proyectado recobró parte de la credibilidad perdida. Precisamente, la química es la ciencia que está tirando de esta técnica en los últimos años, y con más fuerza que nunca, ya que permite equiparar y en multitud de ocasiones superar, al hormigón moldeado tanto en calidad como rentabilidad económica.

La principal aplicación del hormigón proyectado ha sido en obras para construcción de sostenimiento de túneles, pero cada vez son mayores las realizaciones de obras como son la estabilización de taludes, reparación de estructuras, depósitos, complejos lúdicos etc, y que aunque aporten nuevos condicionantes, abren un amplio abanico de posibilidades y nuevos retos tecnológicos.

### 2.2.2. Aspectos generales

En el contexto del proceso constructivo de obras de hormigón la proyección del material sobre una superficie a alta velocidad constituye una técnica de puesta en obra interesante desde el punto de vista productivo, ya que reúne dos etapas del proceso (colocación y compactación) en una misma acción constituida por la proyección.

En la proyección, el material se introduce en un equipo de proyectar que lo impulsa a gran velocidad a través de una manguera hasta la boquilla de proyección. El control de la boquilla puede hacerse manualmente mediante un

operador que la sostiene, o bien de forma mecánica mediante un robot de proyección controlado a distancia por un operador.

El material proyectado (mortero u hormigón) puede aplicarse sobre cualquier superficie o inclinación de la misma, si bien parte del material rebota, al no adherirse a ella. Este material rebotado constituye una característica intrínseca asociada a esta técnica, que tiene incidencia tanto en las propiedades del material colocado como en los aspectos económicos asociados al mismo. La economía en este rebote constituye, en consecuencia, una de las prioridades en la aplicación.

Por otra parte, al proyectar contra superficies inclinadas (no horizontales), hace que el peso propio del material pueda ser mayor que las fuerzas de adherencia entre el material y el soporte, y en consecuencia desprenderse del mismo, factor que obliga a limitar el espesor de la capa a hormigonar. Como orden de magnitud, espesores mayores de 10 cm deben realizarse en dos etapas, ello implica que ha medida que aumentan los espesores, el rendimiento que puede alcanzarse con esta técnica disminuye, y por tanto, se ve limitado su campo de aplicación.

La proyección del hormigón se realiza, básicamente, mediante dos técnicas, denominadas vía seca y vía húmeda, las cuales dan lugar a materiales de características diferentes. Cabe mencionar la aparición de una técnica mixta o semi-húmeda, que como el propio nombre indica se queda a medio camino entre ambas técnicas.

En su aplicación se ha ido evolucionando en los últimos años desde la vía seca, mayoritaria a principios de los 90, hacía la vía húmeda utilizada hoy en día con gran profusión, habiendo influido en este cambio razones de tipo laboral, técnico, económicas y más recientemente ambientales.

Este último aspecto viene determinado por el rebote que se produce, el cemento y el agua discurren por la red de drenaje, en la mayoría de los casos natural, entrando en contacto con cursos de agua o lo que es más grave, con acuíferos subterráneos próximos a la zona de vertido. Debido al marcado carácter alcalino (pH 13-14) del hormigón, provoca una variación del pH<sup>+</sup> del agua (7-8), convirtiendo ese agua en inadecuada tanto para el hombre como para la gran mayoría de los seres vivos.

### 2.2.3. Sistemas de proyección

Hay que distinguir dos sistemas de aplicación, que se conocen con los nombres de "vía seca" y "vía húmeda". El primero se caracteriza principalmente porque la mezcla entre los materiales sólidos y el agua se produce justamente en la boquilla de proyección. Los áridos, el cemento y los

eventuales aditivos sólidos se vierten en la tolva de recepción, previamente mezclados, siendo estos impulsados a través de una manguera por medio de aire comprimido. Es justamente en la boquilla cuando se adiciona el agua necesaria para la hidratación del cemento, por medio de un dosificador paralelo. En la figura 2.1 se muestra claramente este proceso.

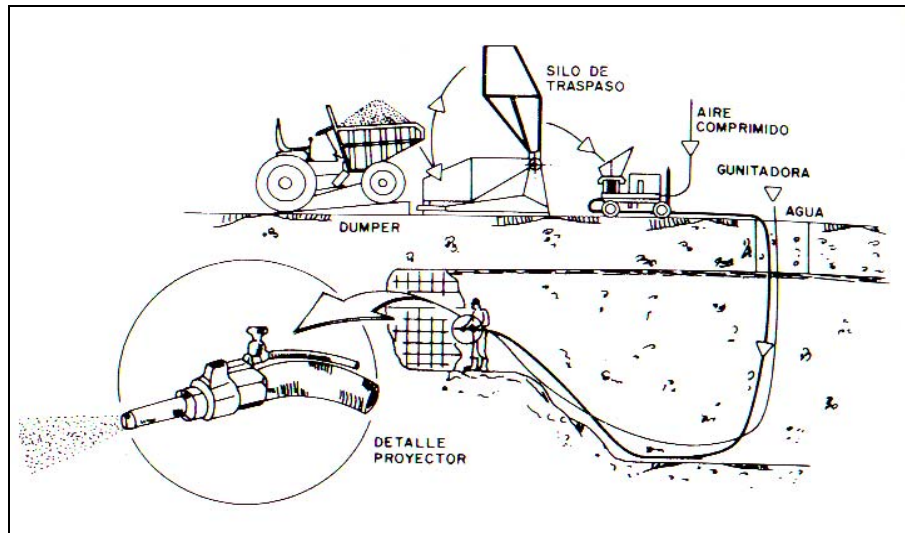


Figura. 2.1.-Esquema de proyección por vía seca.

Otro de los aspectos que caracteriza este proceso, es la necesidad de que un operario (gunitador) controle continuamente el paso del agua en la boquilla, estando sometido a la polvareda producida por el propio sistema de transporte.

El otro gran sistema de proyección denominado vía húmeda presenta variaciones tanto en la fabricación del hormigón como en el transporte del mismo. En la vía húmeda el material que se vierte sobre la tolva de recepción es ya hormigón, es decir, antes de iniciar la proyección el material ha sido amasado como si de un hormigón convencional se tratara. La impulsión del hormigón a través de la manguera se realiza por medio de una bomba de hormigón (movimiento de un pistón) hasta la boquilla, donde se le incorpora un chorro de aire a presión que le proporciona la velocidad necesaria para que el impacto sea efectivo.



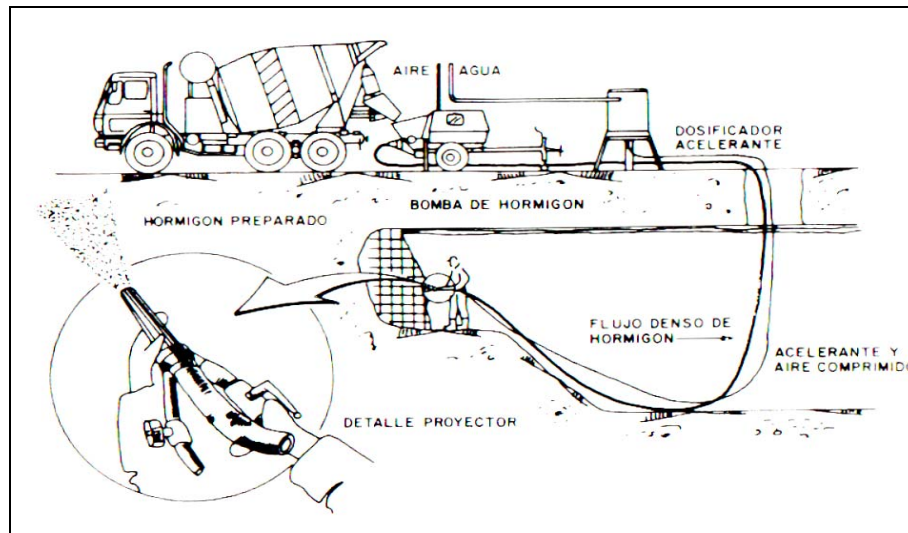


Figura. 2.2.-Esquema de proyección por vía húmeda.

La figura 2.2 muestra, al igual que se ha hecho con la vía seca, un esquema del proceso, con control manual de la proyección, existiendo hoy en día numerosos sistemas de proyección totalmente automáticos. En este sistema se tienen unas condiciones de ejecución mucho más controladas, con lo que se consigue una mayor uniformidad del paramento proyectado.

Aunque las dos técnicas están muy diferenciadas, existen modificaciones que tienden a perfeccionar los equipos y abarcar un mayor rango de aplicación. Así es el caso de la "tercera vía" o "semi-húmeda" en la que a la hora de la mezcla de las partículas sólidas, los áridos presentan un grado de humedad próximo al 2-3%, adicionando el resto del agua en la boquilla. De esta manera se reduce en gran medida la producción de polvo, mejorando considerablemente las condiciones ambientales de trabajo.

Las diferencias entre un hormigón proyectado aplicado por vía seca y por vía húmeda no son sólo las relativas al sistema de proyección elegido, sino que los hormigones resultantes son dos materiales totalmente diferenciados. La elección de uno u otro tipo de hormigón asociado a una técnica de proyección, va en función de diversos factores, algunos de los cuales se señalan a continuación.

- Características físicas, químicas y mecánicas del hormigón: En condiciones análogas se puede alcanzar mejores prestaciones con la vía húmeda, ya que usualmente introduce menos aire por las diferencias en el sistema de transporte y la dosificación está más controlada, especialmente la relación agua / cemento, ya que se realiza de manera análoga a un hormigón moldeado.
- Características de producción: La vía seca es más versátil, mientras que la vía húmeda requiere grandes tajos bien organizados para alcanzar altos

rendimientos. Ahora bien, la aparición de los inhibidores de fraguado en el hormigón ha contribuido de forma notable a flexibilizar la vía húmeda.

- Características de la obra (elemento lineal o no, superficie a proyectar, geometría del elemento, otros): En túneles especialmente, si se quieren mantener condiciones de producción con altos rendimientos hay que emplear equipos automáticos, lo que facilita el acceso a la vía húmeda.
- Características de la empresa: Una empresa pequeña poco especializada tiende a la vía seca, mientras que en el caso contrario tendería a la vía húmeda, en la cual los equipos son más caros y voluminosos. No obstante, en este planteamiento hay que tener en cuenta el factor humano (inercia del usuario en la utilización de una vía), que puede cambiar el mismo.
- Características medioambientales: Las crecientes exigencias respecto al contenido de polvo emitido en el entorno de las obras con hormigón proyectado, y particularmente las ubicadas en entornos subterráneos como es el caso de los túneles, propician la adopción de procesos constructivos que disminuyan este contenido. En este sentido, una solución posible es la adopción de la proyección por vía húmeda.

En España, con frecuencia, las aplicaciones del hormigón proyectado han tenido niveles de exigencia bajos desde el punto de vista estructural (piscinas, estabilización de taludes etc) lo que ha influido en la potenciación de la vía seca. No obstante, las cada vez mayores prestaciones que se le requieren al hormigón proyectado como material estructural, la posibilidad de obtener altos rendimientos de proyección robotizada junto a las ventajas de tipo medioambiental y de seguridad y salud de los trabajadores, hace que la tendencia actual, sobre todo en túneles, sea la utilización masiva de la vía húmeda. A continuación la tabla 2.1 presenta un resumen de las diferencias técnicas y económicas existentes entre ambos sistemas de proyección.

Vía seca	Vía húmeda
Menor coste de equipo	Mayor coste de equipo
Relación a/c variable (control en boquilla)	Dosificación de agua controlada
Menor rendimiento de equipo	Mayor rendimiento (con equipos automáticos)
Mayor rebote	Menor rebote
Permite mayores distancias del equipo al punto de aplicación.	Menores distancias del equipo al punto de aplicación ( máx 30 m)
Mayor adherencia	Menor adherencia
Las interrupciones no retardan el proceso en exceso	Interrupciones muy problemáticas

Vía seca	Vía húmeda
Peores condiciones ambientales de trabajo	Mejor ambiente de trabajo (se genera menos polvo)
Menor coste de limpieza pero mayor desgaste	Mayor coste de limpieza pero menor desgaste
Espesores elevados mediante varias aplicaciones	Permite espesores mayores en una sola aplicación

Tabla. 2.1.-Comparación vía seca-vía húmeda.

#### 2.2.4. Fabricación, puesta en obra y control de calidad.

Hay tres factores principales, a parte de las características de los materiales, que influyen de manera fundamental en la fabricación y puesta en obra del hormigón proyectado que son: la planta de fabricación, el equipo de proyección y por último el operador ó gunitador.

La fabricación del hormigón proyectado por vía húmeda necesita hacerse en plantas dotadas de todos los elementos necesarios como la amasadora, elemento imprescindible para conseguir una mezcla homogénea, sistemas precisos de dosificación de aditivos y de los áridos. Uno de los factores que dificultan el correcto funcionamiento de los robots estriba en una mezcla no homogénea, por ejemplo cuando se utilizan fibras metálicas no se suele conseguir una buena dispersión de las mismas.

En cuanto a los materiales componentes utilizados normalmente en la fabricación de hormigón proyectado, son muy similares a los empleados en los morteros y hormigones tradicionales.

Se pueden emplear prácticamente todos los tipos de cementos y sus mezclas con cales hidráulicas, sin embargo, en aplicaciones en las que se requieren elevadas resistencias iniciales, el empleo de algunos tipos de cementos y mezclas está proscrito, utilizándose normalmente cemento Portland tipo I con categorías 42.5 y 52.5.

En cuanto a los ambientes de exposición, se sigue los mismos criterios que indica la E.H.E 98 (Instrucción de Hormigón Estructural Española).

Las dosificaciones de cemento son, en general, altas, llegándose hasta los 450-500 Kg/m<sup>3</sup>, dependiendo del tipo de aplicación. Acompañando al cemento pueden emplearse adiciones de cenizas volantes, microsílíce, látex, poliméricos, fibras etc. Este tema se aborda con mayor énfasis en el punto 2.2.8.

El agua debe estar libre de cualquier sustancia que pueda perjudicar al hormigón o a cualquier otro componente de la mezcla, como pueden ser las fibras metálicas, mallazos etc, rigiéndose por los criterios definidos en la E.H.E

98. El agua total, al igual que en un hormigón convencional, es la suma del agua de adición más la propia de los áridos.

En el sistema de la vía húmeda, como ya se ha comentado, el agua se incorpora a los restantes componentes de la mezcla antes del transporte, y su contenido depende de las características del material a proyectar y de las limitaciones impuestas por el equipo de proyección. La relación agua-cemento en la vía húmeda, con la ayuda de superplastificantes va desde 0.35 hasta un máximo de 0.55.

Los áridos son el elemento de mayor volumen y peso que interviene en la fabricación del hormigón proyectado. Entre varios aspectos a considerar, y en función de las resistencias a la compresión que se especifiquen, han de considerarse aspectos como el rebote potencial, adherencia entre capas, si son materiales naturales o de machaqueo, granulometrías, etc.

También ha de considerarse la posible reacción álcali-árido, ya que puede ser el detonante de graves anomalías en las propiedades del material.

En el hormigón proyectado por vía húmeda tradicionalmente se utilizan áridos de 12 mm como fracción gruesa, no obstante, si queremos reducir el rebote se puede utilizar el árido de 8 mm, sin afectar a las resistencias finales.

Las arenas finas suelen favorecer la retracción y una mayor demanda de agua, por lo que deberán escogerse de acuerdo con un huso granulométrico adecuado.

A modo de orientación, se adjunta la tabla 2.2 que describe el huso de referencia que recomienda la normativa EFNARC, de amplia aceptación en Europa.

Tamiz mm	Mín %	Máx %
0.125	4	12
0.250	11	26
0.50	22	50
1.00	37	72
2.00	55	90
4.00	73	100
8.00	90	100
16.00	100	100

Tabla. 2.2.-Huso granulométrico EFNARC.

No obstante, para el relleno de grandes cavidades pueden emplearse áridos de hasta 25 mm.

Uno de los componentes que se vienen utilizando cada vez con más frecuencia en el hormigón proyectado es la microsílice, en todas sus formas de presentación, de entre las que se pueden destacar el humo de sílice densificado, el humo de sílice modificado o el humo de sílice en slurry y la sílice coloidal.

Otro de los componentes habituales en muchas aplicaciones de hormigón proyectado son las fibras, tanto plásticas como metálicas, que se utilizan como material de refuerzo.

Las fibras metálicas de acero de bajo contenido en carbono, con longitudes de hasta 30 mm, son las más empleadas en sostenimiento de túneles, revestimiento de taludes, refuerzos estructurales, etc. La dosificación más usual corresponde a valores entre 25-45 kg/m<sup>3</sup> para fibras metálicas y de 4,5-10 kg/m<sup>3</sup> para fibras sintéticas.

La incorporación de fibras modifica las propiedades de la masa fresca, reduciendo al mismo tiempo la fisuración y retracción, e incrementando la tenacidad del hormigón endurecido.

Hoy en día, la utilización de fibras metálicas es mayoritaria en todo tipo de aplicaciones frente a las fibras sintéticas, puesto que hasta el momento las prestaciones que se obtienen con estas últimas son bastante inferiores. Recientemente han aparecido en el mercado unas fibras sintéticas de alto módulo, que con dosificaciones de 10-12 kg/m<sup>3</sup>, alcanzan valores de absorción de energía similares a los que se alcanzan con dosificaciones de 30-40 kg/m<sup>3</sup> de fibras metálicas de buena calidad, G. Canals (2002). Esto presenta ventajas en ambientes con presencia de agua, puesto que uno de los principales problemas de la fibra metálica es su rápida y generalizada corrosión, con los problemas que ello puede originar en el resto de la estructura. No obstante, la cantidad de fibras no es un inconveniente indicativo, ya que la forma y el tamaño influye de forma decisiva en las propiedades del hormigón.

Es frecuente que en la adición de fibras metálicas durante la fabricación del hormigón, presenten problemas en la dispersión de estas, aunque la utilización de superplastificantes que contienen dispersantes y la utilización de amasadoras en la fabricación del hormigón, reduce en su totalidad esta clase de problemas.

De todas formas, no se puede extrapolar resultados de unas aplicaciones a otras, dada la variedad de tipos de fibras, forma, longitudes, diámetros, materiales etc.

Al igual que ocurre en el ámbito del hormigón moldeado, se utilizan gran variedad de aditivos químicos como solución a diversos problemas asociados principalmente a la puesta en obra.

Una vez realizada una breve descripción de los diferentes componentes que forman parte del hormigón proyectado, pasamos a abordar lo relativo a la puesta en obra del material.

En la proyección por vía húmeda, el transporte del material a través de la manguera hasta la boquilla de proyección, se puede realizar mediante dos procesos bien diferenciados: el flujo diluido y fluido denso. El flujo diluido (semi-húmeda), se encuentra actualmente en franco retroceso, ya que en comparación con el flujo denso no aporta grandes ventajas.

Para la proyección por flujo denso existen en la actualidad varios tipos de sistemas, el manual, en el que el operario/gunitador es el que controla la distancia, ángulo y espesor de proyección con sus propias manos, hasta los robots totalmente automáticos con control del espesor de gunita proyectada, siendo estos últimos especialmente diseñados para frentes de excavación en obras subterráneas, donde por las condiciones de espacio, salubridad e inseguridad del gunitador provoca una disminución en el rendimiento de la proyección, además de la homogeneidad del área proyectada.

El problema de la proyección por flujo denso viene de la necesidad de adaptar los tradicionales equipos de bombeo de hormigón, con lo que la cadencia de impulsos de los pistones da lugar a discontinuidades en la boquilla, que a su vez se traducen en la pérdida de homogeneidad del producto, efecto que se hace más evidente en el sistema de proyección manual que en el automatizado.

En la actualidad existe una gran variedad de robots automáticos (figura 2.3), boquillas de proyección, dosificadores de aditivos, etc, con lo que se debe intentar adaptar el equipo de proyección en función de la obra a acometer, no existiendo en la actualidad ningún equipo que se adapte al 100% de los requisitos que pueden aparecer dentro del amplio campo del hormigón proyectado.



Figura. 2.3.-Robot de proyección automático de última generación.

Tanto la calificación del gunitador como el proceso de proyección, varía sustancialmente en función del tipo de aplicación en particular. En el caso de una proyección sobre una superficie horizontal, escasamente armada y espesores delgados, puede realizarla un operario que simplemente conozca los procedimientos básicos de la proyección.

Sin embargo, la proyección de una superficie vertical, con la aplicación de varias capas de espesor considerable, requiere un operador experimentado, ya que el resultado final del material dependerá en gran medida, de factores como ángulo de proyección, distancia o velocidad de material, anteriormente mencionados.

Como anteriormente se ha comentado, una de las características de calidad del hormigón proyectado es la homogeneidad. Esta sólo se consigue manteniendo un flujo continuo y uniforme del material a través de la boquilla, cosa arto difícil en lugares estrechos o con gran diversidad de frentes.

Una vez que el flujo del material se produce de forma continua, se orienta la boquilla hacia la superficie a proyectar, intentando mantener cuanto sea posible un ángulo de  $90^\circ$  con ésta, y nunca inferior a  $45^\circ$ . La distancia de la boquilla a la superficie a proyectar normalmente oscila entre 0.6 a 1.5 metros, considerándose este rango como un equilibrio razonable entre el rebote del material y la compactación proporcionada, según la distinta bibliografía consultada.

Por otro lado, en zonas densamente armadas, el gunitador debe variar el ángulo continuamente con el fin que las barras de acero queden totalmente rodeadas de material, a fin de que no queden huecos que puedan provocar problemas de adherencia acero-hormigón.

La velocidad de proyección también tiene gran importancia, ya que de ella depende en parte, el rebote del material. La velocidad del material viene

determinada por la presión del aire introducido en la boquilla, recomendándose valores entre 5-7 bares.

En la tabla 2.3, se presentan diferentes variables que influyen directamente en el proceso de proyección.

Velocidad de Proyección	
Alta	Baja
Más rebote	Menos rebote
Mayor compactación	Menor compactación
Mayor mezclado*	Peor mezclado*
Distancia	
Alejarse	Acercarse
Menos rebote	Más rebote
Menos compactación	Mayor compactación
Más porosidad, huecos	Incrementa la densidad
Agua	
Más	Menos
Menos rebote	Más rebote
Mejor llenado de huecos	Más porosidad, huecos
Menor resistencia	Mayor resistencia
Aumenta la permeabilidad	Reduce la permeabilidad

Tabla. 2.3.-Variables durante el proceso de ejecución.

Una vez colocado el material, como en todo tipo de hormigones, el hormigón proyectado debe ser cuidadosamente curado, especialmente en este caso, puesto que su aplicación suele hacerse sobre áreas de gran superficie y con espesores relativamente delgados. Esto unido a las grandes cantidades de cemento, hace que el curado a edades tempranas sea especialmente importante para reducir la fisuración por retracción, fenómeno intrínseco al hormigón, pero no por ello debe descuidarse, puesto que afecta muy negativamente tanto a la durabilidad del hormigón como a la estética del elemento.

El método óptimo de curado es mantener la superficie del hormigón constantemente húmeda durante un periodo mínimo de 7 días, tapándola con una arpillera para mantener una humedad alta. Alternativamente se pueden usar agentes de curado, en forma de membrana líquida, que evita la libre evaporación del agua.

Si la aplicación del hormigón proyectado va a realizarse en diferentes capas o bien, las operaciones de acabado superficial se retrasan, es conveniente cubrir la superficie mediante plásticos con el fin de evitar el secado rápido. En aplicaciones al aire libre y en épocas de fuerte insolación, se procurará que estos



plásticos sean de colores claros y se aumentará la frecuencia con la que se aplica el riego.

Ni que decir tiene, en épocas de tiempo frío, se protegerá el material con arpilleras u otros materiales aislantes de forma que el hormigón se mantenga a una temperatura adecuada para permitir un desarrollo normal de la resistencia.

En cuanto a las operaciones de acabado las técnicas son similares a las que se vienen aplicando para el hormigón moldeado. Por su importancia práctica, cabe destacar el rastrillado de toda la superficie. Como resultado de esta operación queda una textura linear muy rugosa, ideal para los casos en que deben aplicarse varias capas.

Además, si las características del hormigón proyectado dificultan la posibilidad de obtener unos requisitos estéticos determinados, por ejemplo, la incorporación de fibras, siempre existe la posibilidad de aplicar una última capa con diferente composición para mejorar la textura y tonalidad del hormigón.

Otro de los aspectos importantes dentro del campo de las obras de hormigón, se encuentra el control de calidad, siempre necesario para asegurar que el material proyectado cumple con los requisitos especificados en el proyecto.

Puede decirse que el control de calidad empieza con los ensayos previos realizados con anterioridad al comienzo de la obra en un tramo de ensayo a fin de conseguir una mezcla colocada que cumpla los requisitos especificados de evolución de resistencias con el tiempo, compacidad, impermeabilidad, homogeneidad, adherencia al soporte, porcentaje de rebote, etc. Estos ensayos previos deben realizarse con las instalaciones y materiales del hormigón definitivos.

Debido a la inevitable dispersión de los resultados en los ensayos, el diseño de la mezcla debe de tratar de producir un material con una resistencia superior al 15-20% de la especificada, sin pasar de los 6-7 MPa.

Los ensayos de control tienen como finalidad comprobar que la ejecución de la proyección se lleva a cabo siguiendo las directrices especificadas o bien la posibilidad de detectar fallos en la etapa diseño del material etc. En la tabla 2.4 se indica la frecuencia con que deben realizarse estos ensayos.

Edad	Tipo	Frecuencia
H/MP Joven	H/MP I H/MP II	Una determinación cada semana de trabajo.
H/MP II	H/MP II	Una determinación al menos cada 2000 m <sup>2</sup> de superficie proyectada o 2 semanas de trabajo.

Edad	Tipo	Frecuencia
H/MP III	H/MP III	Una determinación al menos cada 2000 m <sup>2</sup> de superficie proyectada o 1 semana de trabajo. Como mínimo una vez al mes se realizará una granulometría y una determinación de la humedad.

Tabla. 2.4.-Frecuencia de los controles en la fabricación del hormigón.

Otro tipo de ensayos necesarios, sobre todo cuando se precisen altas resistencias iniciales son los ensayos de control de endurecimiento. Este tipo de ensayos se realizan in-situ pudiendo así comprobar que el hormigón gana resistencia según lo previsto y en caso contrario poder buscar soluciones lo antes posible estando muy relacionados con los criterios de aceptación o rechazo.

El criterio de aceptación frente a cualquier propiedad radica en que el valor medio de los resultados obtenidos no alcance los valores solicitados por el proyecto.

Los métodos de ensayo existentes se pueden dividir en ensayos directos o indirectos. Los indirectos normalmente son utilizados para determinar la resistencia a compresión a edades tempranas, cuando no se pueden extraer testigos del paramento proyectado, de entre los que destacan el ensayo de penetración (UNE 83 603/92), ensayo de arrancamiento (UNE 83 604/93) (figura 2.4) y el ensayo de penetración-extracción (UNE 83 605/91) (Figura 2.5).



Figura. 2.4.-Aparato para el ensayo de arrancamiento.



Figura. 2.5.-Penetrómetro.

Los tres métodos citados proporcionan medidas indirectas de la resistencia a compresión obtenidas a través de unas curvas de calibración.

El valor absoluto de estos resultados no reproduce ningún valor de interés, sino se pueden comparar con otros que consideramos como referencia, para así poder decidir si la ganancia de resistencia va bien o si por el contrario debe rechazarse.

Estos ensayos tienen su rango de validez dentro de las primeras 48 horas, a partir de ahí es más eficaz la utilización de métodos directos. En la figura 2.6 se indica cuando es conveniente la utilización de uno u otro método de ensayo.

De entre los ensayos directos, los más comunes son el ensayo de resistencia a compresión y el de determinación del módulo de elasticidad sobre probetas testigo, por su relación directa con el cálculo estructural. Cuando se incorporan fibras se deben realizar los ensayos de resistencia a flexión y resistencia residual (ensayos de viga) y los ensayos de placa ó energía de absorción (EFNARTC, ROUND TEST y otros).

Otros ensayos menos habituales, pero no menos importantes en casos especiales, son los de permeabilidad, adherencia, resistencia a ciclos hielo-deshielo, porosidad, contenido de aire ocluido, retracción etc.

Para el control y verificación del hormigón proyectado existe una normativa española y también otra europea a disposición de los que diseñan los proyectos y contratistas.

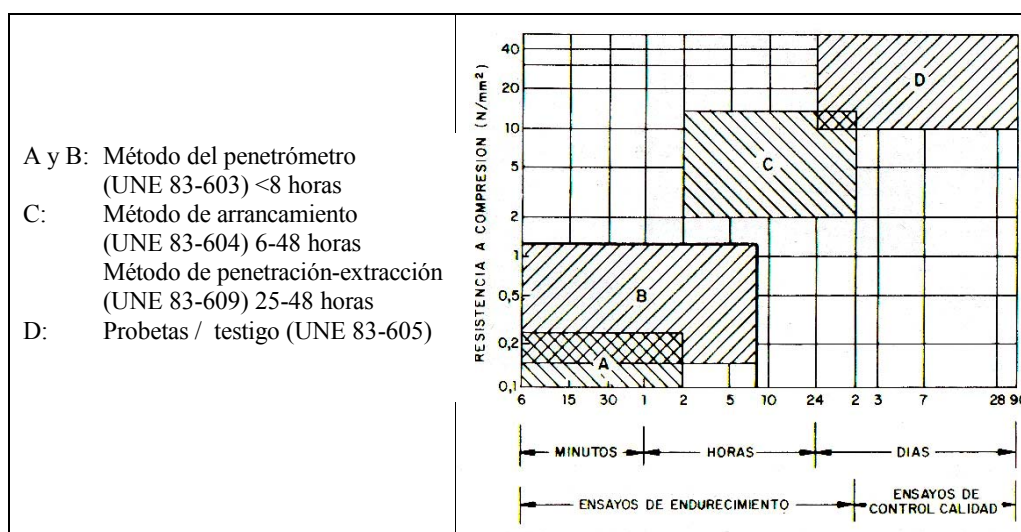


Figura 2.6. Rango de utilización de los diferentes ensayos.

### 2.2.5. Características del hormigón proyectado

Una vez comentado lo relativo al proceso de fabricación, puesta en obra y control de calidad, se pasa a comentar las características fundamentales del hormigón proyectado como material de construcción.

#### Resistencia a compresión

Actualmente, la resistencia a compresión es el parámetro de control y diseño del hormigón proyectado. Las recientes aplicaciones e investigaciones en esta área, dan la posibilidad de conseguir hormigones proyectados de hasta 70 MPa de resistencia a compresión a la edad de 28 días. Sin embargo, las demandas actuales (tipo estructural) en la aplicación con hormigón proyectado mayoritariamente en la construcción de túneles por el N.A.T.M, se mantienen en 25 MPa. En la tabla 2.5, se muestran los requisitos en cuanto a resistencia que se demandan en la redacción de los proyectos actuales.

HP 25	Media	Mínimo
1 día	10	9
3 días	14	12
7 días	20	18
28 días	28	25

*Tabla. 2.5.- Requisitos de proyecto tipo.*

#### Porosidad

Una característica intrínseca al hormigón es su porosidad, siendo del orden del 5-6% para hormigones moldeados convenientemente vibrados. En el hormigón proyectado esta característica se ve acentuada, como consecuencia de la introducción de aire como medio de transporte y colocación de la mezcla, quedando parte de este aire atrapado dentro de la masa durante el proceso. La porosidad en hormigón proyectado por vía húmeda, en condiciones óptimas de los materiales y de ejecución, asciende por encima del 10-12%.

#### Homogeneidad

Un aspecto importante en el uso de hormigón proyectado es la homogeneidad de sus características durante la obra. El coeficiente de variación de dicha homogeneidad aporta un dato muy importante sobre la calidad de la obra ejecutada. Un coeficiente de variación inferior al 10% es un valor muy aceptable.

### Rebote

El rebote tiene un importante peso económico en el uso del hormigón proyectado, no sólo por lo que se refiere a la cantidad a transportar antes y después de la proyección, sino por la contaminación medioambiental que representa. La reducción del rebote es una demanda tecnológica del hormigón proyectado.

Independientemente de la dosificación, granulometría y química utilizada, la influencia del gunitador tanto en la aplicación manual como automática, es del orden del 80% en la consecución de un hormigón de calidad. La calidad de un hormigón proyectado depende en gran medida de la distancia entre la boquilla y la superficie a proyectar, el ángulo de incidencia y la velocidad de proyección. Este es uno de los mayores problemas que se encuentra esta técnica, puesto que la existencia de operadores con oficio es muy escasa, por lo que los resultados no son todo lo bueno que cabría esperar.

La tabla 2.6 muestra los valores del rebote, medidos según norma en distintas aplicaciones de hormigón proyectado en la actualidad.

Técnica	Ideal	Actual	1992
Vía seca	<20%	<25%	>35%
Vía húmeda	<15%	<15%	<18%

Tabla. 2.6.-Rebote medio experimentado en obra.

Estos valores dependen en gran medida de la inclinación de la superficie a proyectar, mientras que sobre una superficie horizontal está alrededor de 5%, en la proyección sobre la clave de un túnel alcanza perfectamente un 20%.

### Formación de polvo

Los requerimientos actuales en cuestiones de seguridad y salud de los trabajadores son cada vez más exigentes, sobre todo en situaciones donde las condiciones ambientales son duras por naturaleza, como es el caso de la construcción de túneles y campo de aplicación estrella del hormigón proyectado. Todos los sistemas de proyección dan lugar a la formación de polvo, pero debe limitarse al máximo para que las condiciones de trabajo cumplan con las normativas vigentes.

Indudablemente, la técnica de proyección por vía húmeda reduce de forma considerable el polvo ambiental, pero debido a la necesidad de aire comprimido como vehículo de proyección, es imposible reducirlo en su totalidad.

El valor de formación de polvo deberá no ser mayor de  $6\text{mg}/\text{m}^3$ , a modo de orientación.

### Capacidad de producción

El tiempo de aplicación es importante económicamente, por lo que un equipo de proyección deberá tener un rango de aplicación lo más flexible posible, para rentabilizar en cada caso la proyección. La tabla 2.7 muestra los valores de producción ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) que se están alcanzando actualmente en obra así como el ideal a alcanzar en un futuro próximo.

Técnica	Ideal	Actual	1992
Vía seca	10-12	6-14	4-6
Vía húmeda	20-25	15-18	8-12

Tabla 2.7. Producción con hormigón proyectado.

### 2.2.6. Aplicaciones

El hormigón proyectado, presenta un amplísimo abanico de campos de aplicación. Quizás no exista un proceso constructivo en el que la flexibilidad y variedad sea tan grande. Obviamente, cada una de las aplicaciones tiene unas características particulares que las diferencia de otras en cuanto a resistencia, durabilidad,...

La principal aplicación que tiene el hormigón proyectado es como soporte de rocas. También como revestimiento y acabado por la calidad que resulta en la ejecución. Los campos en que se viene utilizando hormigón proyectado con éxito son:

Túneles: Es el campo donde más se ha desarrollado la técnica del hormigón proyectado y es una herramienta clave dentro del Nuevo Método Austríaco (NATM). Grandes superficies a proyectar con espesores no muy importantes. Por eso el tremendo éxito de esta técnica. Aunque tradicionalmente se venía utilizando como un sostenimiento provisional, el avance en las técnicas y la mejora en las prestaciones del material que se proyecta han hecho que se esté utilizando como revestimiento definitivo en

túneles. En este campo, la vía húmeda se ha impuesto con claridad a la vía seca puesto que tiene un rendimiento muy superior, y también por razones de durabilidad del material y mejora de las condiciones de trabajo en el interior del túnel. Últimamente, por motivos operativos, se está incorporando el uso de fibras metálicas en el hormigón proyectado, siendo éstas su único refuerzo, en sustitución de la ferralla convencional que se venía utilizando hasta el momento. En la figura 2.7. se observa una máquina proyectando el hormigón sobre los hastiales de un túnel.



Figura 2.7 - Máquina proyectando en un túnel.

Canalizaciones: Al ser las canalizaciones obras lineales de gran longitud y que requieren de un gran volumen de hormigón, la utilización como técnica del hormigón proyectado es muy beneficiosa, al obtenerse grandes rendimientos ya que se elimina del proceso constructivo la fase de compactación. Nuevamente un tipo de aplicación donde se proyecta en grandes extensiones con un espesor reducido. Aquí tiene principalmente la misión de actuar como revestimiento. Otro aspecto a considerar es que el hormigón proyectado presenta una gran afinidad a todo tipo de geotextiles o membranas que proporcionan la estanqueidad suficiente.

Estabilización de taludes: Se utiliza tanto para proteger taludes de tierras frente a problemas como la erosión, como para evitar desprendimientos estabilizando macizos rocosos. Es decir, función de sostenimiento y de revestimiento con grandes superficies de aplicación y por consiguiente grandes cantidades de hormigón. Por eso se recurre al hormigón proyectado. La forma de protegerlos es con una capa de 50mm de hormigón proyectado sobre el paramento y en ocasiones también se disponen bulones.. En la figura 2.8 se ve un ejemplo de esta aplicación.



Figura 2.8 - Estabilización de taludes.

Reparación de estructuras: Como consecuencia de la utilización del hormigón proyectado en este campo, se ha conseguido su evolución y desarrollo debido a que se utiliza como material estructural. Es por tanto esta una aplicación diferente a las habituales y menos usual. Los profesionales de este campo se han adaptado rápidamente a su uso ya que se accede con facilidad a cualquier paramento o esquina, además de no ser necesario el uso de ningún tipo de encofrado más que el propio elemento a reforzar. Son por tanto importantes ventajas para que el hormigón proyectado se empiece a tener en cuenta en la reparación de estructuras. Se puede utilizar tanto para pequeñas cavidades como proyectando en grandes cantidades. Es indudable que los requisitos del material en esta aplicación serán superiores al del resto de casos.

Depósitos: En este caso se utiliza tanto para depósitos en superficie como enterrados. Su motivación es que en estos depósitos se necesita estanqueidad, y el hormigón proyectado la aporta. En la figura 2.9 se muestra un ejemplo.



Figura 2.9 - Operario proyectando sobre un depósito.

Piscinas: Se utiliza cada vez más en este campo como consecuencia de que se adapta con facilidad a cualquier superficie y los acabados son de calidad. Además, como la cantidad de armadura que hay que disponer en las piscinas es pequeña, pues la proyección de hormigón es todavía más favorable. Los



problemas que se han producido en ocasiones en piscinas son achacables a la mala ejecución que se ha hecho en la proyección.

Protección de estructuras metálicas: Desde que se produjo la aparición de productos sintéticos, como por ejemplo las espumas, en este campo ha dejado de tener tanta importancia la proyección de hormigón ya que estos nuevos productos presentan ventajas tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista de aplicación. Pero se coloca esta aplicación en el trabajo porque esta fue la primera aplicación del hormigón proyectado en la construcción.

Hormigón proyectado armado: El hecho de trabajar con hormigón proyectado consigue que se minimicen los tiempos y el coste de construcción debido a la desaparición de las partidas de obra de encofrados. Esto ha hecho que los ingenieros de hoy en día estén investigando el uso conjunto del hormigón proyectado con las barras corrugadas de acero para conseguir proyectar estructuras de hormigón proyectado armado, consiguiendo de esta manera sustituir el hormigón armado tan utilizado actualmente, por este tipo de tecnología nueva.

Los estudios realizados por el departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña, sobre el proyecto de las nuevas estaciones de metro de la línea 9 de Barcelona, actualmente en construcción, han llegado a la conclusión de poder armar el hormigón proyectado para construir las paredes cilíndricas de estas estaciones para poder de esta manera minimizar los costes y el tiempo de ejecución de las obras.

Otras aplicaciones: También se ha utilizado en construcción de esculturas, o por ejemplo en la construcción de viviendas a modo de "igloo" a partir de encofrados que son balones inflados. De la misma manera se utiliza también en pantallas marinas, protección contra incendios y anticorrosión, agricultura (pozos de estiércol), mampostería y estabilización de muros de ladrillos,...

### **2.2.7. Componentes del hormigón proyectado**

La fabricación del hormigón proyectado se debe realizar en plantas que dispongan de todos los elementos necesarios para conseguir una mezcla homogénea y que disponga también de un sistema de dosificación de aditivos y áridos de suficiente precisión. La falta de homogeneidad de la mezcla es una de las causas que provoca que los equipos de proyección no funcionen de forma correcta.

De la misma forma que es importante la homogeneidad de la mezcla, también lo es la calidad de los materiales a emplear. Los materiales a utilizar en

la fabricación de hormigón proyectado son muy similares a los empleados en los hormigones tradicionales.

Por lo que respecta a los cementos, normalmente se utiliza Portland tipo I con clase resistente 42,5R y 52,5R, es decir cementos de endurecimiento rápido que aseguran unas elevadas resistencias iniciales. Pero excepto en los casos en los que el hecho de querer alcanzar una resistencia inicial importante lo impida, no hay limitación a cualquier tipo de cemento o mezcla con cal hidráulica.

Las dosificaciones de los cementos suelen ser altas, alcanzando hasta los 450-500kg/m<sup>3</sup> de mezcla, según cual sea el uso que queremos darle al hormigón. En comparación con las dosificaciones que se utilizan habitualmente en el hormigón normal, que son de 250-300kg/m<sup>3</sup>, pues hay una notable diferencia. La razón principal es la gran cantidad de cemento que se pierde como consecuencia del rebote y que hace que en la dosificación inicial se haya de añadir una mayor cantidad de cemento previendo el material que se va a acabar perdiendo. Por tener como función principal el sostenimiento, el hormigón proyectado debe alcanzar y mantener unas altas resistencias a largo plazo y eso se alcanza con cantidades importantes de cemento. El cemento puede ir acompañado de distintas adiciones como cenizas volantes, microsílíce, látex, fibras,...

En vía húmeda, el agua se añade en la mezcla antes de realizar el transporte. La relación agua-cemento en esta vía varía entre 0,35 y 0,55.

Los áridos representan el mayor volumen y peso dentro de la mezcla. En el hormigón proyectado por vía húmeda, se utilizan tradicionalmente áridos de 12mm. Como fracción gruesa. No obstante si lo que queremos es reducir el rebote, pueden utilizarse áridos de un tamaño inferior, sin que por ello se afecten las resistencias finales. Para el relleno de grandes cavidades se pueden utilizar áridos de hasta 25mm.

Por lo que respecta a los aditivos, se utilizan también, entre otros, acelerantes de fraguado en la boquilla, los cuales lo que hacen principalmente es reducir el asentamiento en el momento de la proyección. Es decir, proporcionar resistencias iniciales mayores sin las cuales no sería posible aplicar el hormigón proyectado en la construcción de hoy en día.

### 2.3. LOS ACELERANTES EN EL HORMIGÓN PROYECTADO

La diferencia entre el hormigón clásico y el hormigón proyectado es la sustitución del encofrado por un fraguado casi instantáneo. Este fraguado instantáneo se debe a la acción química de productos específicos llamados acelerantes.

Con la evolución a la vía húmeda, los acelerantes clásicos en polvo se han sustituido por los equivalentes en solución, y juntamente con la eliminación de las masas secas proyectadas, se ha eliminado el problema del polvo en suspensión. Con ello se han reducido parte de los accidentes laborales y la seguridad en obra, y los resultados obtenidos tanto en resistencias como en durabilidad han mejorado. Pero el cambio de acelerantes en polvo a acelerantes en solución ha implicado el uso de sustancias corrosivas y agresivas como son los acelerantes tradicionales basados en aluminatos y silicatos modificados. Este hecho sigue siendo uno de los puntos negros a mejorar en el ámbito del uso de acelerantes en el hormigón proyectado.

Para solventar el problema que implica el uso de estos acelerantes, los químicos han estado trabajando para obtener como resultado un aditivo que, sin perder la eficacia de los aluminatos y silicatos tradicionales, ofrezca una mayor seguridad en obra, un menor impacto medioambiental y unas mejores prestaciones en comparación con los anteriores acelerantes. Estos acelerantes, denominados actualmente, acelerantes alkali-free, por sus propiedades químicas y prestaciones son sin duda el mayor avance en el uso de hormigón proyectado por vía húmeda.

El método por vía húmeda requiere que se añadan estos aditivos en la boquilla, con los cuales se consigue una reducción del asentamiento, la mezcla pasa de consistencia líquida a pastosa mientras está todavía en el aire y se consigue que se adhiera a la superficie cuando aumenta el espesor de la capa.

Una posibilidad que permiten es poder proyectar sobre una superficie vertical o sobre la clave sin que haya un rebote importante. Además permite que se pueda utilizar como soporte inicial.

Los acelerantes son añadidos en forma líquida mediante una bomba dosificadora especial (bomba de pistón o de gusano). La dosificación del acelerante dependerá de la capacidad del operario, de la superficie y de la relación agua/cemento. Una relación agua/cemento elevada requerirá una mayor cantidad de aditivo para poder reducir la consistencia.

Por otro lado, el hecho de que aumente la resistencia inicial de la mezcla, trae la contrapartida de que la resistencia a los 28 días disminuya en relación a una mezcla que no disponga de acelerantes de fraguado. Por tanto es importante no abusar de estos aditivos y disponerlos en un porcentaje mínimo (menor consumo en las paredes que en la clave).

Tradicionalmente, los acelerantes que se han venido utilizando estaban basados en aluminatos o silicatos, según cuál era la legislación del país, pero como consecuencia de que los requisitos en cuanto a seguridad y salud en el trabajo cada vez son más exigentes, se han desarrollado una nueva gama de acelerantes de fraguado libres de álcalis.

### 2.3.1. La hidratación del cemento y la relación con los acelerantes

Conocer el proceso químico de la hidratación del cemento nos permite estudiar cuáles son los efectos que los distintos tipos de especies de acelerantes pueden aportar en el fraguado del hormigón.

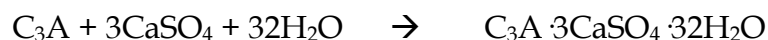
La hidratación del cemento implica una compleja serie de reacciones y procesos químicos que se producen a escala diferente en el tiempo. Existen desde procesos hidráulicos prácticamente instantáneos a procesos que se manifiestan a lo largo de horas e incluso años.

Al hablar de hormigón proyectado y de acelerantes para hormigón proyectado, sin embargo, de esta compleja serie de procesos solamente resultan representativas las referentes a las fases del aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) del cemento. La actividad de la fase de aluminato tricálcico se localiza en los primeros tiempos (horas) de la hidratación del cemento y es la responsable de los fenómenos observables justo antes del fin de fraguado, cuando se consuma su total hidratación.

Así pues, es en esta fase de la hidratación, cuando el efecto de los acelerantes producirá alteraciones en el proceso de fraguado del hormigón proyectado.

El cemento, por su naturaleza química, reacciona espontáneamente con el agua para formar masas endurecidas con elevados valores de resistencia a compresión. Esta reacción de hidratación toma parte inmediatamente después del primer contacto con el agua y tiene como foco principal las fases de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) deshidratadas, formadas durante la cocción en el horno rotatorio. Esta hidratación produce la pérdida de plasticidad en cuestión de minutos, motivo por el cual es casi imprescindible añadir regulador de fraguado, como el sulfato cálcico ( $CaSO_4$ ), al clínker para neutralizar el efecto de los aluminatos y controlar de esta manera el efecto del fraguado.

Este sulfato cálcico reacciona con el  $C_3A$  libre para formar ettringita (trisulfoaluminato cálcico) (Figura 2.10).



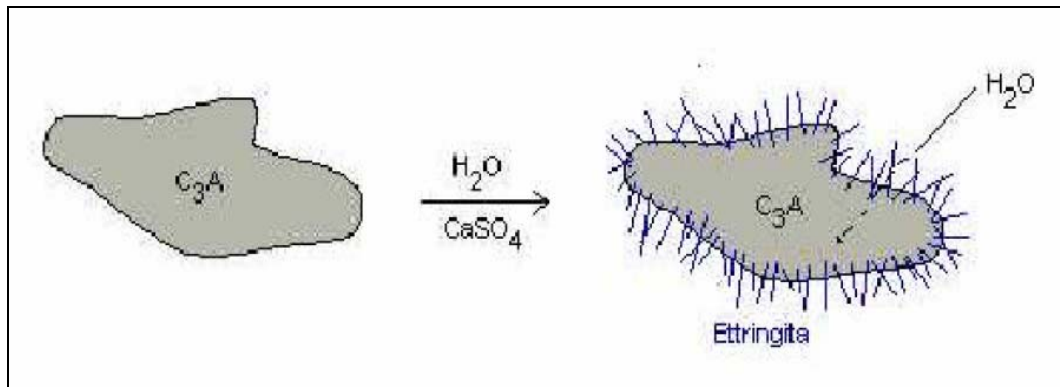
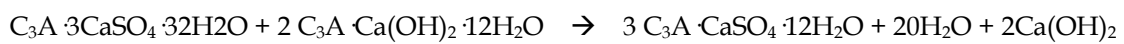


Figura 2.10 – Formación de Ettringita

La ettringita envuelve la fase de aluminato dificultando el acceso del agua, de tal forma que la hidratación se ve ralentizada, pero no detenida. Debido a este efecto retardante, la masa fresca puede trabajarse por un espacio de tiempo.

Cuando todo el regulador de fraguado se ha consumido formando ettringita, el  $C_3A$  en exceso, activado por el agua de amasado, reacciona con la ettringita formada previamente, para transformar el trisulfatoaluminato en monosulfatoaluminato y liberando hidróxido cálcico.



La ettringita que envolvía los núcleos de aluminato, transformada a monosulfatoaluminato, es mucho más permeable y permite un acceso más fácil del agua de amasado para proseguir con la hidratación hasta consumir la totalidad de fase de  $C_3A$  y formar básicamente los hidratos hexagonales  $C_4AH_{19}$  y  $C_2AH_8$ , que finalmente evolucionan a la forma cúbica  $C_3AH_6$  (Figura 2.11).

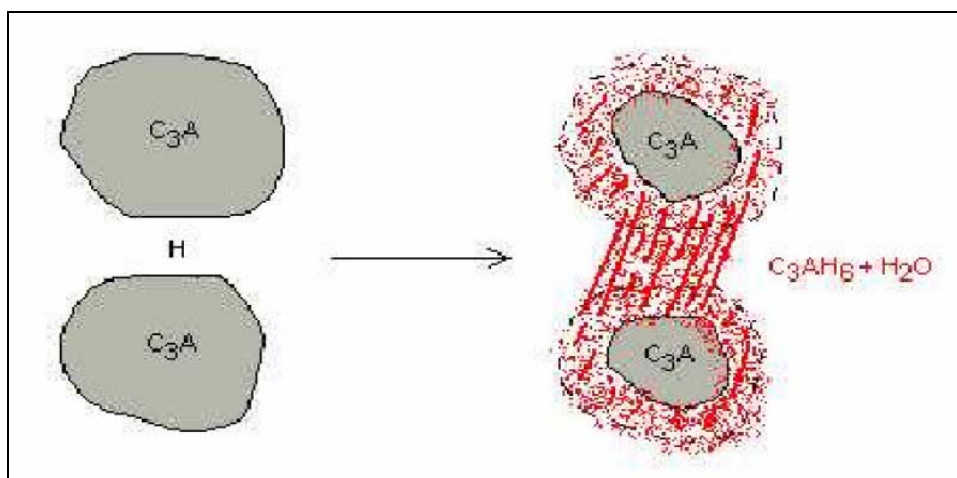


Figura 2.11- Representación de la hidratación de la fase  $C_3A$  del cemento

Entonces, empezarán a intervenir las fases de silicatos, hidratándose y formando el gel CSH, el auténtico responsable de las resistencias mecánicas.



El gel CSH, también conocido como gel tobermorita ( $\text{C}_2\text{S}_2\text{H}_3$ ) es un compuesto amorfo de composición no definida fruto de la hidratación de los anhidros  $\text{C}_2\text{S}$  y  $\text{C}_3\text{S}$ . Su formación implica la liberación de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), responsable de la reserva alcalina del hormigón. En cualquier caso, todos los procesos de formación del gel CSH suceden posteriormente a la actividad de los aluminatos cálcicos, y en consecuencia no son tan determinantes en la actividad de los acelerantes de fraguado para hormigón proyectado.

Los fenómenos químicos descritos pueden agruparse en cuatro fases que generalizan la hidratación y endurecimiento del cemento en contacto con agua:

#### Fase I:

Primera hidratación superficial de los granos de cemento inmediatamente después de la adición del agua de amasado. Formación superficial de ettringita sobre las fases de  $\text{C}_3\text{A}$ . Esta primera fase tiene una duración de breves minutos.

#### Fase II:

El agua sulfatada migra lentamente a través de la ettringita que recubre la fase de  $\text{C}_3\text{A}$ . En esta fase, es cuando el cemento permanece trabajable y puede durar de hora a hora y media según la naturaleza de los componentes.

#### Fase III:

La ettringita reacciona con el  $\text{C}_3\text{A}$  volviéndose más permeable y facilitando la hidratación de este. Esta fase corresponde al fraguado de la masa aglomerante de cemento y puede durar, en condiciones normales, unas 4-6 horas.

#### Fase IV:

Hidratación de las fases de silicatos y adquisición de resistencias mecánicas. Esta fase empieza al término de la hidratación del  $\text{C}_3\text{A}$  ya que este colabora en la hidratación de los silicatos. Esta fase puede durar años.

Las cuatro fases descritas se corresponden a los inicio y final de fraguado, tiempo de trabajabilidad, etc. y tienen relación también con la

evolución del calor desprendido durante el fraguado como se observa en la figura 2.12. Esto evidencia la correlación entre los fenómenos químicos y los fenómenos observables.

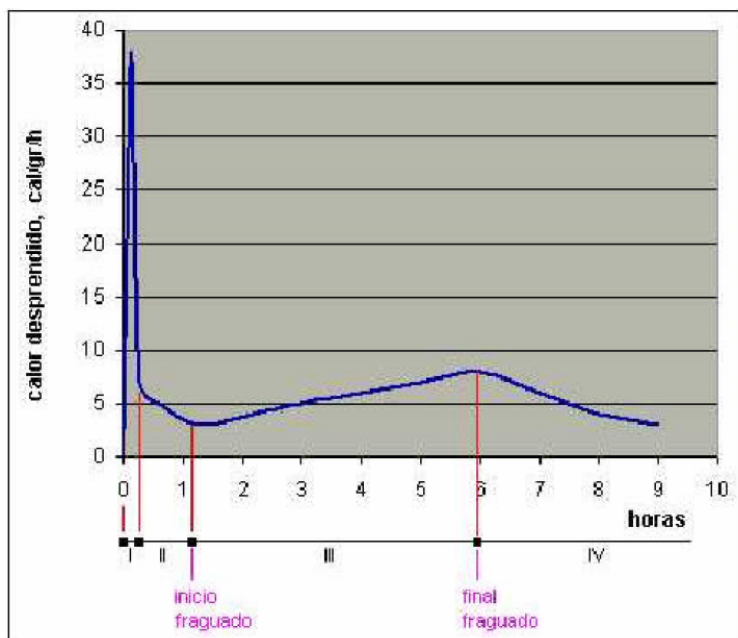


Figura 2.12 – Evolución del calor desprendido en la hidratación de un aglomerante de cemento y correlación entre las cuatro fases descritas

Las características de la hidratación de la fase de silicatos resulta redundante al hablar de acelerantes de fraguado debido a que la acción de éstos recae siempre sobre la acción de los aluminatos del cemento, y en caso de actuar sobre los silicatos, siempre es a partir de mecanismos totalmente distintos al típico de formulación de tobermoritas

Comentamos finalmente que la adición de un acelerante de fraguado, sea de la naturaleza química que sea, modificará de forma muy trascendente la fase III de la hidratación del cemento, correspondiente a la evolución del fraguado, reduciéndola al orden de minutos e incluso segundos.

### 2.3.2. Tipos de acelerantes para el hormigón proyectado

Existen numerosos compuestos químicos con la capacidad de provocar un fraguado prematuro, en mayor o menor grado. Sales básicas de sodio o potasio, cloruros, derivados de aluminio, silicatos alcalinos, son algunos ejemplos. Cuando a esta lista de sustancias se le empiezan a considerar factores como la solubilidad, costes de material y efectos secundarios al hormigón, ésta se ve reducida a básicamente tres familias de especies:

- Silicatos modificados
- Aluminatos sódicos o potásicos
- Alkali-free

A continuación se habla de cada una de las especies mencionadas.

### 2.3.2.1. *Silicatos Modificados*

Por lo que respecta a los acelerantes basados en silicatos, se caracterizan por un efecto momentáneo, inferior a los 10 seg., de pérdida del asentamiento de la mezcla de hormigón proyectado, y no participan, a diferencia de las otras dos especies de acelerantes, en el proceso de hidratación (siempre que las dosificaciones no excedan el 20% del peso del cemento).

Los silicatos sódicos modificados fijan el agua en la mezcla; por este motivo la dosificación depende de la relación agua/cemento. Esta relación cuanto mayor es mayor cantidad de acelerante se requiere para fijar el agua a la mezcla y obtener el mismo efecto.

Los silicatos modificados no proporcionan altas resistencias iniciales, es decir, en las 3 ó 4 primeras horas, en parte porque se habla de tiempos finales de fraguado superiores a 30 minutos (dependiendo del tipo de cemento y de la temperatura), pero por otra parte, no presentan la pérdida de resistencias finales detectadas en las otras dos especies de acelerante.

Al incrementar la dosificación de este tipo de acelerante el silicato modificado distorsiona químicamente el proceso de hidratación, acelerándolo, pero esto implica una pérdida considerable de resistencias mecánicas finales, pérdida muy relacionada con las condiciones de curado. Estas causas son debidas al exceso de álcalis adicionados y a una mala reticulación de los silicatos del cemento inducida por el mecanismo de hidratación vía metasilicato ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) u ortosilicato ( $\text{SiO}_2$ ). Estas vías de hidratación implican que en presencia de los metasilicatos y los ortosilicatos, el  $\text{C}_3\text{S}$  reacciona parcialmente de forma directa con el  $\text{C}_3\text{A}$ , y esta reacción química es la que conduce a la inevitable pérdida de resistencias a largo plazo.

Lo comentado hace que los silicatos modificados, en la actualidad sean productos en desuso, bien por incompetencia frente a ciertas situaciones, bien por la disponibilidad de opciones más eficaces.

Estos acelerantes se suelen utilizar para soportes permanentes, para soportes temporales en donde no se requieran resistencias iniciales, es decir,



donde se tenga roca dura, en trabajos de reparación, y en zona donde el espesor máximo esté limitado (10-15 cm).

Aunque esten en desuso, las ventajas que proporcionan estos acelerantes de silicato son:

- Funcionan en toda clase de cemento
- Como ya se ha dicho antes, la disminución de las resistencias finales es inferior que en el caso de las otras dos especies de acelerantes (4-6% en el caso de aluminatos).
- Gran efecto como aglomerante
- No son tan dañinos para la piel ni para el medio ambiente como los aluminatos. De todas maneras es necesario mantener las condiciones de seguridad (guantes, lentes de contacto).
- Tienen un menor porcentaje de álcalis que los acelerantes basados en aluminatos (< 8,5% de Na<sub>2</sub>O)

Por el contrario, presentan los inconvenientes de no poder utilizarlos a temperaturas inferiores a los 5°C, utilizarlos con espesor de aplicación no superior a 8-15 cm, y sobre todo la pérdida de resistencias mecánicas en el caso de utilizar alto porcentajes de acelerante.

### 2.3.2.2. Aluminatos Sódicos o Potásicos

Cuando se habla de acelerantes para hormigón proyectado la palabra aluminato es casi indisociable al término. Esto es, en España los aluminatos forman el grueso de las toneladas de acelerante suministradas para dicha aplicación vía húmeda y vía seca, con sus ventajas y desventajas.

Los acelerantes líquidos basados en aluminatos son la evolución de los aluminatos en polvo utilizados en la proyección vía seca, adaptados en su estado físico a la tecnología vía húmeda. Su efecto y particularidades químicas sobre el hormigón no son diferentes, simplemente en su momento se adaptó a las particularidades de la maquinaria empleada.

Con la adición del acelerante basado en aluminatos, la concentración de fase aluminato necesaria para transformar el trisulfoaluminato a monosulfoaluminato se ve súbitamente incrementada. Esto implica la consumición casi instantánea de la ettringita y los aluminatos del cemento y por lo tanto la pérdida súbita de trabajabilidad y la adquisición prematura de los primeros MPa de resistencia mecánica. En definitiva pues, se podría comparar a

grosso modo la adición externa de un acelerante de aluminatos con el aumento de fase de aluminato tricálcico en el cemento o lo que es lo mismo, la disminución súbita de regulador de fraguado, consiguiendo con ello inicios de fraguado a los 2-3 minutos e incluso sobre los 60 segundos, variable según condiciones y dosificación de acelerante.

Debido al alto rendimiento de los acelerantes basados en aluminatos, la aplicación de capas de alto espesor es posible. La adquisición de resistencias mecánicas empieza después de los 5-10 minutos de la puesta en obra y a los 20-30 minutos ya puede considerarse como autoportante. Es por eso que los aluminatos, a diferencia de los silicatos modificados, permiten la aplicación de sostenimientos en terrenos poco estables justo después de la excavación, con espesores de gunita considerables a modo de sostenimiento temporal o definitivo, en el caso de construcción en estos ámbitos.

Pero los aluminatos son la fuente de un grave problema. Su empleo implica sin opción alguna la pérdida de resistencias mecánicas finales hasta valores del 20-30 %. Esto implica una limitación en las dosificaciones y demanda trabajar con más cantidad de cemento por  $m^3$ . Las causas de este problema son varias. Primeramente un fraguado tan prematuro siempre es motivo de grandes imperfecciones en la red reticular, creando discontinuidades que originan puntos débiles en la estructura por simple imperfección cristalina. En segundo plano está también la posibilidad de la reacción alcalina y la reacción árido-álcali, motivada por la fuerte alcalinidad del aluminato y por la contribución de éste de iones sodio y potasio al hormigón (iones alcalinos o álcalis). Estos efectos de alcalinidad y reacción árido-álcali producen lixiviación de los silicatos que se traduce en microfisuración interna.

En comparación con los silicatos modificados, los aluminatos son mucho más sensibles a la naturaleza y tipos de cementos. Su reactividad se ve muy influenciada según el tipo de cemento y en concreto con la cantidad de aluminato tricálcico libre de éste. Por esto para una misma relación  $W/C$ , según el tipo de cemento empleado en función de si se trata de un cemento más o menos lento, la dosificación de aluminato se verá afectada para conseguir un mismo efecto, siendo ésta más alta cuando menor sea el contenido de aluminato tricálcico libre en el cemento en cuestión. Del mismo modo, las posibles adiciones modifican también la dosificación de aluminato para un mismo efecto. La presencia de cenizas, por ejemplo, por su carácter ralentizador, demanda algo más de acelerante. En el caso de cementos con alto contenido de puzolanas, como ya se ha mencionado en el apartado referente a silicatos modificados, el rendimiento del acelerante de aluminatos es muy inferior en comparación a los Portland estándar, hasta en el caso extremo del cemento aluminoso donde el acelerante basado en aluminato no ofrece ni mucho menos resultados satisfactorios y con los cementos sulforesistentes (tipología SR), donde por su bajo contenido en  $C_3A$  (inferior al 5%) la actividad del aluminato frente al fraguado queda reducida de forma importante. En este caso, el bajo

contenido de aluminato tricálcico del cemento demanda una mayor dosificación de acelerante para poder compensar efectos.

Del mismo modo que los acelerantes a base de silicatos modificados, su dosificación también se ve incrementada al aumentar la relación W/C para obtener un mismo efecto. En este aspecto, la sensibilidad con el tipo de cemento se hace más trascendente al aumentar la relación W/C. El motivo de dicho efecto no es otro que la disolución del aluminato en el agua de amasado, reduciendo de esta forma la concentración efectiva y por lo tanto el efecto sobre la partícula de cemento.

En cuanto a la naturaleza del aluminato, su comportamiento es diferente dependiendo si se trata de aluminato sódico o potásico. El aluminato potásico, por su mayor basicidad, se muestra más efectivo en el aspecto de aceleramiento de fraguado y consecución de resistencias a las primeras edades, pero presenta un efecto secundario de pérdida de resistencias a largo plazo mucho mayor que el aluminato sódico. En resumen, a mayor basicidad del aluminato empleado más poder acelerante y más resistencias a cortas edades pero mayor pérdida de resistencias a largo plazo.

Uno de los grandes problemas de los acelerantes de fraguado para hormigón proyectado es uno que no está relacionado con aspectos técnicos ni de funcionamiento. Se trata de razones ecológicas y de seguridad en obra. Los aluminatos, por su naturaleza química, son compuestos fuertemente alcalinos (básicos), con un pH igual o superior a 13, por lo que resultan líquidos altamente agresivos para los ojos, piel y vías respiratorias, con el riesgo de producir quemaduras y lesiones serias en las zonas citadas. Comparativamente, sobre las vías respiratorias, el efecto es el mismo que el producido por el polvo de aluminato de los acelerantes para gunita vía seca, claro está, en menor grado, pero no por ello en absoluto despreciable. Así pues, el operario que trabaja en el túnel está constantemente expuesto a componentes peligrosos, riesgo incrementado si se considera que el aluminato circula por bombas mediante circuitos de presión (cualquier despiste por ejemplo al cerrar pasos sin quitar la presión provoca, al abrir de nuevo el circuito, la expulsión violenta del líquido contenido en los conductos). Por esto, los aluminatos están considerados como sustancias corrosivas, sujetas al transporte de mercancía peligrosa y al almacenamiento de líquidos corrosivos. Su carácter alcalino es tan fuerte que una solución de aluminato es capaz de atacar una muestra metálica de aluminio.

Los aluminatos también tienen sus efectos adversos sobre el medio ambiente debido a su alta alcalinidad y a su elevado contenido en cationes alcalinos (álcalis), concretamente sodio y potasio. Los álcalis son los responsables de la salinización y estrés hídrico de los suelos y de su inertización y del desequilibrio de pH en aguas sensibles.

### 2.3.2.3. *Álcali Free*

En la actualidad, la tendencia en multitud de sectores y aplicaciones se dirige a rehuir de todo lo que sea ecológicamente violento o agresivo (productos, aplicaciones, etc.), imponiendo esta prioridad por encima de costes, facilidades e incluso a veces de rendimientos. En España, la Ley de Prevención de Riesgos Laborales especifica claramente la necesidad de sustituir los productos y técnicas peligrosas para la salud del operario por aquellas que permitan un menor riesgo.

Los requerimientos sobre durabilidad y calidad de las estructuras de hormigón están incrementando. Las altas pérdidas de resistencia mecánica causadas por los acelerantes alcalinos han forzado a la industria del sector al desarrollo de nuevos productos con mejores prestaciones en este aspecto.

Los nuevos acelerantes para hormigón proyectado denominados alkali-free cumplen con lo esperado, proporcionando la seguridad en obra deseada, gran calidad y durabilidad de las estructuras de hormigón y reduciendo en gran medida, el impacto ambiental. La fórmula es la siguiente: libre de cationes alcalinos y no alcalinos (cáustico).

En el contexto del hormigón proyectado, en general los términos no alcalino y libre de álcalis acostumbra a mezclarse y confundirse. La razón no es otra que el doble significado de la palabra alcalino.

- Alcalino: Sustancia con pH comprendido entre 7 y 14. Sinónimo de básico.
- Alcalino: Cationes Na<sup>+</sup> (sodio), K<sup>+</sup> (potasio), Li<sup>+</sup> (litio). Denominados también álcalis.

Así pues, alcalinidad y contenido en álcalis son dos términos diferentes, que implican dos conceptos, dos efectos y dos causas diferentes. Lo cierto es que en gran cantidad de sustancias, los términos o mejor dicho las propiedades alcalino y álcali se presentan conjuntamente. Por ejemplo, la sosa cáustica (NaOH) es una sustancia alcalina (básica) por su elevado valor de pH que la hace una sustancia tan peligrosa, pero simultáneamente, la sosa cáustica también es una sustancia con elevado contenido de álcalis (contiene el catión sodio), y esto le proporciona otras propiedades al margen de la alcalinidad. Por lo citado, el aluminato sódico o potásico tiene su imagen especular en la sosa cáustica. Los aluminatos empleados como acelerantes para hormigón proyectado son fuertemente alcalinos (básicos), por su elevado valor de pH (en consecuencia, cáusticos y corrosivos) y contienen en gran cantidad de cationes alcalinos (álcalis).

Los acelerantes alkali-free también asocian los dos términos conjuntamente, pero en este caso por el lado opuesto al del aluminato. Los acelerantes alkali-free tienen un pH inferior a 7, por lo que no son alcalinos (no básicos) y no contienen (< 1% en equivalentes de Na<sub>2</sub>O) cationes alcalinos como sodio, potasio o litio (álcalis). En resumen, un acelerante alkali-free podría definirse como una sustancia no alcalina y libre de álcalis.

Como ya se ha avanzado, la no alcalinidad representa una ventaja en cuanto a la seguridad en obra, disminuyendo o eliminando el riesgo de quemaduras a la piel, irritación y daños a los ojos, infecciones en las mucosas, alteración en las vías respiratorias, etc. y contribuyendo así a una mejora en las condiciones de obra. La no alcalinidad también evita futuros daños en la estructura de hormigón, en general motivados por la posibilidad de la reacción alcalina y disminuye considerablemente el impacto ecológico especialmente en las subterráneas, creado por la adición de una sustancia fuertemente alcalina como el aluminato.

El empleo de este tipo de acelerantes para hormigón proyectado implica una mayor dosificación en comparación con los acelerantes de aluminato para obtener efectos similares. Incluso con cementos lentos resulta a veces difícil alcanzar el rendimiento del aluminato a dosificaciones razonables.

Al igual que los acelerantes de aluminato sódico o potásico, los acelerantes alkali-free son sensibles al tipo de cemento y sobretodo a la relación agua/cemento (W/C).

En cuanto a la naturaleza del cemento, la variación es similar a la sufrida por el aluminato. Algunos tipos de acelerantes alkali-free presentan más sensibilidad que otros, depende de sus características químicas, pero por norma general, evidentemente esta variación se agrava con el aumento de la relación W/C y en consecuencia, la utilización de acelerantes alkali-free con cementos lentos y relaciones W/C elevadas es prácticamente inviable si se esperan unos valores aceptables en cuanto a tiempos de fraguado.

El efecto del acelerante alkali-free sobre el inicio de fraguado se asemeja al del silicato. El primer efecto es una pérdida súbita de consistencia (slump-killing) casi de forma instantánea, pero con la diferencia que el inicio de fraguado se manifiesta mucho más rápidamente que con el silicato. Por contrapartida, el aluminato genera una pérdida de plasticidad algo más progresiva (aunque igualmente rápida) pero el inicio de fraguado como tal es prácticamente inmediato a la adición. En definitiva, si lo que se busca es un fraguado propiamente dicho, debe incrementarse la dosificación de acelerante alkali-free para igualar el efecto del aluminato.

La dependencia con la relación agua/cemento (W/C) es mucho más importante. La reducción de este valor mejora de forma trascendente, al igual

que con el aluminato, la actividad de los acelerantes alkali-free, pero de una forma más acentuada hasta el punto que con cementos rápidos y bajas relaciones W/C las diferencias de rendimiento entre un tipo de acelerante y otro son mínimas.

Considerando la relación W/C se observa que la dependencia con los tipos de cemento es muy inferior a relaciones bajas hasta el punto que las diferencias de rendimiento entre aluminato y todos los tipos de alkali-free son mínimas. Al aumentar la relación agua cemento la sensibilidad con el cemento aumenta de forma considerable. Los efectos de manifiestan de forma más trascendente en los finales de fraguado, aumentando éstos de forma importante en el caso de cementos lentos y relaciones W/C altas. De lo citado se deduce la dependencia del rendimiento de los acelerantes alkali-free con el contenido de  $C_3A$  de los cementos. Tal y como se detalla en la exposición de su mecanismo de actuación, la vía química por la cual los acelerantes basados en la tecnología alkali-free actúan no difiere mucho de la del aluminato y por lo tanto es de esperar esta dependencia con el contenido de aluminato tricálcico del cemento. Este razonamiento se extrapola al extremo en el caso de cementos sulfuresistentes, donde el contenido de  $C_3A$  es inferior al 5% y en consecuencia la efectividad de estos acelerantes se muestra claramente reducida.

En comparación a los acelerantes para hormigón proyectado basados en aluminatos, se aprecia con claridad la necesidad de un incremento de la dosificación de los acelerantes alkali-free para obtener similares efectos. La causa de esta reducción de rendimiento se explica por la conversión que debe sufrir la base química de los acelerantes alkali-free para mostrarse activa frente al cemento. Ya se ha detallado que esta conversión viene dirigida por el pH y en consecuencia no es una conversión al 100% (por lo menos de una forma instantánea). Por otro lado, la no presencia de cationes alcalinos en la tecnología alkali-free (sodio y potasio) tiene también sus efectos adversos en los tiempos de fraguado (a pesar que ello implique otras grandes ventajas en la calidad y resistencia del hormigón), puesto que la presencia de álcalis favorece el aceleramiento de los procesos de hidratación.

En definitiva, el óptimo rendimiento de los acelerantes libres de álcalis y no alcalinos se obtiene con relaciones W/C bajas y con cementos rápidos con un aporte de  $C_3A$  considerable, por lo tanto la elección se reduce a cementos tipo I, y primordialmente el tipo I-52,5R. Decrecimientos en los contenidos de  $C_3A$  del cemento o aumentos del tamaño de partícula del cemento conducen a incrementos de los tiempos de fraguado con más sensibilidad que en el caso de los aluminatos. Si bien estos factores del cemento podrían atenuarse reduciendo el contenido de agua de la mezcla de hormigón, lo cierto es que resulta preferible trabajar con cementos rápidos y relaciones W/C moderadamente bajas que no trabajar con cementos más lentos y relaciones W/C extremadamente bajas, que podrían originar, por ejemplo, problemas de mantenimiento de consistencia. Para ello es importante la elección del aditivo superplastificante/

reductor de agua de alta actividad, ya que este debe aportar una suficiente capacidad dispersante pero a la vez no ofrecen retrasos de fraguado que limitarían el rendimiento del acelerante.

Resumiendo las ventajas que se obtienen con su uso son:

- Se reduce el riesgo de la reacción álcali-árido como consecuencia de la eliminación del contenido de álcalis que proviene de los acelerantes de aluminato cáusticos comunes.
- Se mejoran las condiciones de seguridad de los trabajadores por ser materiales menos dañinos como ya se ha comentado antes.
- Al reducirse la cantidad de componentes peligrosos que van a parar a las aguas subterráneas provenientes de la proyección del hormigón y del rebote que se produce, pues se produce una gran mejora ambiental.
- Hay una menor pérdida de la resistencia final del hormigón que la que se producía con los acelerantes convencionales.
- Existen varias ventajas ambientales como pueden ser los ataques producidos a los operarios que trabajan con el hormigón proyectado.

## CAPÍTULO 3

### PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se han expuesto las ideas básicas para dar a conocer la tecnología del hormigón proyectado, dando énfasis en la proyección por vía húmeda. Se han comentado las principales aplicaciones de este en la construcción actual y la importancia que tiene el uso de los aditivos acelerantes para conseguir que el hormigón proyectado pueda ser una tecnología factible hoy en día.

Las familias de acelerantes que podemos encontrar en el mercado para su uso como aditivo en el hormigón proyectado se han mencionado también, de manera que se han explicado las características de cada una, como afectan cada una de ellas en la química en la hidratación del cemento y las ventajas e inconvenientes del uso de cada familia.

En este capítulo presentamos el programa experimental que se ha seguido para realizar los ensayos de caracterización de los acelerantes basados en aluminatos, los acelerantes álcali free y sus familias modificadas, que como hemos visto en el capítulo anterior son los que están más solicitados en el mercado actual. Seguidamente se exponen las características de los materiales componentes utilizados, las dosificaciones de estos materiales y la manera en que se fabrican las muestras a ensayar.



Finalmente, en este capítulo, se presentan los procedimientos de ensayo seguidos para poder caracterizar los aditivos acelerantes y se justifica el porque de cada uno de estos ensayos.

### 3.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para la caracterización de los aditivos acelerantes del estudio se ha considerado trabajar solo con pastas y morteros. Esto es debido principalmente por la correlación que existe en los resultados obtenidos en pastas y morteros con los resultados que se pueden obtener con hormigones. Además esto ha hecho que la totalidad de los ensayos hayan podido ser realizados en su totalidad en el laboratorio del departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña. Haber trabajado con hormigón proyectado directamente, hubiera requerido un espacio mucho mayor al espacio disponible en dicho laboratorio.

Los aditivos acelerantes que se desea caracterizar en este estudio son de fabricación nueva y están pensados exclusivamente para el hormigón proyectado en vía húmeda. El estudio de estos aditivos de nuevo uso siempre supone la realización de ensayos con pastas y morteros antes de trabajar directamente con el hormigón proyectado. Esto es debido a que se deben conocer unas características previas de estos aditivos para asegurarse que vale la pena ensayar los acelerantes con hormigón proyectado. Esta es también una de las razones fundamentales por la cual, en este estudio, se han caracterizado los acelerantes mediante su uso en pastas y morteros.

En la Tabla 3.1 se exponen los ensayos realizados de forma sistemática para las pastas y morteros considerados para realizar el estudio.

Muestras	Ensayos
Pastas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inicio-Final de fraguado (Vicat manual)</li> <li>- Evolución de la temperatura (sonda térmica)</li> </ul>
Morteros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inicio-Final de fraguado (Vicat automático)</li> <li>- Evolución de la temperatura (sonda térmica)</li> <li>- Resistencia a la penetración (1-1,5-2-2,5 horas)</li> <li>- Resistencia a flexotracción (6-12-24 horas; 7, 28, 60, 120 días)</li> <li>- Resistencia a compresión (6-12-24 horas; 7, 28, 60, 120 días)</li> </ul>

Tabla 3.1 – Ensayos relativos a la campaña experimental

En este sentido en las pastas, junto al acelerante correspondiente, se han utilizado dos tipos de cemento, con y sin superfluidificante. En los morteros se ha incorporado en todos ellos el superfluidificante.

### 3.3. MATERIALES COMPONENTES

#### Cemento:

Se han utilizado dos tipos de cemento CEM I 42,5R y CEM I 52,5R suministrados por Cementos Molins S.A.

Como se ha comentado en el capítulo anterior, el uso de estos dos cementos implica resultados buenos tanto si trabajamos con acelerantes basados en aluminatos o con acelerantes libres de álcalis. Es importante tener esto claro debido a que ambas familias de acelerantes son susceptibles al tipo de cemento con el que se dosifica el hormigón proyectado.

#### Agua:

Se ha utilizado agua destilada, suministrada por el Laboratorio de Química y Materiales de Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Con el uso del agua destilada nos aseguramos de no aportar sustancias químicas que puedan alterar la mezcla.

Respecto a la relación agua/cemento (a/c), para las pastas sin superplastificante se ha adoptado el valor de 0,32, mientras que para las que incorporan superplastificante el valor de la citada relación es de 0,27; para los morteros, la relación agua/cemento (a/c) adoptada es de 0,45.

#### Aditivos:

##### Superfluidificante

Como aditivo superplastificante se ha utilizado el Viscocrete CS 305 de SIKA S.A. cuyas características se muestran en la tabla 3.2. Este superfluidificante ha sido suministrado por la empresa Industrias Químicas del Ebro, S.A. (IQE).

Las mezclas se denominarán según incorporen o no aditivo superplastificante:

SP	con superplastificante
Sin SP	sin superplastificante

Función principal	Superplastificante
Función secundaria	Retardante del fraguado y estabilizador de la mezcla
Aspecto físico	Líquido verde oscuro
Densidad, 20°C	Aprox. 1,1 gr/cm <sup>3</sup>
pH	4,3
Contenido en cloruros	No contiene cloruros
Residuo seco	37,5%

Tabla 3.2: Características del Viscocrete (fuente: Sika)

### Acelerantes de fraguado

Como aditivos acelerantes de fraguado se han utilizado acelerantes libre de álcalis denominados AKF, AFA 15XX (1500, 1501, 1502, 1503), AFA 16XX (1600, 1601, 1602, 1603) y AFA 30XX (3000, 3001, 3002, 3003) con un 41% de materia sólida y un aditivo acelerante a base de aluminatos, ALNA, con un 43,2% de materia sólida. Los contenidos de materia sólida del superfluidificante y de los acelerantes han sido facilitados por IQE.

Para la caracterización de los acelerantes se tiene en cuenta que los acelerantes AKF y ALNA se consideran como patrón de referencia respecto a las familias AFA 15XX, AFA 16XX y AFA 30 XX.

Las familias de acelerantes AFA\_15XX, 16XX y 30XX contienen diferentes concentraciones de distintos compuestos químicos tal y como se refleja en la tabla 3.3. Mientras los ácidos ( $H_3PO_4$ , HCOOH, HF) tienen una cierta función de mantener estables las características del aditivo en el tiempo, el compuesto DEAH proporciona versatilidad al aditivo en relación a la compatibilidad con distintos tipos de cemento. Estos compuestos son los que causan las variaciones en las diferentes características de los acelerantes y son la base de estudio de la caracterización de estos.

El uso de los ácidos componentes en los acelerantes, su función y su contenido lo ha dado la empresa IQE, que al ser fabricante ha querido que no se conozcan las características de ninguno de ellos.

AFA_1500	AFA_1501	AFA_1502	AFA_1503
9% $H_3PO_4$	12% HCOOH	4% HCOOH	14% HF

AFA_1600	AFA_1601	AFA_1602	AFA_1603
4% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	3% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	2% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
AFA_3000	AFA_3001	AFA_3002	AFA_3003
6% DEAH	4% DEAH	2% DEAH	0% DEAH

Tabla 3.3: Concentraciones de ácidos en las familias de acelerantes AFA\_15XX, 16XX y 30XX (fuente: IQE)

La nomenclatura utilizada para identificación de las mezclas se basa en el acelerante utilizado:

- Tipo de acelerante:
  - AKF                    libre de álcali patrón
  - ALNA                basado en aluminatos
  - AFA 15XX        libre de álcali modificado
  - AFA 16XX        libre de álcali modificado
  - AFA 30XX        libre de álcali modificado

### Áridos:

Como árido en el mortero se ha utilizado una arena normalizada 0-5mm, EN-196 de procedencia española, suministrada por el Instituto Eduardo Torroja.

### 3.4. DOSIFICACIONES DE REFERENCIA

En este apartado se presentan las dosificaciones a nivel de pastas y morteros, considerando que para cada mezcla en donde se ha utilizado el aditivo superfluidificante se ha tenido en cuenta el agua aportada por el mismo, según su residuo sólido.

En la tabla 3.4 se pueden ver la totalidad de muestras ensayadas en el estudio.

	<b>Acelerante AKF</b>		<b>Acelerante ALNA</b>	
PASTAS	AKF_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R		ALNA_4_52,5 con SP y CEM I 52,5R	
	AKF_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R		ALNA_5_52,5 sin SP y CEM I 52,5R	
	AKF_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R		ALNA_5_42,5 con SP y CEM I 42,5R	
	AKF_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5		ALNA_6_42,5 sin SP y CEM I 42,5	
MORTEROS	AKF_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R		ALNA_4_52,5 con SP y CEM I 52,5R	
	AKF_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R		AKF_5_42,5 con SP y CEM I 42,5R	
	<b>Acelerante AFA_1500</b>		<b>Acelerante AFA_1501</b>	
PASTAS	AFA_1500_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R		AFA_1501_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	
	AFA_1500_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R		AFA_1501_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R	
	AFA_1500_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R		AFA_1501_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	
	AFA_1500_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5		AFA_1501_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5	

MORTEROS	AFA_1500_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_1501_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_1500_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_1501_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	<b>Acelerante AFA_1502</b>	<b>Acelerante AFA_1503</b>
PASTAS	AFA_1502_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_1503_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_1502_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R	AFA_1503_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R
	AFA_1502_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_1503_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	AFA_1502_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5	AFA_1503_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5
MORTEROS	AFA_1502_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_1503_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_1502_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_1503_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	<b>Acelerante AFA_1600</b>	<b>Acelerante AFA_1601</b>
PASTAS	AFA_1600_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_1601_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_1600_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R	AFA_1601_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R
	AFA_1600_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_1601_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	AFA_1600_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5	AFA_1601_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5
MORTEROS	AFA_1600_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_1601_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_1600_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_1601_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	<b>Acelerante AFA_1602</b>	<b>Acelerante AFA_1603</b>
PASTAS	AFA_1602_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_1603_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_1602_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R	AFA_1603_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R
	AFA_1602_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_1603_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	AFA_1602_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5	AFA_1603_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5
MORTEROS	AFA_1602_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_1603_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_1602_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_1603_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	<b>Acelerante AFA_3000</b>	<b>Acelerante AFA_3001</b>
PASTAS	AFA_3000_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_3001_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_3000_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R	AFA_3001_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R
	AFA_3000_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_3001_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	AFA_3000_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5	AFA_3001_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5
MORTEROS	AFA_3000_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_3001_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_3000_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_3001_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	<b>Acelerante AFA_3002</b>	<b>Acelerante AFA_3003</b>
PASTAS	AFA_3002_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_3003_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_3002_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R	AFA_3003_9_52,5 sin SP y CEM I 52,5R
	AFA_3002_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_3003_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R
	AFA_3002_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5	AFA_3003_10_42,5 sin SP y CEM I 42,5
MORTEROS	AFA_3002_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R	AFA_3003_8_52,5 con SP y CEM I 52,5R
	AFA_3002_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R	AFA_3003_9_42,5 con SP y CEM I 42,5R

Tabla 3.4.- Muestras ensayadas en el contexto del proyecto

### 3.4.1. Dosificación de la pasta

En las tablas 3.5 y 3.6 se detallan las dosificaciones empleadas en el estudio sobre pastas y la nomenclatura de referencia adoptada para cada una de ellas. Estas corresponden a dos tipos de cemento, varios tipos de acelerante libres de álcalis (AKF, AFA 15XX, AFA 16XX y AFA 30XX) y uno a base de aluminatos (ALNA), habiéndose considerado para cada tipo de cemento y de acelerante, la incorporación o no incorporación del superplastificante. La

designación numérica en la nomenclatura adoptada para pastas (y también posteriormente para morteros) corresponde al porcentaje de acelerante utilizado.

Los porcentajes de acelerante y superplastificante utilizados son sobre el peso de cemento. Respecto a los porcentajes de acelerante se han conseguido a partir de ensayos de inicio y final de fraguado, con el que se variaba su contenido hasta llegar a unos óptimos de tiempo. Respecto a la relación agua/cemento (a/c), para las pastas sin superplastificante se ha adoptado el valor de 0,32, mientras que para las que incorporan superplastificante el valor de la citada relación es de 0,27. En las pastas que incorporan el superplastificante se ha tenido en cuenta el agua aportada por el mismo, según su residuo sólido; por ello, las cantidades de agua incorporada en estos casos difieren del agua total. Estos contenidos de agua se han establecido mediante estudios previos realizados por la empresa IQE.

	CEM I 42,5R			
Acelerante	AKF/AFA		ALNA	
Referencia	AKF/AFA_9 42,5	AKF/AFA_10 42,5	ALNA_5 42,5	ALNA_6 42,5
Superplastificante	si	no	si	no
a/c	0,27	0,32	0,27	0,32
Cemento	100g	100g	100g	100g
Superfluidificante (1%)	1,0g	0,0g	1,0g	0,0g
	CEM I 42,5R			
Acelerante	AKF/AFA		ALNA	
Referencia	AKF/AFA_9 42,5	AKF/AFA_10 42,5	ALNA_5 42,5	ALNA_6 42,5
Agua Total	27g	32g	27g	32g
Agua del Superfluidificante	0,62g	0,00	0,62g	0,00
Agua incorporada	26,38g	32g	26,38g	32g
Dosis Acelerante	9%	10%	5%	6%

Tabla 3.5: Dosificación de las pastas CEM I 42,5

	CEM I 52,5R			
Acelerante	AKF/AFA		ALNA	
Referencia	AKF/AFA_8 52,5	AKF/AFA_9 52,5	ALNA_4 52,5	ALNA_5 52,5
Superplastificante	si	no	si	no
a/c	0,27	0,32	0,27	0,32
Cemento	100g	100g	100g	100g

	CEM I 52,5R			
Acelerante	AKF/AFA		ALNA	
Referencia	AKF/AFA_8 52,5	AKF/AFA_9 52,5	ALNA_4 52,5	ALNA_5 52,5
Superfluidificante (1%)	1,0g	0,0g	1,0g	0,0g
Agua Total	27g	32g	27g	32g
Agua del Superfluidificante	0,62g	0,00	0,62g	0,00
Agua incorporada	26,38g	32g	26,38g	32g
Dosis Acelerante	8%	9%	4%	5%

Tabla 3.6: Dosificación de las pastas CEM I 52,5

### 3.4.2. Dosificación del mortero

En la Tabla 3.7 se detallan las dosificaciones empleadas en el estudio sobre morteros y la nomenclatura de referencia adoptada para cada una de ellas. Estas corresponden a dos tipos de cemento, diferentes tipos de acelerantes, y un único superplastificante. La designación numérica en la nomenclatura adoptada para morteros corresponde al porcentaje de acelerante utilizado en los mismos.

	CEM I 42,5			CEM I 52,5		
Acelerante	AKF	ALNA	AFA	AKF	ALNA	AFA
Referencia	AKF_9	ALNA_5	AFA_15XX_9 AFA_16XX_9 AFA_30XX_9	AKF_8	ALNA_4	AFA_15XX_8 AFA_16XX_8 AFA_30XX_8
a/c	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Cemento	450g	450g	450g	450g	450g	450g
Superfluidificante (1%)	4,5g	4,5g	4,5g	4,5g	4,5g	4,5g
Arena Normalizada EN-196	1350g	1350g	1350g	1350g	1350g	1350g
Agua Total	202,5g	202,5g	202,5g	202,5g	202,5g	202,5g
Agua del Superfluidificante	2,81g	2,81g	2,81g	2,81g	2,81g	2,81g
Agua incorporada	199,7g	199,7g	199,7g	199,7g	199,7g	199,7g
Dosis Acelerante	9%	5%	9%	8%	4%	8%

Tabla 3.7: Dosificación de los morteros CEM I 42,5 y CEM I 52,5

Los porcentajes de acelerante y superplastificante utilizados son sobre el peso de cemento. La relación agua/cemento (a/c) adoptada es de 0,45. También, respecto al superplastificante se ha tenido en cuenta el agua aportada

por el mismo, según su residuo sólido; por ello, las cantidades de agua incorporada difieren del agua total. En este sentido, no se ha considerado el agua aportada por el acelerante. Estos contenidos de agua también se han establecido mediante estudios previos realizados por la empresa IQE.

### 3.5. FABRICACIÓN DE LAS MAZCLAS

En este apartado se indica el proceso de fabricación de las pastas y de los morteros estudiados en esta tesina.

#### 3.5.1. Fabricación de pastas

Las pastas han sido fabricadas manualmente según el siguiente proceso de mezclado:

1. Se mezcla el superplastificante (SP) con el agua a incorporar
2. Se añade el cemento mezclando enérgicamente (1min) con una espátula
3. Se incorpora del aditivo acelerante y se agita durante 10 segundos
4. Se rellena el molde y se inician las medidas

La fabricación se ha realizado a una temperatura de  $22 \pm 2$  °C y una humedad del  $55 \pm 5$  % dada por la cámara climática del Laboratorio.

#### 3.5.2. Fabricación de morteros

Los morteros han sido fabricados en una amasadora automática de morteros de 5 litros de capacidad, rotaciones de pala y planetaria con velocidades respectivas de 225 y 100 rpm. El proceso de mezclado ha sido el que se describe seguidamente:

1. Se vierte el contenido del agua en la amasadora y se añade el superfluidificante y el cemento, agitando durante 30 segundos
2. Se añade la arena normalizada en un tiempo máximo de 30 segundos; se agita la mezcla durante otros 30 segundos
3. Se deja en reposo durante 90 segundos
4. Se agita de nuevo durante 30 segundos



5. Se incorpora del aditivo acelerante durante un máximo de 20 segundos
6. Inmediatamente el molde colocado sobre una mesa vibratoria y se compacta durante 10 segundos

### 3.6. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

En este apartado se presentan los procedimientos seguidos en la campaña experimental sobre pastas y morteros. Estos se refieren, en primer lugar, al inicio/final del fraguado y la evolución de la temperatura interna de las mezclas. A continuación, respecto a los morteros, se refieren los relativos a la caracterización mecánica en términos de las resistencias a flexión y compresión a distintas edades y a la resistencia a la penetración en las primeras horas.

Estos ensayos no son los típicos para la caracterización de los aditivos de para hormigones, pero se han escogido estos ensayos porque nos dan más información sobre los acelerantes del estudio. Por ejemplo, el ensayo de las temperaturas se relaciona directamente con el ensayo de resistencias características a corto plazo. Cada uno de estos ensayos caracterizará cada uno de los acelerantes y nos ayudará a la hora de escribir las conclusiones del Capítulo 5 de este estudio.

El ensayo de inicio y final de fraguado nos permite conocer el tiempo en que la pasta adquiere cierta resistencia inicial. Este ensayo se realiza con un vicat manual para pastas y un vicat automático para morteros. Este ensayo es utilizado en la caracterización de los acelerantes porque nos ayuda a saber cual es la dosificación, en tanto por ciento de cemento, óptima para el acelerante con el que se dosifique, mediante ensayos repetitivos.

Cuando añadimos acelerante a la mezcla, el proceso de hidratación del fraguado se vuelve más exotérmico. Por este motivo se realiza el ensayo de evolución de temperatura interna tanto en pastas como en morteros. Este ensayo nos permite conocer como varía la temperatura de los procesos de hidratación en el tiempo y cuando se producen picos de temperaturas.

En la caracterización de los acelerantes es esencial estudiar las resistencias a diferentes edades de las muestras realizadas con mortero. Hacerlo nos permite conocer las resistencias características que aportaran los hormigón proyectados con acelerantes. Conociendo la relación que existe en estos ensayos de morteros con los ensayos en hormigones, los realizamos con mortero y no con hormigón.

Este ensayo comentado nos da a conocer las características resistentes a distintas edades, de las cuales la más temprana es a los 7 días. Además, con el

ensayo de inicio/final de fraguado se obtienen unos tiempos (pocos minutos) que nos dan a conocer que el mortero del estudio está empezando a ser resistentes. Entre estos pocos minutos y estos 7 días, las resistencias características también varían, y es por este motivo que se realiza el ensayo de resistencia a la penetración. Con este ensayo podemos obtener valores de resistencia a las pocas horas de la fabricación del mortero.

Estos ensayos, con los cuales conseguimos caracterizar los acelerantes para hormigón proyectado utilizando pastas y morteros, se describen en los subapartados siguientes:

### 3.6.1. Inicio/Final de fraguado en pastas

La determinación del inicio/final del fraguado en pastas se ha realizado mediante un aparato Vicat manual siguiendo norma EN 196/3 (“Métodos de ensayo de cementos. Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen”), pero empleando un molde cilíndrico de 25 mm de diámetro y de 40 mm de altura. El inicio de fraguado se establece cuando la distancia entre la aguja y la placa base es de  $4 \pm 1$  mm y el final cuando la aguja ya no penetra en la muestra. El equipo empleado se muestra en la figura 3.1. Los ensayos se han realizado a una temperatura de  $22 \pm 2$  °C y una humedad del  $55 \pm 5$  %.



Figura 3.1 – Vicat Manual para medidas de inicio y final de fraguado en pastas

### 3.6.2. Inicio/Final de fraguado en morteros

La determinación del inicio/final del fraguado en morteros se ha realizado mediante un aparato Vicat automático siguiendo norma EN 196/3 ("Métodos de ensayo de cementos. Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen"). El inicio de fraguado se establece cuando la distancia entre la aguja y la placa base es de  $4 \pm 1$  mm y el final cuando la aguja ya no penetra en la muestra. El equipo empleado se muestra en la figura 3.2. Los ensayos se han realizado a una temperatura de  $22 \pm 2$  °C y una humedad del  $55 \pm 5$  % habiendo sido ejecutados con inicio de lectura inmediato (retraso 0) y intervalo de lectura de 30 segundos.

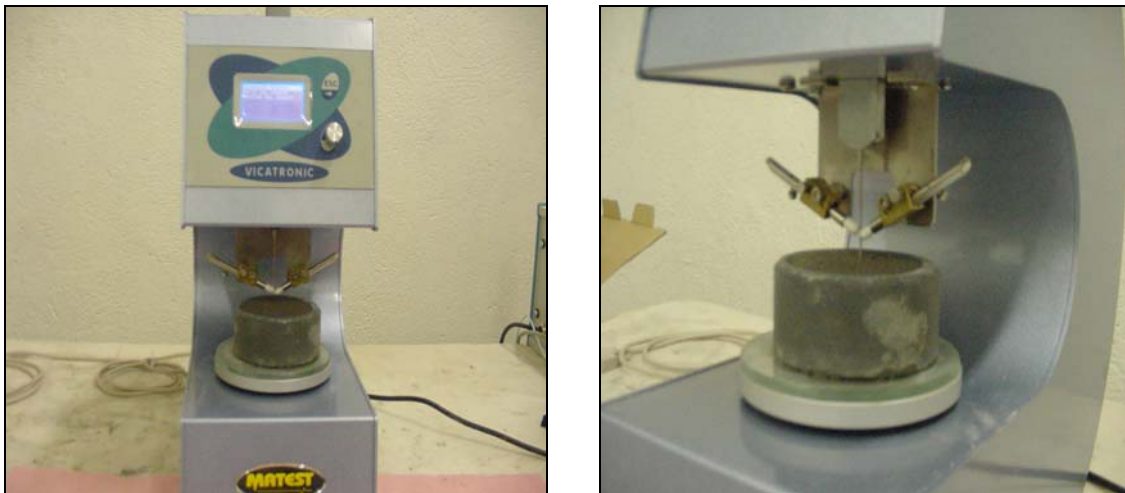


Figura 3.2 – Vicat Automático para medidas de inicio y final de fraguado en morteros

### 3.6.3. Evolución de la temperatura en pastas y morteros

Las temperaturas a nivel de pasta y mortero han sido determinadas introduciendo una sonda termopar tipo K en un volumen de las mezclas, con un registro continuo en el tiempo de la temperatura mediante un sistema de adquisición de datos. El equipo utilizado es un Squirrel, el cual se visualiza en la figura 3.3, en donde se ilustra también la sonda tipo utilizada.



Figura 3.3 – Squirrel

La secuencia de registros de temperatura adoptada ha sido cada quince segundos durante las dos primeras horas de la fabricación de las pastas y a cada quince segundos durante las quince primeras horas de la fabricación de los morteros. En este sentido, el tiempo cero de medida es el que corresponde a la incorporación del acelerante.

#### 3.6.4. Resistencia a flexión y a compresión en morteros

La determinación de la resistencia a flexión y compresión en morteros se ha realizado mediante el ensayo de compresión siguiendo norma EN 196-1 (“Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas”). El equipo utilizado para realización de este ensayo se encuentra en la figura 3.4. Para cada muestra se han fabricado tres probetas prismáticas de 4x4x16 (cm).

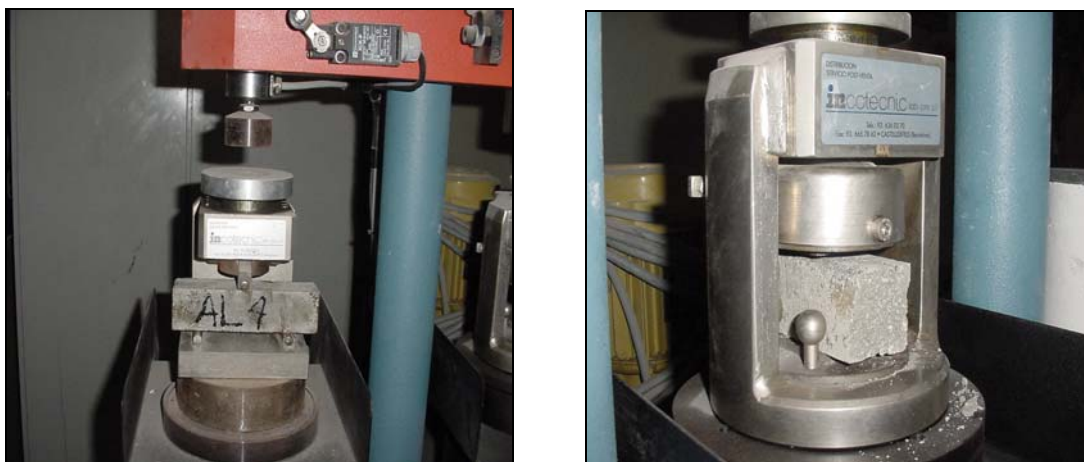


Figura 3.4 – Ensayos de resistencia a flexión y compresión en morteros

### 3.6.5. Resistencia a la penetración en morteros

La determinación de la resistencia a la penetración en morteros se ha realizado siguiendo las directrices de la norma ASTM C 403 ("Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance). El equipo utilizado para realización de este ensayo se visualiza en la figura 3.5.

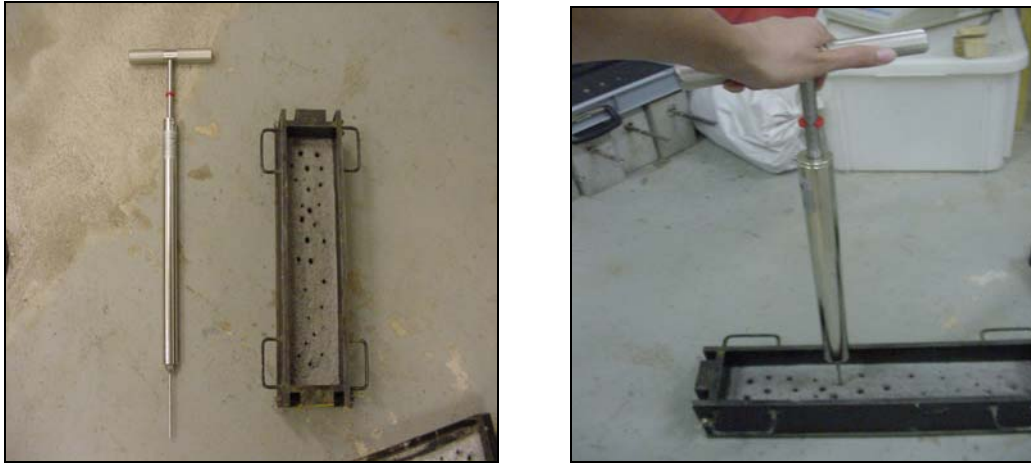


Figura 3.5 – Equipo para el ensayo de penetración

El ensayo consiste básicamente en introducir en el mortero una aguja de 32mm de diámetro, dependiendo del estado de endurecimiento del mortero, accionada manualmente por un equipo que permite la medida de la fuerza aplicada. Se ejerce sobre el equipo, de forma gradual y uniforme, una fuerza hasta que la aguja penetre en el mortero una profundidad de 25 mm, con un tiempo de penetración de unos 10 segundos, registrándose el valor de la fuerza correspondiente a esta penetración. El valor de la fuerza obtenida en  $K_p$  sirve de base para estimar la resistencia a compresión utilizando el ábaco dado por la Norma UNE 83-603-93. La lectura de las fuerzas en  $K_p$  se corresponde con un rango de valores de resistencia a compresión en MPa.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos y su análisis según los acelerantes estudiados. Estos resultados se refieren a la determinación del inicio/final de fraguado y la evolución térmica de pastas y morteros, y a las resistencias a la flexión, compresión y penetración de morteros. Tal como se ha expuesto en el capítulo anterior, las muestras ensayadas se han fabricado utilizando dos tipos de cemento, CEM I 52,5 R y CEM I 42,5 R, un superfluidificante (Viscocrete CS 305), un par de acelerantes patrones, el basado en aluminatos (ALNA) y el libre de álcali (AKF), y las familias modificadas de los acelerantes libres de álcali (AFA15XX, AFA16XX y AFA30XX).

En primer lugar se presentan, para cada tipo de acelerante, los resultados de los ensayos que se han realizado tanto a nivel pasta como a nivel mortero, es decir, los ensayos de determinación de inicios y finales de fraguado y las evoluciones de temperaturas. Seguidamente, se presentan los resultados a nivel mortero con las resistencias a la flexión, a la compresión y a la penetración.

Una vez mostrados los resultados de cada ensayo, se comentan de forma general los análisis de estos resultados, para posteriormente poder concretar las conclusiones de este estudio.

## 4.2. RESULTADOS RELATIVOS A LOS ENSAYOS REALIZADOS

En este apartado se presentan los resultados y análisis de resultados de las series de acelerantes estudiadas en este estudio. En primer lugar se presentan, para cada tipo de acelerante, los resultados de los ensayos que se han realizado tanto a nivel pasta como a nivel mortero, es decir, los ensayos de determinación de principios y finales de fraguado y las evoluciones de temperaturas. A continuación, se presentan los resultados a nivel mortero respecto a las resistencias a la flexión, a la compresión y a la penetración.

### 4.2.1. Resultado y análisis de resultados relativos al inicio/final de fraguado en pastas

#### 4.2.1.1. Acelerantes Patrones

Los tiempos de inicio y final de fraguado en pastas obtenidos con el ensayo del Vicat Manual para las pastas con acelerantes ALNA y AKF se dan en las tablas 4.1-1 y 4.1-2, con cementos CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente.

Pastas		CEM I 42,5			
		AKF_9	AKF_10_SP	ALNA_5	ALNA_6_SP
Tiempo (min)	I.F.	1' 06"	1' 18"	1' 18"	1' 12"
	F.F.	1' 48"	2' 24"	2' 24"	2' 48"
Dosific.	a/c	0,32	0,27	0,32	0,27
	SP	0	1	0	1

Tabla 4.1-1: Tiempos de inicio y final de fraguado de las pastas con acelerantes AKF y ALNA a través del Vicat Manual con CEM I 42,5R

Pastas		CEM I 52,5			
		AKF_8	AKF_9_SP	ALNA_4	ALNA_5_SP
Tiempo (min)	I.F.	1' 12"	0' 50"	0' 54"	1' 12"
	F.F.	2' 24"	1' 48"	2' 42"	2' 00"
Dosific.	a/c	0,32	0,27	0,32	0,27
	SP	0	1	0	1

Tabla 4.1-2: Tiempos de inicio y final de fraguado de las pastas con acelerantes AKF y ALNA a través del Vicat Manual con CEM I 52,5R

Para el conjunto de pastas, los tiempos de inicio y final de fraguado se sitúan en el intervalo comprendido entre 50 segundos y 2 minutos 48 segundos.

A nivel cualitativo, y si se exceptúan las pastas AKF\_9 - CEM I 42,5R y AKF\_8 - CEM I 52,5R, la duración del fraguado en el resto de los casos es inferior en los cementos CEM I 52,5 R frente a la correspondiente a los cementos CEM I 42,5 R, independientemente del tipo de acelerante.

#### 4.2.1.2. Acelerantes AFA15XX

Los tiempos de inicios y finales de fraguado en pastas obtenidos con el ensayo del Vicat Manual para las pastas AFA\_15XX encuentran en las tablas 4.2-1 y 4.2-2.

CEM I 42,5R					
Pastas		AFA_1500_9	AFA_1501_9	AFA_1502_9	AFA_1503_9
Tiempo Vicat	I.F.	1' 47"	1' 15"	1' 08"	1' 32"
	F.F.	3' 00"	2' 06"	1' 40"	2' 35"
CEM I 52,5R					
Pastas		AFA_1500_8	AFA_1501_8	AFA_1502_8	AFA_1503_8
Tiempo Vicat	I.F.	1' 20"	1' 36"	1' 40"	1' 00"
	F.F.	2' 45"	3' 05"	2' 50"	1' 33"
Dosificación		a/c = 0,32			

Tabla 4.2-1: Tiempos de inicio y final de fraguado a través del Vicat Manual de las pastas AFA\_15XX sin Superplastificante.

CEM I 42,5R					
Pastas		AFA_1500_10	AFA_1501_10	AFA_1502_10	AFA_1503_10
Tiempo Vicat	I.F.	1' 49"	1' 05"	1' 05"	2' 00"
	F.F.	3' 35"	1' 57"	2' 00"	3' 50"
CEM I 52,5R					
Pastas		AFA_1500_9	AFA_1501_9	AFA_1502_9	AFA_1503_9
Tiempo Vicat	I.F.	1' 50"	1' 10"	1' 30"	1' 10"
	F.F.	3' 30"	2' 30"	3' 15"	2' 50"
Dosificación		a/c = 0,27 y SP = 1%			

Tabla 4.2-2: Tiempos de inicio y final de fraguado a través del Vicat Manual de las pastas AFA\_15XX con Superplastificante.

Para el conjunto de pastas fabricadas con los acelerantes de la serie AFA 15XX, los tiempos de inicio y final de fraguado se sitúan en el intervalo comprendido entre 1 minuto y 5 segundos y 3 minutos y 35 segundos. Estos valores superan los valores patrones AKF situados entre 50 segundos y 2 minutos y 48 segundos, respectivamente.



Los IF y FF se ven influenciados por el tipo de cemento. La presencia del superplastificante supone un aumento en los tiempos de IF y FF, a excepción del AFA 1501, independientemente del tipo de cemento.

Respecto al CEM I 42,5R, la serie de acelerantes AFA\_15XX presentó una duración de fraguado inferior con la mezcla AFA\_1502\_9 (con superplastificante), cuyos valores han sido de 1 minuto y 8 segundos para el inicio de fraguado, y de 1 minuto y 40 segundos para el final de fraguado. Estos tiempos se acercan a los presentados por la mezcla patrón AKF\_9 (con superplastificante) con CEM I 42,5, cuyos tiempos de inicio y final de fraguado han sido de 1 minuto y 6 segundos y 1 minuto y 48 segundos, respectivamente.

La mezcla con CEM I 52,5R que presentó una duración de fraguado inferior ha sido la AFA\_1503\_8 (sin superplastificante), con valores de 1 minuto y 1 minuto y 33 segundos, respectivamente, para el inicio y final de fraguado. En comparación con la mezcla patrón AKF\_9 (sin superplastificante) cuyos valores obtenidos han sido de 50 segundos para el inicio de fraguado y de 1 minuto y 48 segundos para el final de fraguado, se puede observar la proximidad de los mismos.

#### 4.2.1.3. Acelerantes AFA16XX

Los tiempos de inicios y finales de fraguado en pastas obtenidos con el ensayo del Vicat Manual para las pastas AFA\_16XX encuentran en las tablas 4.3-1 y 4.3-2.

CEM I 42,5R					
Pastas		AFA_1600_9	AFA_1601_9	AFA_1602_9	AFA_1603_9
Tiempo	I.F.	1' 00"	1' 03"	1' 04"	1' 15"
Vicat	F.F.	1' 45"	1' 35"	1' 40"	2' 03"
CEM I 52,5R					
Pastas		AFA_1600_8	AFA_1601_8	AFA_1602_8	AFA_1603_8
Tiempo	I.F.	0' 58"	1' 07"	1' 05"	1' 07"
Vicat	F.F.	2'00"	1' 52"	2' 03"	1' 50"
Dosificación		a/c = 0,32			

Tabla 4.3-1: Tiempos de inicio y final de fraguado a través del Vicat Manual de las pastas AFA\_16XX sin Superplastificante.

CEM I 42,5R					
Pastas		AFA_1600_10	AFA_1601_10	AFA_1602_10	AFA_1603_10
Tiempo	I.F.	1' 15"	1' 03"	1' 10"	1' 20"
Vicat	F.F.	1' 53"	2' 07"	1' 45"	2' 21"

CEM I 52,5R					
Pastas		AFA_1600_9	AFA_1601_9	AFA_1602_9	AFA_1603_9
Tiempo	I.F.	1' 26"	1' 33"	1' 40"	1' 07"
Vicat	F.F.	2' 04"	2' 56"	2' 35"	1' 59"
Dosificación	a/c = 0,27 y SP = 1%				

Tabla 4.3-2: Tiempos de inicio y final de fraguado a través del Vicat Manual de las pastas AFA\_16XX con Superplastificante.

Para el conjunto de pastas fabricadas con los acelerantes de la serie AFA 16XX, los tiempos de inicio y final de fraguado se sitúan en el intervalo comprendido entre 58 segundos y 2 minutos y 56 segundos. Estos valores se acercan bastante a los valores patrones AKF situados entre 50 segundos y 2 minutos y 48 segundos, respectivamente.

Respecto al CEM I 42,5R, la serie de acelerantes AFA\_15XX presentó una duración de fraguado prácticamente constante en todas las muestras con valores situados entre 1 minuto y 2 minutos, respectivamente, para inicio y final de fraguado, independientemente de la incorporación del superplastificante.

Esta tendencia se ha mantenido igualmente para el CEM I 52,5R, a la excepción de las mezclas AFA\_1601 y AFA\_1602 cuya duración de fraguado presentó una ligera elevación frente a las mezclas fabricadas con CEM I 42,5R. Estas han presentado tiempos de inicio y final de fraguado entre 1 minuto y 7 segundos y 2 minutos y 56 segundos, respectivamente.

#### 4.2.1.4. Acelerantes AFA30XX

Los tiempos de inicios y finales de fraguado en pastas obtenidos con el ensayo del Vicat Manual para las pastas AFA\_30XX encuentran en las tablas 4.4-1 y 4.4-2.

CEM I 42,5R					
Pastas		AFA_3000_9	AFA_3001_9	AFA_3002_9	AFA_3003_9
Tiempo	I.F.	2' 31"	2' 31"	2' 07"	2' 40"
Vicat	F.F.	3' 55"	3' 05"	3' 22"	4' 25"
CEM I 52,5R					
Pastas		AFA_3000_8	AFA_3001_8	AFA_3002_8	AFA_3003_8
Tiempo	I.F.	0' 50"	0' 52"	1' 02"	0' 55"
Vicat	F.F.	1' 20"	1' 29"	1' 55"	2' 16"
Dosificación	a/c = 0,32				

Tabla 4.4-1: Tiempos de inicio y final de fraguado a través del Vicat Manual de las pastas AFA\_30XX sin Superplastificante.

CEM I 42,5R					
Pastas		AFA_3000_10	AFA_3001_10	AFA_3002_10	AFA_3003_10
Tiempo	I.F.	2' 45"	2' 39"	3' 05"	4' 01"
Vicat	F.F.	4' 21"	4' 20"	4' 40"	5' 30"
CEM I 52,5R					
Pastas		AFA_3000_9	AFA_3001_9	AFA_3002_9	AFA_3003_9
Tiempo	I.F.	1' 10"	1' 15"	1' 02"	1' 25"
Vicat	F.F.	2' 00"	2' 50"	2' 02"	3' 35"
Dosificación	a/c = 0,27 y SP = 1%				

Tabla 4.4-2: Tiempos de inicio y final de fraguado a través del Vicat Manual de las pastas AFA\_30XX con Superplastificante.

Para el conjunto de pastas fabricadas con los acelerantes de la serie AFA 30XX, los tiempos de inicio y final de fraguado se sitúan en el intervalo comprendido entre 2 minutos y 7 segundos y 5 minutos y 30 segundos para mezclas con CEM I 42,5R, respectivamente. Estos valores se alejan bastante de los valores patrones AKF situados entre 1 minuto y 6 segundos con el CEM I 42,5R, seguidos de 50 segundos y 2 minutos y 24 segundos con CEM I 52,5R, para inicios y finales de fraguado respectivamente.

Para pastas fabricadas con CEM I 52,5R este intervalo se sitúa entre 50 segundos y 3 minutos y 35 segundos, más cercanos a los valores presentados por las mezclas patrones AKF anteriormente citadas.

Respecto al CEM I 42,5R, la serie de acelerantes AFA\_30XX presentó una duración de fraguado superior en prácticamente todas las mezclas frente a las mezclas fabricadas con CEM I 52,5R, independientemente de la incorporación del superplastificante.

## 4.2.2. Resultado y análisis de resultados relativos al inicio/final de fraguado en morteros

### 4.2.2.1. Acelerantes Patrones

Los tiempos de inicios y finales de fraguado en morteros obtenidos con el ensayo del Vicat Automático para los morteros con los acelerantes ALNA y AKF se presentan en la tabla 4.5. Igualmente se puede observar en la gráfica ilustrada en la figura 4.1 la Penetración (mm) versus Tiempo (min) de las mezclas, habiendo sido ensayadas con inicio de lectura inmediato (retraso 0) y intervalo de lectura de 30 segundos.

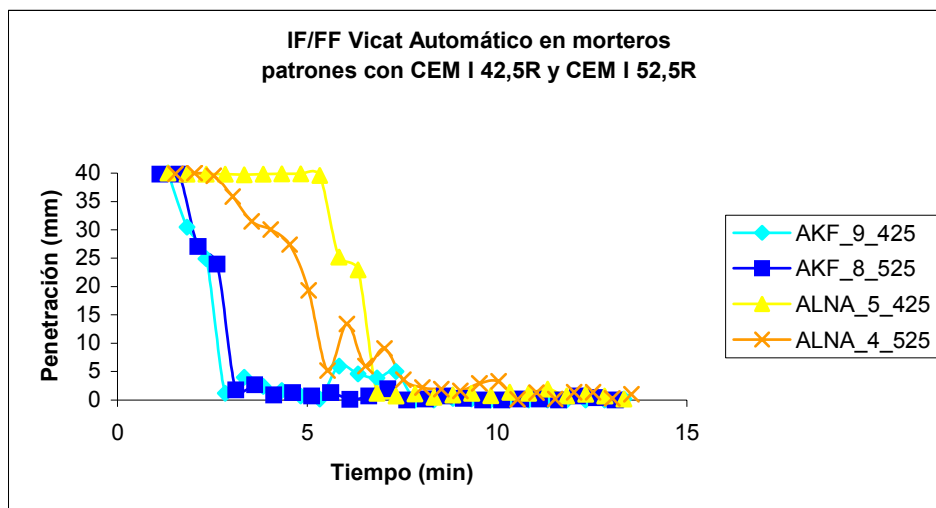


Figura 4.1: Valores correspondientes a los principios y finales de fraguado en morteros patrones AKF y ALNA a través del Vicat Automático.

Los criterios adoptados para el inicio y final de fraguado, extrapolados de los empleados para pastas, establecen que el inicio de fraguado se da cuando la distancia entre la aguja y la placa base es de  $4 \pm 1$  mm y el final cuando la aguja ya no penetra en la muestra. Las lecturas expuestas en la figura 4.1 son la penetración de la aguja en el molde patrón de 40 mm de altura; en este sentido, el inicio de fraguado es el tiempo correspondiente a una penetración de 36 mm, y el final el correspondiente a una penetración nula. Los valores considerados óptimos en este estudio para el principio y final de fraguado de morteros son inferiores a dos minutos (inicio del fraguado) y a seis minutos (final del fraguado), respectivamente.

Los resultados obtenidos en estos ensayos no permiten definir de una forma clara los tiempos de fraguado según los criterios adoptados para su determinación. Ello se fundamenta en un comportamiento no lineal entre la penetración y el tiempo, el cual se manifiesta mediante las fluctuaciones visualizadas en la figura 4.1.

No obstante, tal como puede apreciarse en la figura 4.1 es posible observar que las muestras fabricadas con AKF presentan tiempos de inicio y final de fraguado inferiores a los presentados por las muestras fabricadas con el ALNA. En la tabla 4.5 se pone de manifiesto que los valores del AKF cumplen los valores óptimos prácticamente en ambos cementos, mientras que el ALNA ha presentado valores bastante superiores.

Como resumen en la tabla 4.5 se presentan los valores de inicio y final de fraguado para los morteros con acelerantes AKF y ALNA.

Morteros		CEM I 42,5		CEM I 52,5	
		AKF_9	ALNA_5	AKF_8	ALNA_4
Tiempo (min)	I.F.	1' 50"	5' 20"	2' 07"	3'
	F.F.	5' 20"	6' 50"	4' 07"	8'
Dosific.		a/c = 0,45 y SP = 1%			

Tabla 4.5: Tiempos de inicio y final de fraguado de los morteros patrones AKF y ALNA a través del Vicat Automático.

#### 4.2.2.2. Acelerantes AFA15XX

En la tabla 4.6 se exponen los tiempos de inicios y finales de fraguado en morteros obtenidos con el ensayo del Vicat Automático para los morteros con acelerantes AFA\_15XX. En las gráficas ilustradas en las figuras 4.2 y 4.3 se puede observar la Penetración (mm) versus Tiempo (min) de las mezclas fabricadas con CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente.

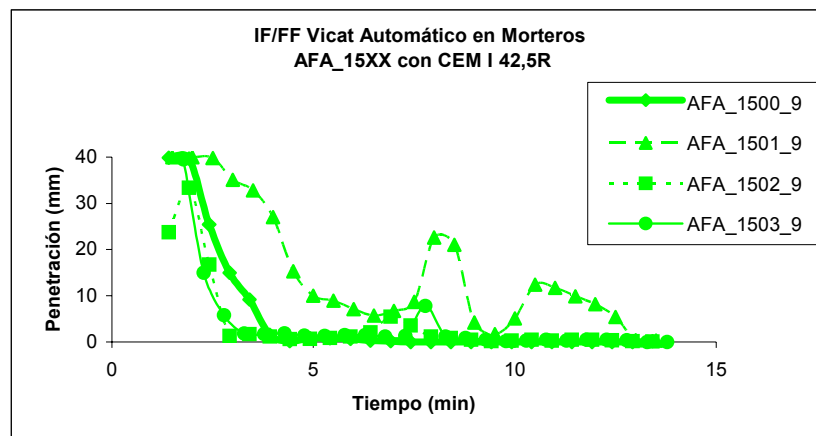


Figura 4.2: Valores correspondientes a los principios y finales de fraguado en morteros AFA\_15XX con CEM I 42,5R a través del Vicat Automático.

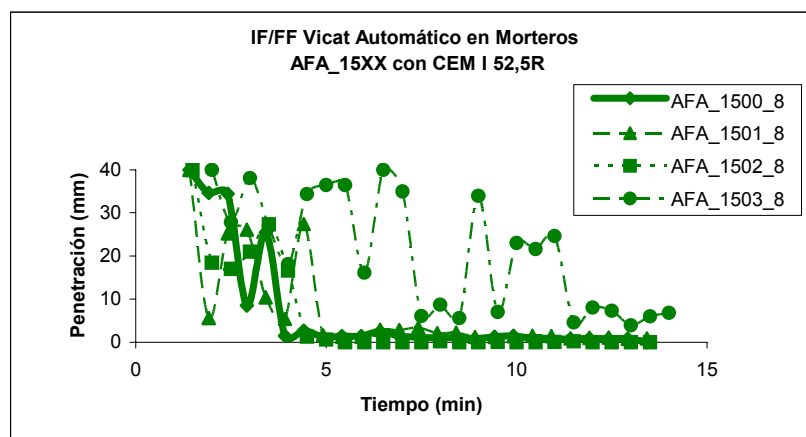


Figura 4.3: Valores correspondientes a los principios y finales de fraguado en morteros AFA\_15XX con CEM I 52,5R a través del Vicat Automático.

Como resumen en la tabla 4.6 se presentan los valores de inicio y final de fraguado para los morteros AFA\_15XX.

Morteros	CEM I 42,5				CEM I 52,5			
	AFA_1500	AFA_1501	AFA_1502	AFA_1503	AFA_1500	AFA_1501	AFA_1502	AFA_1503
Tiempo (min)								
I.F.	2' 25"	3'	1' 25"	2' 17"	1' 55"	1' 55"	2'	3' 30"
F.F.	4' 25"	13'	2' 55"	3' 17"	3' 55"	4' 55'	5'	13' 00"
Dosific.	a/c = 0,45 y SP = 1%							

Tabla 4.6: Tiempos de inicio y final de fraguado de los morteros AFA\_1500, AFA\_1501, AFA\_1502 y AFA\_1503 a través del Vicat Automático.

Tal y como se ha expuesto anteriormente respecto a los criterios adoptados para el inicio y final de fraguado en morteros y los valores considerados óptimos en este estudio, los resultados obtenidos en estos ensayos no permiten definir de una forma clara los tiempos de fraguado si se observan las fluctuaciones visualizadas en las figuras 4.2 y 4.3.

Sin embargo, en la tabla 4.6 es posible observar que de entre las mezclas fabricadas con la serie AFA 15XX y CEM I 42,5R las que presentan una duración de fraguado inferior son las mezclas AFA\_1502 y AFA\_1503, con valores situados entre 1 minuto e 25 segundos y 3 minutos y 17 segundos. Si los comparamos con los valores patrones de mezclas fabricadas con el CEM I 42,5 tendremos el acelerante AKF\_9 con 1 minuto y 50 segundos para el inicio y 5 minutos y 20 segundos para el final de fraguado.

Para las mezclas fabricadas con el CEM I 52,5R la duración de fraguado inferior se observa en las mezclas AFA\_1500 y AFA\_1501, con valores situados entre 1 minuto y 55 segundos y 4 minutos y 55 segundos para el inicio y final de fraguado, respectivamente.

#### 4.2.2.3. Acelerantes AFA16XX

Para los morteros con acelerantes AFA\_16XX los tiempos de inicios y finales de fraguado obtenidos con el ensayo del Vicat Automático se encuentran en la tabla 4.7. Se puede observar la Penetración (mm) versus Tiempo (min) de estas mezclas en las gráficas ilustradas en las figuras 4.4 y 4.5.

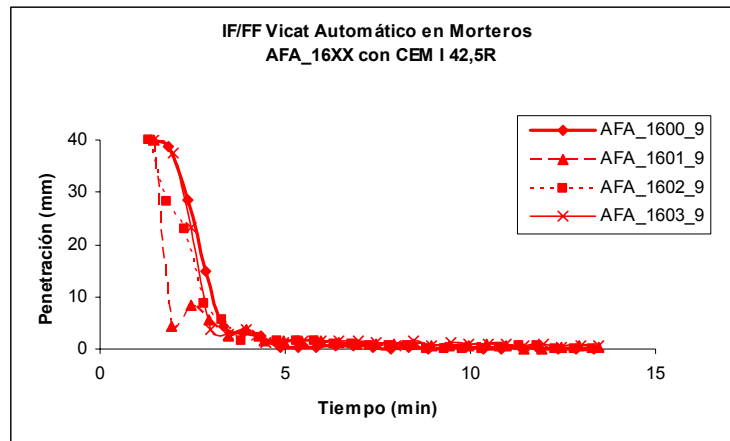


Figura 4.4: Valores correspondientes a los principios y finales de fraguado en morteros AFA\_16XX con CEM I 42,5R a través del Vicat Automático.

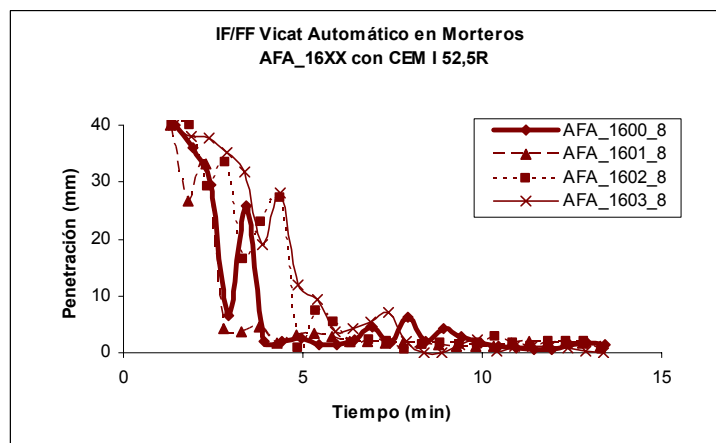


Figura 4.5: Valores correspondientes a los principios y finales de fraguado en morteros AFA\_16XX con CEM I 52,5R a través del Vicat Automático.

Tal como se ha expuesto en los anejos anteriores respecto a los criterios adoptados para el inicio y final de fraguado en morteros y los valores considerados óptimos en este estudio, los resultados obtenidos en estos ensayos no permiten definir de una forma clara los tiempos de fraguado si se observan las fluctuaciones visualizadas en las figuras 4.4 y 4.5.

Sin embargo, en la tabla 4.7 es posible observar que las mezclas fabricadas con la serie AFA 16XX y CEM I 42,5R presentan una duración de fraguado inferior, con valores situados entre 1 minuto 48 segundos y 4 minutos y 48 segundos, frente a los resultados obtenidos con el CEM I 52,5R que presentaron valores entre 1 minuto 48 segundos y 9 minutos y 56 segundos.

Si las comparamos con los valores patrones de mezclas fabricadas con el CEM I 42,5 tendremos el acelerante AKF\_9 con 1 minuto y 50 segundos para el inicio y 5 minutos y 20 segundos para el final de fraguado. A continuación tendremos el AKF\_8 con CEM I 52,5R y valores de 2 minutos y 7 segundos y 4

minutos y 7 segundos, respectivamente. Esto pone de manifiesto que los valores presentados por las mezclas fabricadas con la serie de acelerantes AFA\_16XX con CEM I 52,5R son mayores que los valores patrones AKF.

Como resumen en la tabla 4.7 se presentan los valores de inicio y final de fraguado para los morteros AFA\_16XX.

Morteros	CEM I 42,5				CEM I 52,5			
Tiempo (min)	AFA_1600	AFA_1601	AFA_1602	AFA_1603	AFA_1600	AFA_1601	AFA_1602	AFA_1603
I.F.	2' 21"	1' 57"	1' 48"	2' 28"	1' 56"	1' 48"	2' 21"	2' 53"
F.F.	4' 51"	4' 27"	4' 48"	4' 28"	9' 56"	7' 18"	6' 21"	8' 23"
Dosific.	a/c = 0,45 y SP = 1%							

Tabla 4.7: Tiempos de inicio y final de fraguado de los morteros AFA\_1600, AFA\_1601, AFA\_1602 y AFA\_1603 a través del Vicat Automático.

#### 4.2.2.4. Acelerantes AFA30XX

En la tabla 4.8 se indican los tiempos de inicios y finales de fraguado obtenidos con el ensayo del Vicat Automático para los morteros con acelerantes AFA\_30XX. Se puede observar la Penetración (mm) versus Tiempo (min) de estas mezclas en las gráficas ilustradas en las figuras 4.6 y 4.7.

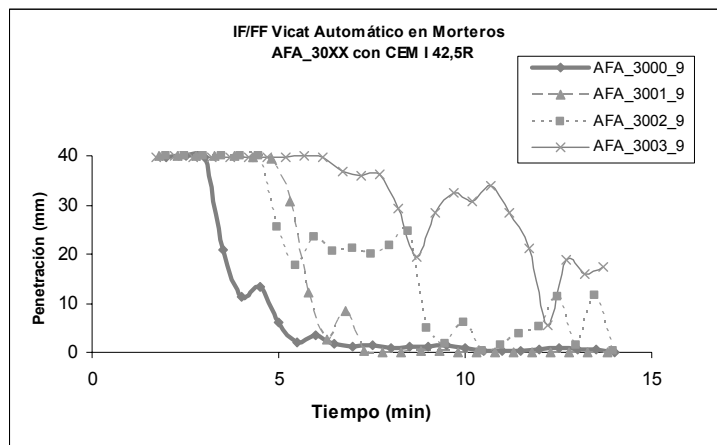


Figura 4.6: Valores correspondientes a los principios y finales de fraguado en morteros AFA\_30XX con CEM I 42,5R a través del Vicat Automático.



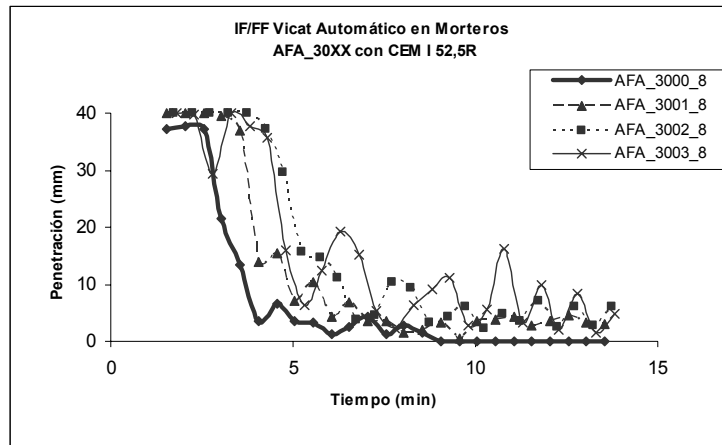


Figura 4.7: Valores correspondientes a los principios y finales de fraguado en morteros AFA\_30XX con CEM I 52,5R a través del Vicat Automático.

La serie de acelerantes AFA\_30XX ha reproducido el mismo comportamiento de fluctuaciones ya presentado en las demás series analizadas en este estudio. Esto se puede visualizar en las figuras 4.6 y 4.7. Tal como se ha expuesto en los anejos anteriores, respecto a los criterios adoptados para el inicio y final de fraguado en morteros y los valores considerados óptimos en este estudio, los resultados obtenidos en estos ensayos no permiten definir de una forma clara los tiempos de fraguado.

A partir de la tabla 4.8 es posible observar que las mezclas fabricadas con la serie AFA 30XX han presentado una duración de fraguado superior, en ambos tipos de cemento, a todas las series de acelerantes ya presentadas en los anejos anteriores. Estos tiempos se sitúan entre 3 minutos y 30 segundos y 12 minutos y 20 segundos para CEM I 42,5R. Igualmente para los resultados con CEM I 52,5R se ha puesto de manifiesto una duración de fraguado bastante superior a los resultados ya expuestos con las demás series estudiadas. Estos valores se sitúan entre 3 minutos y 3 segundos y 13 minutos y 18 segundos, para el inicio y final de fraguado, respectivamente.

Como resumen en la tabla 4.8 se presentan los valores de inicio y final de fraguado para los morteros AFA\_30XX.

Morteros	CEM I 42,5				CEM I 52,5			
	AFA_3000	AFA_3001	AFA_3002	AFA_3003	AFA_3000	AFA_3001	AFA_3002	AFA_3003
I.F.	3' 30"	5' 18"	4' 58"	7' 20"	3' 03"	4' 03"	4' 44"	2' 48"
F.F.	5' 30"	7' 18"	10' 28"	12' 20"	6' 03"	8' 03"	10' 14"	13' 18"
Dosific.	a/c = 0,45 y SP = 1%							

Tabla 4.8: Tiempos de inicio y final de fraguado de los morteros AFA\_3000, AFA\_3001, AFA\_3002 y AFA\_3003 a través del Vicat Automático.

### 4.2.3. Resultado y análisis de resultados relativos a la evolución térmica en pastas

#### 4.2.3.1. Acelerantes Patrones

En las figuras 4.8 y 4.9 se ilustra la evolución de la temperatura en las pastas con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente, durante un periodo de 2 horas, con registros a cada quince segundos. Así mismo en la tabla 4.9 se presentan los valores de la temperatura máxima (temperatura pico), el tiempo para el que se alcanza esta temperatura y su intervalo de permanencia en el pico.

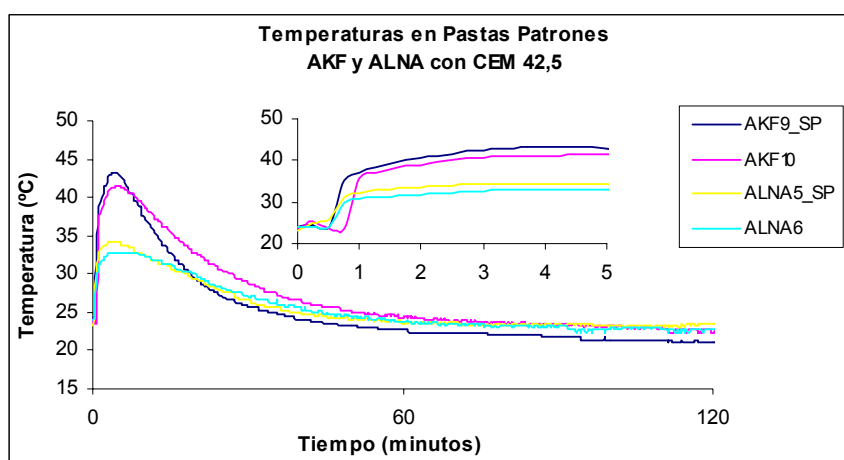


Figura 4.8: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 42,5R a través del Squirrel

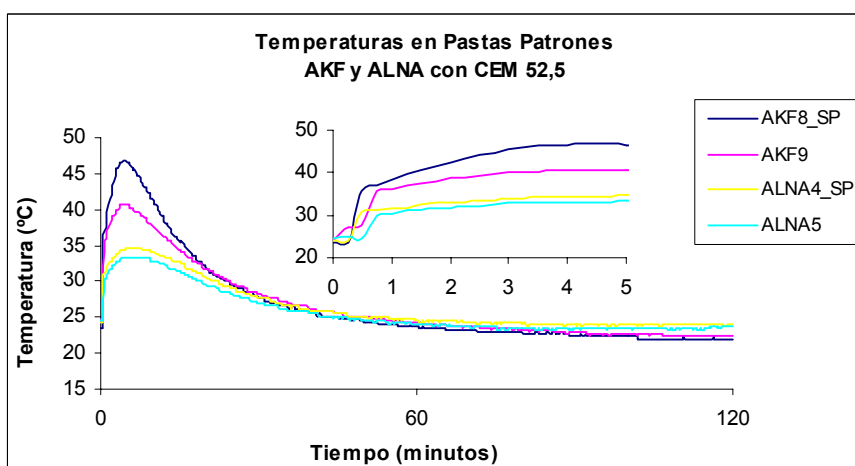


Figura 4.9: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 52,5R a través del Squirrel

La tabla 4.9 presenta los valores de la temperatura máxima ( $T_{\text{máx}}$ ) para pastas con los acelerantes AKF y ALNA, el tiempo para el que se alcanza esta temperatura ( $t_i$ ), el tiempo a partir del cual disminuye la temperatura máxima alcanzada ( $t_f$ ) y su intervalo de permanencia en el pico ( $t_f - t_i$ ).

CEM I 42,5R				
Acelerante	$T_{\text{max}} (^{\circ}\text{C})$	$t_i$ (min)	$t_f$ (min)	$t_f - t_i$ (min)
AKF_9_SP	43,2	3,75	4,75	1
AKF_10	41,4	4,5	5	0,5
ALNA_5_SP	34,2	2,75	5,25	2,5
ALNA_6	32,8	3,25	8,75	5,5
CEM I 52,5R				
Acelerante	$T_{\text{max}} (^{\circ}\text{C})$	$t_i$ (min)	$t_f$ (min)	$t_f - t_i$ (min)
AKF8_SP	46,8	4,25	5,25	1
AKF_9	40,6	3,75	5,25	1,5
ALNA_4_SP	34,6	5	7,75	2,75
ALNA_5	33,4	5	7,5	2,5

Tabla 4.9: Temperaturas máximas y tiempos de permanencia en temperatura máxima en las pastas con acelerantes AKF y ALNA ensayadas

En la tabla 4.9 se puede observar que independientemente del tipo de cemento y de la presencia o no del superplastificante, los acelerantes AKF presentan temperaturas máximas superiores a los acelerantes ALNA. En este sentido para el cemento 42,5 R estas temperaturas máximas son 43,2 °C (AKF9\_SP); 41,4 °C (AKF\_10); 34,2 °C (ALNA\_5\_SP) y 32,8 °C (ALNA\_6) mientras que para el cemento 52,5 R, las temperaturas máximas son 46,8 °C (AKF\_8\_SP); 40,6 °C (AKF\_9); 34,6 °C (ALNA\_4\_SP) y 33,4 °C (ALNA\_5).

#### 4.2.3.2. Acelerantes AFA15XX

En las figuras de 4.10 hasta 4.13 se ilustra la evolución de la temperatura en las pastas AFA\_15XX con CEM I 42,5R y CEM 52,5R, respectivamente. Las lecturas se han realizado durante un periodo de 2 horas, con registros a cada quince segundos. Así mismo en la tabla 4.10 se presentan los valores de la temperatura máxima ( $T_{\text{máx}}$ ), el tiempo para el que se alcanza esta temperatura ( $t_i$ ), el tiempo a partir del cual disminuye la temperatura máxima alcanzada ( $t_f$ ) y su intervalo de permanencia en el pico ( $t_f - t_i$ ).

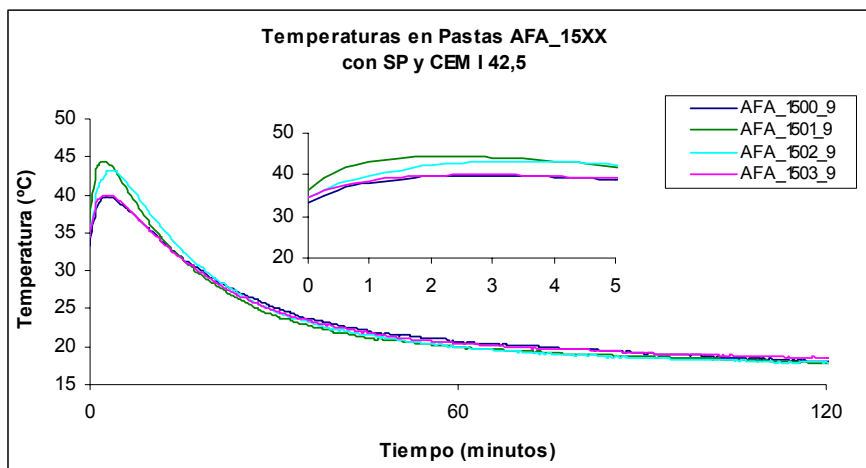


Figura 4.10: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_15XX con Superfluidificante y CEM I 42,5R a través del Squirrel

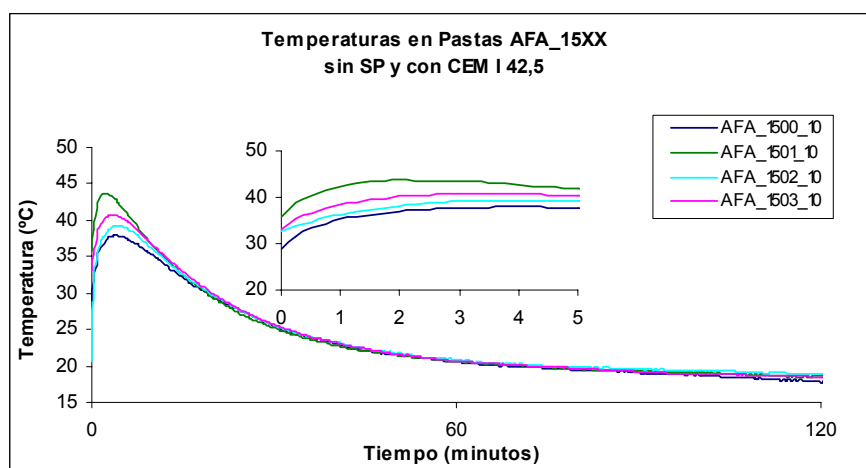


Figura 4.11: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_15XX sin Superfluidificante y CEM I 42,5R a través del Squirrel

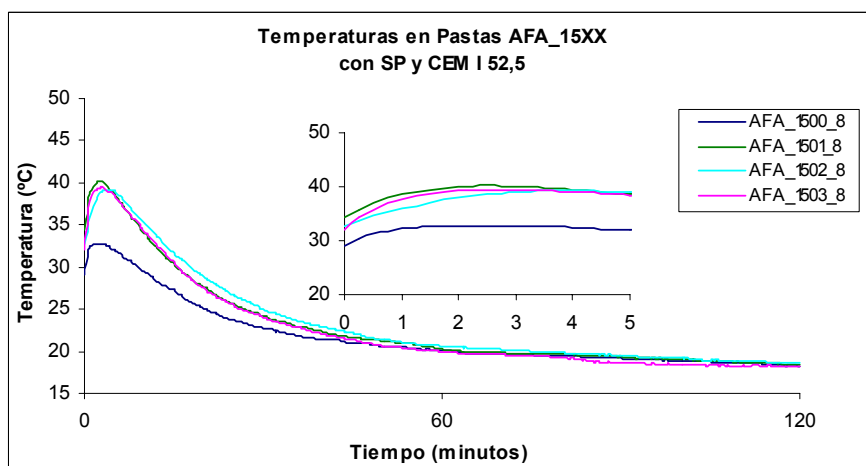


Figura 4.12: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_15XX con SP y CEM I 52,5R a través del Squirrel

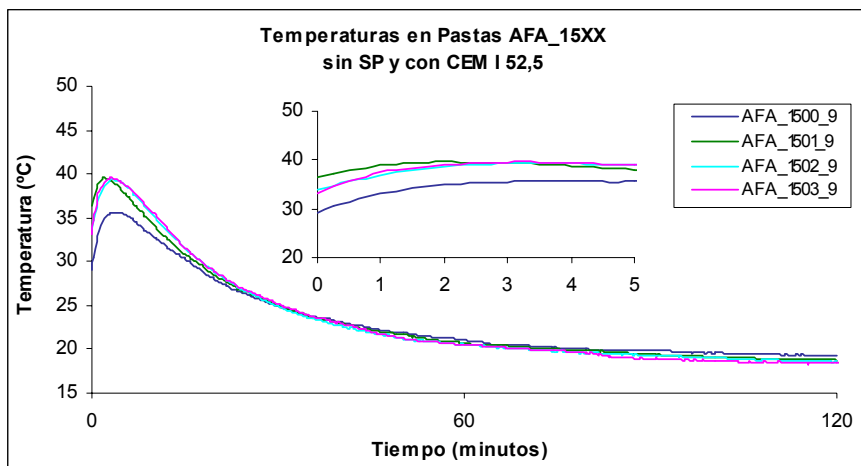


Figura 4.13: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_15XX sin SP y con CEM I 52,5R a través del Squirrel

Observando las graficas expuestas en las figuras 4.10 hasta 4.13 se pone de manifiesto el mismo comportamiento mostrado por las pastas patrones (Anejo 2, A2.2.3), en donde tras el pico término, la temperatura evoluciona hacia el equilibrio con la temperatura ambiente.

Respecto al CEM I 42,5R, las mezclas que han presentado mayor temperatura han sido las AFA\_1501 y AFA\_1502, independientemente de la incorporación del superplastificante. Así, para el AFA\_1501 la temperatura máxima obtenida ha sido de 44,4 °C mientras que para el AFA\_1502 la temperatura máxima ha sido de 43,3 °C.

Respecto al CEM I 52,5R, a la excepción de las mezclas AFA\_1500, las demás mezclas presentan temperaturas máximas situadas alrededor de los 40 °C, independientemente de la incorporación del superplastificante.

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura se sitúa en un intervalo de tiempo comprendido entre 2,25 y 3,5 minutos para CEM I 42,5, y 2 y 3,5 minutos para CEM I 52,5.

En la tabla 4.10 se puede observar las temperaturas máximas presentadas por las pastas AFA\_15XX así como el tiempo de permanencia en las mismas.

CEM I 42,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA_1500_9_SP	39,7	2,75	3,5	0,75
AFA_1500_10	37,9	4	4,75	0,75
AFA_1501_9_SP	44,4	2,25	2,75	0,5
AFA_1501_10	43,6	2	3	1

CEM I 42,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA_1502_9_SP	43,3	3,5	4	0,5
AFA_1502_10	39,3	4	4,5	0,5
AFA_1503_9	40	2,75	3,5	0,75
AFA_1503_10	40,7	3,25	4	0,75
CEM I 52,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA_1500_8_SP	32,8	2,25	3	0,75
AFA_1500_9	35,6	3,25	5	1,75
AFA_1501_8_SP	40	2	3,25	1,25
AFA_1501_9	39,5	1,75	2,25	0,5
AFA_1502_8_SP	39,2	3,5	4,25	0,75
AFA_1502_9	39,4	3,5	3,75	0,25
AFA_1503_8_SP	39,4	2,25	3	0,75
AFA_1503_9	39,5	3	4	1

Tabla 4.10: Temperaturas máximas y tiempos de permanencia en temperatura máxima en las pastas AFA\_15XX

#### 4.2.3.3. Acelerantes AFA16XX

En las figuras de 4.14 hasta 4.17 se ilustra la evolución de la temperatura en las pastas AFA\_16XX con CEM I 42,5R y CEM 52,5R, respectivamente. Las lecturas se han realizado durante un periodo de 2 horas, con registros a cada quince segundos. Así mismo en la tabla 4.11 se presentan los valores de la temperatura máxima (T<sub>máx</sub>) para pastas patrones AKF y ALNA, el tiempo para el que se alcanza esta temperatura (t<sub>i</sub>), el tiempo a partir del cual disminuye la temperatura máxima alcanzada (t<sub>f</sub>) y su intervalo de permanencia en el pico (t<sub>f</sub>-t<sub>i</sub>).

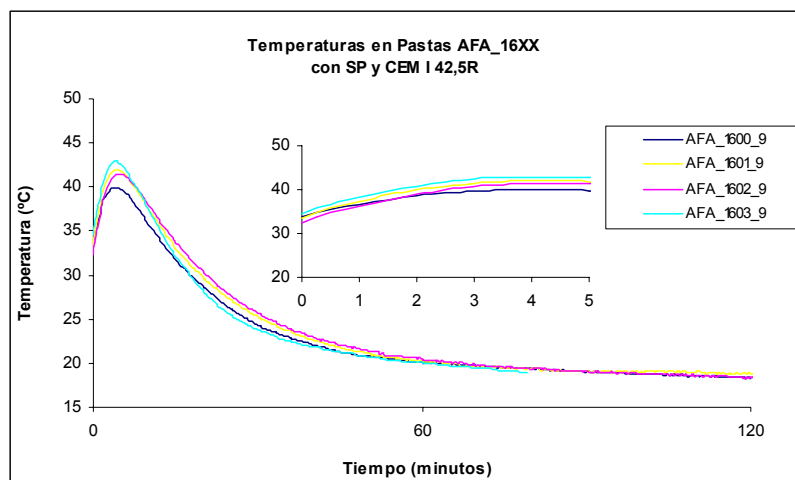


Figura 4.14: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_16XX con Superfluidificante y CEM I 42,5R a través del Squirrel

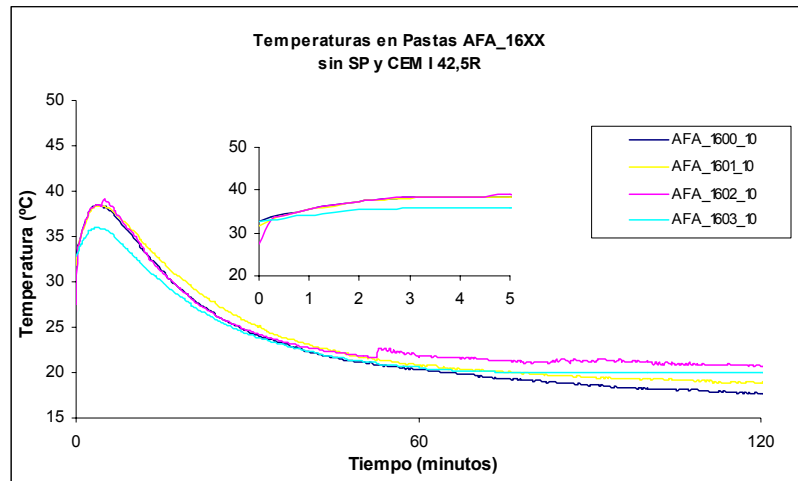


Figura 4.15: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_16XX sin Superfluidificante y CEM I 42,5R a través del Squirrel

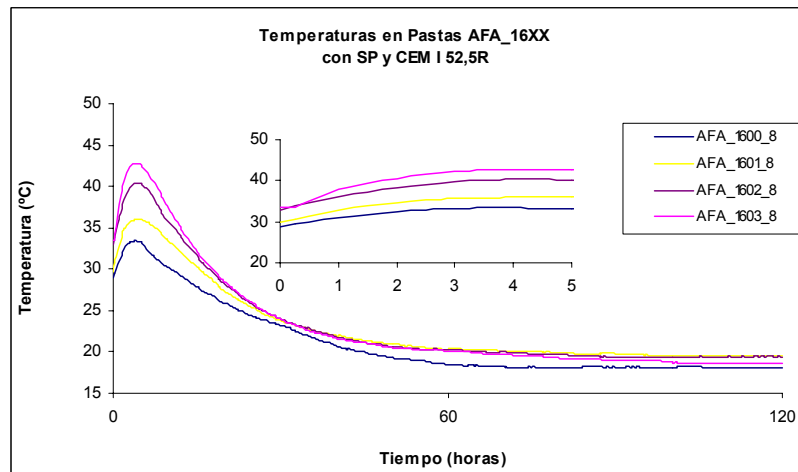


Figura 4.16: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_16XX con SP y CEM I 52,5R a través del Squirrel

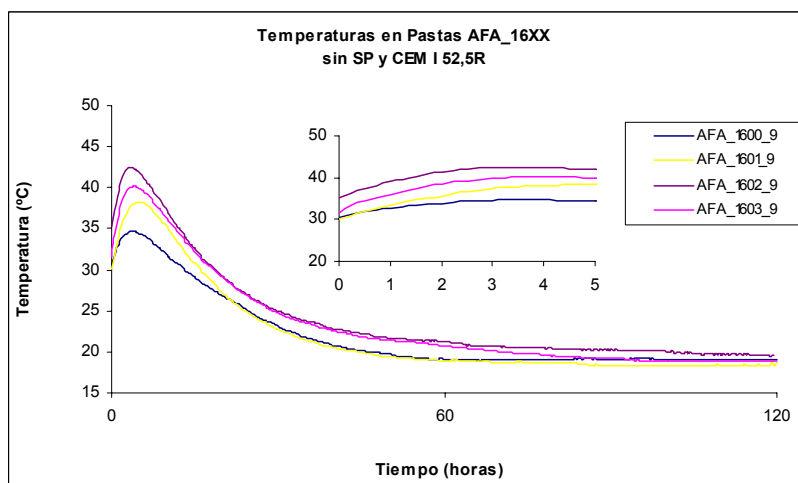


Figura 4.17: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_16XX sin SP y con CEM I 52,5R a través del Squirrel

Análogamente a la serie AFA\_15XX y a los acelerantes patrones AKF y ALNA, la serie AFA\_16XX ha presentado un comportamiento semejante a éstas, tal como se visualiza en las graficas expuestas en las figuras 4.14 hasta 4.17: tras el pico térmico, la temperatura evoluciona hacia el equilibrio con la temperatura ambiente.

Respecto al CEM I 42,5R, independientemente de la incorporación del superplastificante, las mezclas han presentado una temperatura máxima alrededor de los 40 °C habiendo sido la mezcla AFA\_1603 la que presentó mayor valor de temperatura con 42,9 °C.

Respecto al CEM I 52,5R, según la tabla 4.11, las mezclas que han mostrado mayor valor de temperatura frente a las demás han sido las AFA\_1602 y AFA\_1603. Independientemente a la incorporación del superplastificante, estas mezclas alcanzaron valores máximos entre 40,1 °C y 42,8 °C, esta última temperatura ha sido presentada por la mezcla AFA\_1603.

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura se sitúa en un intervalo de tiempo de 0,75 minutos para ambos cementos utilizados.

En la tabla 4.11 se puede observar las temperaturas máximas presentadas por las pastas AFA\_16XX así como el tiempo de permanencia en las mismas.

CEM I 42,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA 1600_9_SP	39,9	4,25	5	0,75
AFA 1600_10	38,5	4,25	4,5	0,25
AFA 1601_9_SP	42	4,25	7,25	3
AFA 1601_10	38,4	4,25	5,25	1
AFA 1602_9_SP	41,5	4,5	5,25	0,75
AFA 1602_10	39	5	5,25	0,25
AFA 1603_9_SP	42,9	4	4,75	0,75
AFA 1603_10	36	3,75	4,25	0,5
CEM I 52,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA 1600_8_SP	33,5	4	4,25	0,25
AFA 1600_9	34,7	3,25	4	0,75
AFA 1601_8_SP	36,1	4,5	5	0,5
AFA 1601_9	38,3	4,5	5	0,5
AFA 1602_8_SP	40,4	4	4,5	0,5
AFA 1602_9	42,5	3,75	4	0,25
AFA 1603_8_SP	42,8	3,75	4,5	0,75
AFA 1603_9	40,1	3,75	4,75	1

Tabla 4.11: Temperaturas máximas y tiempos de permanencia en temperatura máxima en las pastas AFA\_16XX



#### 4.2.3.4. Acelerantes AFA30XX

En las figuras de 4.18 hasta 4.21 se ilustra la evolución de la temperatura en las pastas AFA\_30XX con CEM I 42,5R y CEM 52,5R, respectivamente. Las lecturas se han realizado durante un periodo de 2 horas, con registros a cada quince segundos. Así mismo en la tabla 18 se presentan los valores de la temperatura máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) para pastas patrones AKF y ALNA, el tiempo para el que se alcanza esta temperatura ( $t_i$ ), el tiempo a partir del cual disminuye la temperatura máxima alcanzada ( $t_f$ ) y su intervalo de permanencia en el pico ( $t_f-t_i$ ).

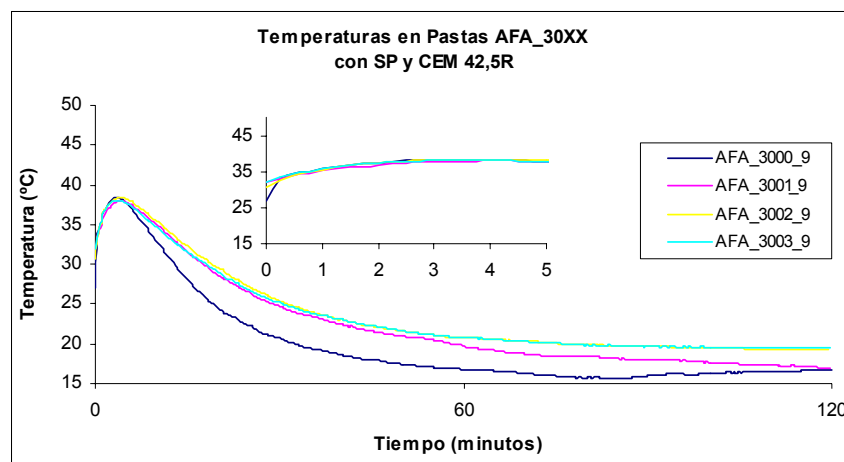


Figura 4.18: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_30XX con Superfluidificante y CEM I 42,5R a través del Squirrel

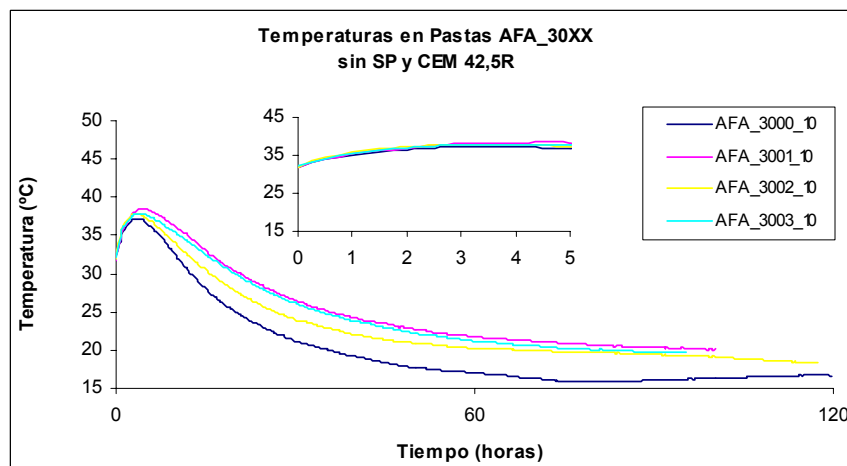


Figura 4.19: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_30XX sin Superfluidificante y CEM I 42,5R a través del Squirrel

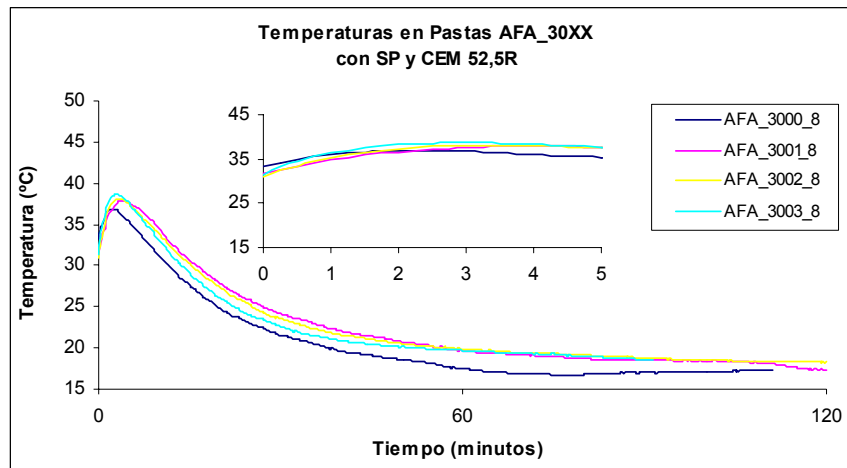


Figura 4.20: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_30XX con SP y CEM I 52,5R a través del Squirrel

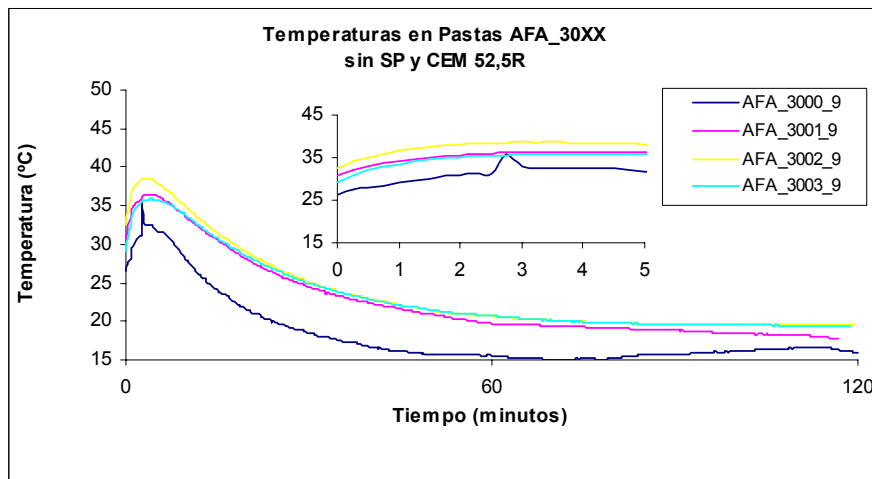


Figura 4.21: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en pastas AFA\_30XX sin SP y con CEM I 52,5R a través del Squirrel

Respecto a las series expuestas en los anejos anteriores juntamente con las series patrones AKF y ALNA, es posible observar que la serie AFA\_30XX ha presentado valores de temperaturas máximas ligeramente inferiores, con valores cerca de 38°C para mezclas con ambos cementos e independientemente de incorporación del superplastificante, a excepción de las mezclas AFA\_3000 y AFA\_3001 con CEM I 52,5R cuyos valores de temperatura máxima han sido inferiores a 38 °C, situándose entre 36,4 °C y 37,8°C.

Igualmente a los demás acelerantes estudiados en esta campaña experimental, la serie AFA\_30XX presentó el mismo comportamiento que se puede observar en las graficas expuestas en las figuras 4.18 hasta 4.21: tras el pico término, la temperatura evoluciona hacia el equilibrio con la temperatura ambiente.

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura se sitúa en un intervalo de tiempo de prácticamente 3,5 minutos para ambos cementos utilizados.

En la tabla 4.12 se puede observar las temperaturas máximas presentadas por las pastas AFA\_16XX así como el tiempo de permanencia en las mismas.

CEM I 42,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA 3000_9_SP	38,4	3,75	4,25	0,5
AFA 3000_10	37,2	3,5	4,25	0,75
AFA 3001_9_SP	38	4,5	4,75	0,25
AFA 3001_10	38,5	5	5,25	0,25
AFA 3002_9_SP	38,3	4	5,25	1,25
AFA 3002_10	37,7	3,5	4,5	1
AFA 3003_9_SP	38	3,5	4,75	1,25
AFA 3003_10	37,8	4,25	4,75	0,5
CEM I 52,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA 3000_8_SP	36,9	2,5	3	0,5
AFA 3000_9	35,8	3	3,25	0,25
AFA 3001_8_SP	37,8	4	5	1
AFA 3001_9	36,4	4	5	1
AFA 3002_8_SP	38,1	3,5	4	0,5
AFA 3002_9	38,6	3,5	4	0,5
AFA 3003_8_SP	38,6	3,25	3,75	0,5
AFA 3003_9	36	5	5,25	0,25

Tabla 4.12: Temperaturas máximas y tiempos de permanencia en temperatura máxima en las pastas AFA\_30XX

#### 4.2.4. Resultado y análisis de resultados relativos a la evolución térmica en morteros

##### 4.2.4.1. Acelerantes Patrones

La evolución de la temperatura en los morteros con acelerantes AKF y ALNA, con CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, se ilustra en la figura 4.22. Los registros se han tomado a cada cinco minutos durante un periodo de 12 horas. Así mismo en la tabla 4.13 se presentan los valores de la temperatura máxima (temperatura pico), el tiempo para el que se alcanza esta temperatura y su intervalo de permanencia en el pico.

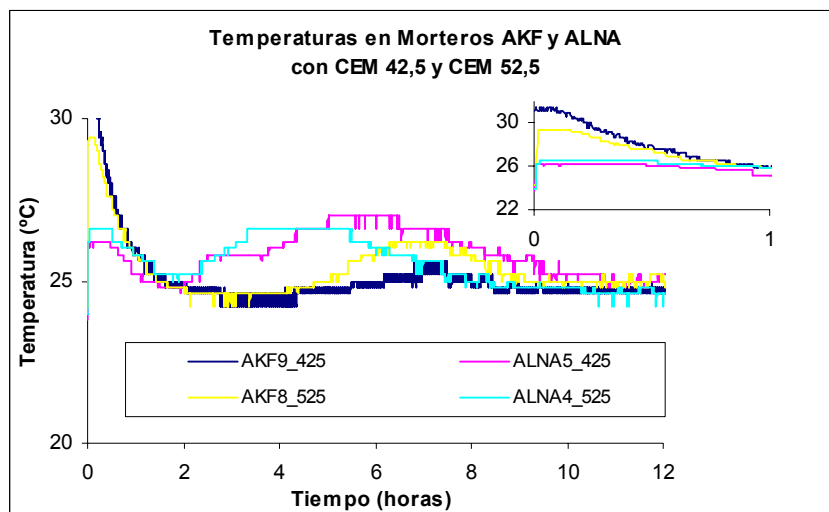


Figura 4.4: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en morteros con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 42,5R y 52,5R a través del Squirrel

Observando la gráfica ilustrada en la figura 4.22 se constata que independientemente del tipo de cemento, los acelerantes AKF presentan temperaturas máximas superiores a los acelerantes ALNA. En este sentido, si bien esta tendencia ya se ha puesto de manifiesto a nivel de pasta, los valores de la máxima temperatura en el mortero son inferiores a los registrados en las pastas.

La tabla 4.13 presenta los valores de la temperatura máxima (temperatura pico) para morteros con acelerantes AKF y ALNA, el tiempo para el que se alcanza esta temperatura y su intervalo de permanencia en el pico.

CEM I 42,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AKF_9	31,4	0,5	6,5	6
ALNA_5	26,2	0,75	28,75	28
CEM I 52,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AKF_8	29,4	1,5	9,5	8
ALNA_4	26,6	2	31,75	29,75

Tabla 4.13: Temperaturas máximas y tiempos de permanencia en temperatura máxima en los morteros con acelerantes AKF y ALNA

En la tabla 4.13 se observa que para un mismo tipo de acelerante (sea AKF, sea ALNA), la influencia del tipo de cemento se ha mostrado poco significativa respecto a los valores de la temperatura máxima. Así, para el ALNA las temperaturas máximas obtenidas son: 26,2 °C (CEM I 42,5 R) y 26,6

°C (CEM I 52,5 R); mientras que para el AKF éstas son; 31,4 °C (CEM I 42,5 R) y 29,4 °C (CEM I 52,5 R).

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura se sitúa en un intervalo de tiempo comprendido entre 0,25 y 1,5 minutos. Por otra parte no se evidencia, en el conjunto de temperaturas máximas medidas, una relación lineal entre la temperatura máxima y el tiempo transcurrido en alcanzarla (análogamente a lo observado en las pastas).

La evolución de la temperatura en todos los morteros estudiados, ha puesto de manifiesto una caída brusca de la temperatura tras el pico térmico inicial y una posterior recuperación de temperatura hasta un segundo pico (de valor inferior al máximo) a partir del cual se busca el equilibrio con la temperatura ambiente. Este comportamiento es significativamente distinto del mostrado por las pastas, en donde tras el pico término, la temperatura evoluciona hacia el equilibrio con la temperatura ambiente.

#### 4.2.4.2. Acelerantes AFA15XX

La evolución de la temperatura en los morteros AFA\_15XX con CEM I 42,5R y CEM 52,5R se ilustra en las figuras 4.23 y 4.24, respectivamente. Los registros se han tomado a cada cinco minutos durante un periodo de 12 horas. Así mismo en la tabla 4.14 se presentan los valores de la temperatura máxima ( $T_{\text{máx}}$ ) para pastas AFA 15XX, tiempo para el que se alcanza esta temperatura ( $t_i$ ), el tiempo a partir del cual disminuye la temperatura máxima alcanzada ( $t_f$ ) y su intervalo de permanencia en el pico ( $t_f - t_i$ ).

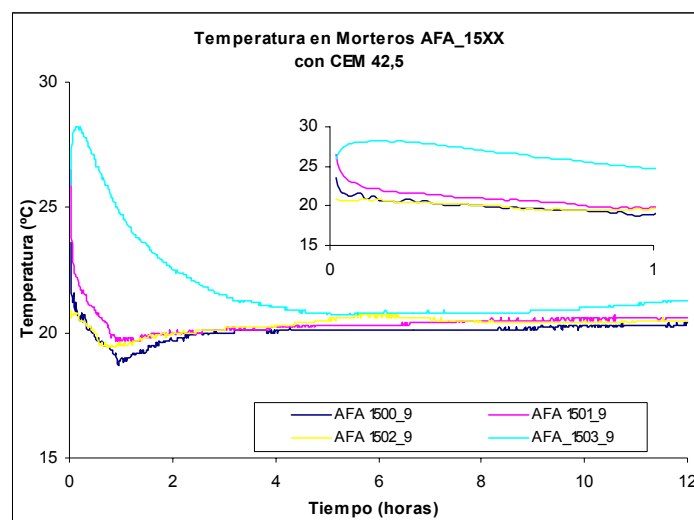


Figura 4.23: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en morteros AFA\_15XX con CEMR I 42,5 a través del Squirrel

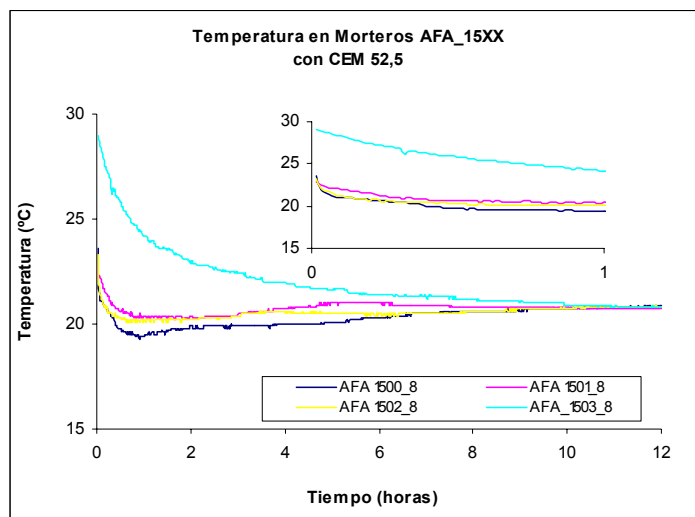


Figura 4.24: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en morteros AFA\_15XX con CEM I 52,5 a través del Squirrel

Las gráficas ilustradas en las figuras 4.23 y 4.24 muestran las evoluciones de temperaturas de los morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA 15XX con CEM I 42,5 y CEM I 52,5, respectivamente. En ambas las figuras se observa que la mezcla AFA\_1503 presenta una temperatura más elevada en las 6 primeras horas, tiempo a partir del cual, así como las demás mezclas, la temperatura evoluciona hacia el

equilibrio con la temperatura ambiente. También es posible observar que el tipo de cemento presenta poca influencia respecto a los valores máximos de temperatura obtenidos.

En la tabla 4.14 se puede observar las temperaturas máximas presentadas por los morteros AFA\_15XX así como el tiempo de permanencia en las mismas.

CEM I 42,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA_1500_9	23,6	0	1	1
AFA_1501_9	26,5	0	1	1
AFA_1502_9	8	6	9	3
AFA_1503_9	28,2	8	10	2
CEM I 52,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA_1500_8	23,6	0	1	1
AFA_1501_8	22,8	0	1	1
AFA_1502_8	23,3	0	1	1
AFA_1503_8	29	0	1	1

Tabla 4.14: Temperaturas máximas y tiempos de permanencia en temperatura máxima en los morteros AFA\_15XX con CEM 42,5R I y CEM 52,5R I

En la tabla 4.14 se observa que los morteros presentan valores de temperaturas máximas bastante inferiores a las pastas, pero igualmente se mantienen poco influenciados al tipo de cemento utilizado.

Así, para ambos los tipos de cemento, la mezcla que ha presentado la mayor temperatura máxima ha sido la AFA\_1503 con valores cerca de los 29 °C. La mezcla AFA\_1501 con CEM I 42,5 presentó 26,5 °C, y las demás mezclas presentaron valores de temperatura máxima situados entre 20,8 °C y 23,6 °C.

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, a excepción de las mezclas AFA\_1502 y AFA\_1503 con CEM I 42,5R, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura ha sido prácticamente instantáneo con la ejecución del ensayo.

#### 4.2.4.3. Acelerantes AFA16XX

La evolución de la temperatura en los morteros AFA\_16XX con CEM I 42,5R y CEM 52,5R se ilustra en las figuras 4.25 y 4.26, respectivamente. Los registros se han tomado a cada cinco minutos durante un periodo de 12 horas. Así mismo en la tabla 4.15 se presentan los valores de la temperatura máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) para pastas AFA 15XX, tiempo para el que se alcanza esta temperatura ( $t_i$ ), el tiempo a partir del cual disminuye la temperatura máxima alcanzada ( $t_f$ ) y su intervalo de permanencia en el pico ( $t_f-t_i$ ).

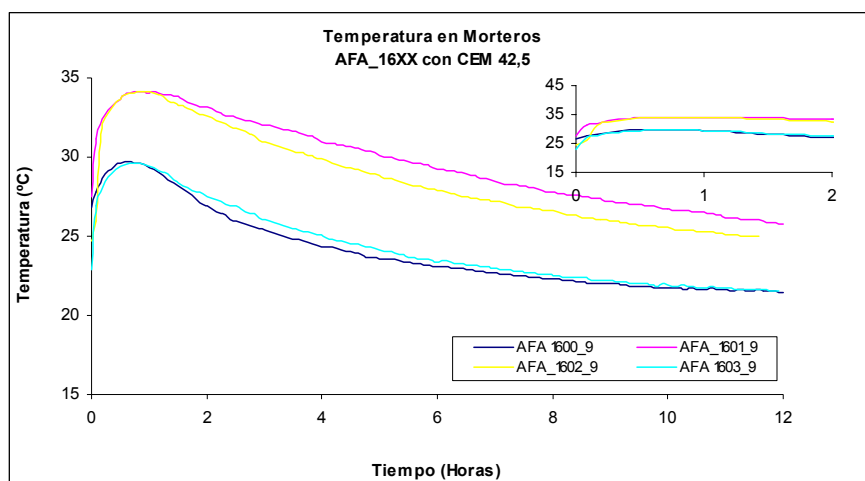


Figura 4.25: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en morteros AFA\_16XX a través del Squirrel

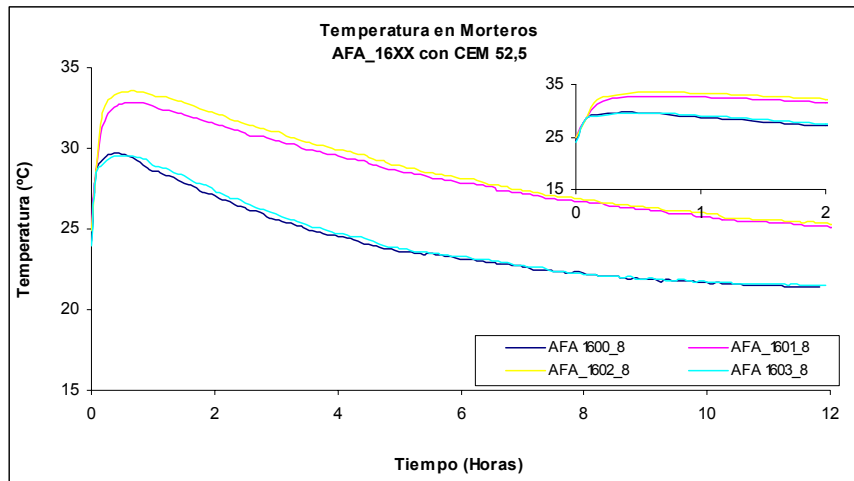


Figura 4.26: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en morteros AFA\_16XX a través del Squirrel

Las gráficas ilustradas en las figuras 4.25 y 4.26 exhiben las evoluciones de temperaturas de los morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA 16XX con CEM I 42,5 y CEM I 52,5, respectivamente.

En la tabla 4.15 se puede observar las temperaturas máximas presentadas por los morteros AFA\_16XX así como el tiempo de permanencia en las mismas.

CEM I 42,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA 1600_9 (*)	29,7	8	9	1
AFA 1601_9 (**)	34,1	9	12	3
AFA 1602_9 (**)	34,1	10	13	3
AFA 1603_9 (*)	29,7	7	9	2
CEM I 52,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA 1600_8 (*)	29,6	8	11	3
AFA 1601_8 (**)	32,8	7	11	4
AFA 1602_8 (**)	33,5	8	9	1
AFA 1603_8 (*)	29,5	6	10	4

Tabla 4.15: Temperaturas máximas y tiempos de permanencia en temperatura máxima en los morteros AFA\_16XX con CEM 42,5R I y CEM 52,5R I

En este sentido, los resultados presentados corresponden a ensayos realizados en distintas épocas del año, debido a que resultados anómalos en las primeras determinaciones, han conducido a repetir los ensayos con nuevas muestras. Las señaladas con (\*) corresponden al mes de abril (temperatura ambiente de 17 °C) y las indicadas por (\*\*) corresponden al mes de junio



(temperatura ambiente de 24 °C). Teniendo en cuenta el diferente origen en la temperatura inicial, estos resultados ponen de manifiesto que no existen diferencias significativas entre el comportamiento térmico de los aditivos de esta familia.

#### 4.2.4.4. Acelerantes AFA30XX

La evolución de la temperatura en los morteros AFA\_30XX con CEM I 42,5R y CEM 52,5R se ilustra en las figuras 4.27 y 4.28, respectivamente. Los registros se han tomado a cada cinco minutos durante un periodo de 12 horas. Así mismo en la tabla 4.16 se presentan los valores de la temperatura máxima ( $T_{\text{máx}}$ ) para pastas patrones AKF y ALNA, el tiempo para el que se alcanza esta temperatura ( $t_i$ ), el tiempo a partir del cual disminuye la temperatura máxima alcanzada ( $t_f$ ) y su intervalo de permanencia en el pico ( $t_f - t_i$ ).

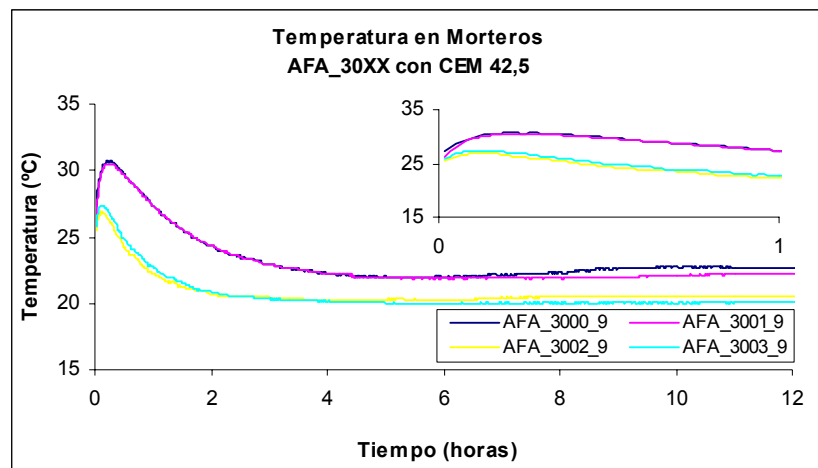


Figura 4.27: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en morteros AFA\_30XX a través del Squirrel

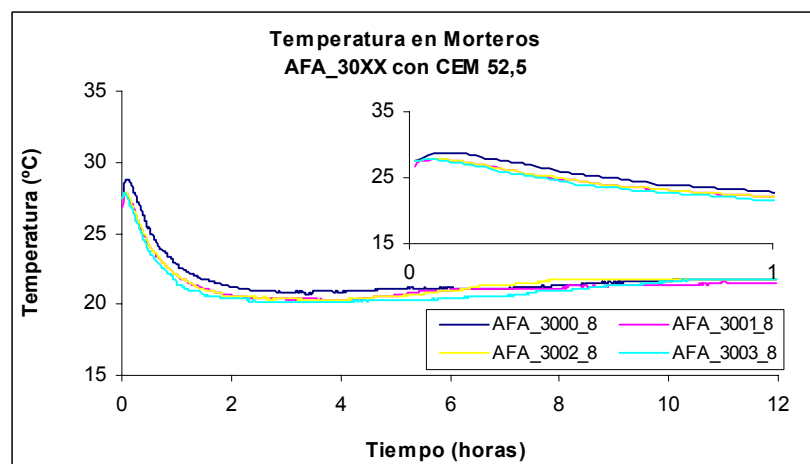


Figura 4.28: Valores correspondientes a la evolución de temperatura en morteros AFA\_30XX a través del Squirrel

En la grafica expuesta en la figura 4.27 se puede observar que las mezclas AFA\_3000 y AFA\_3001 fabricadas con CEM I 42,5R presentan temperaturas máximas superiores a las demás mezclas, con valores situados en 30,5 °C, con una evolución térmica muy similar.

Con CEM I 52,5R lo que se observa en la figura 4.28 es que no sólo las temperaturas máximas son inferiores frente al CEM I 42,5R sino que todas las mezclas presentan valores que se sitúan próximos a los 28 °C.

En ambas las figuras se observa que las mezclas se estabilizan en su evolución de temperaturas a partir de las 4 horas.

En la tabla 4.16 se presentan los valores de la temperatura máxima (temperatura pico), el tiempo para el que se alcanza esta temperatura y su intervalo de permanencia en el pico. En este sentido, el tiempo de registro de las temperaturas ha sido de doce horas y el intervalo de lectura ha sido a cada un minuto.

CEM I 42,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA 3000_9	30,7	12	17	5
AFA 3001_9	30,5	11	15	4
AFA 3002_9	26,9	8	9	1
AFA 3003_9	27,4	6	7	1
CEM I 52,5R				
Acelerante	Tmax (°C)	ti (min)	tf (min)	tf - ti (min)
AFA 3000_8	28,8	5	9	4
AFA 3001_8	27,8	4	6	2
AFA 3002_8	27,9	4	6	2
AFA 3003_8	27,8	3	4	1

Tabla 4.16: Temperaturas máximas y tiempos de permanencia en temperatura máxima en los morteros AFA\_30XX con CEM 42,5R I y CEM 52,5R I

Así, para ambos tipos de cemento, la mezcla que presentó el valor más elevado de temperatura ha sido la AFA\_3000 con valores de 30,7 °C para el CEM I 42,5R y de 28,8 °C para el CEM I 52,5R. A continuación la mezcla AFA\_3001 con CEM I 42,5R presentó 30,5 °C, y las demás mezclas presentaron valores de temperatura máxima situados entre 26,9 °C y 27,9 °C para ambos tipos de cemento.

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura ha sido próximo a los 10 minutos con el CEM I

42,5R y próximo a los 5 minutos con el CEM I 52,5R, con duración variable como se puede observar en la columna  $t_f-t_i$  de la tabla 4.16.

#### 4.2.5. RESULTADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS RELATIVOS A RESISTENCIAS A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN EN MORTEROS

##### 4.2.5.1. Acelerantes Patrones

En la tabla 4.17 se presentan los resultados relativos a las resistencias a la flexión en distintas edades de los morteros con acelerantes AKF y ALNA, con cementos CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente. Así mismo, en las figuras 4.29 y 4.30 se visualiza la evolución de estas resistencias.

Resistencia a flexotracción (MPa)				
Edad (días)	CEM I 42,5R		CEM I 52,5R	
	AKF_9	ALNA_5	AKF_8	ALNA_4
0,25	0,51	1,48	0,59	1,93
0,5	1,51	3,42	2,65	3,88
1	2,77	4,60	4,83	4,77
7	4,62	6,20	5,12	6,95
28	5,23	6,17	5,72	5,94
60	6,84	7,54	5,12	7,15
120	6,72	7,00	7,37	6,24

Tabla 4.17: Resistencias a la flexión en morteros CEM I 42,5R y 52,5R.

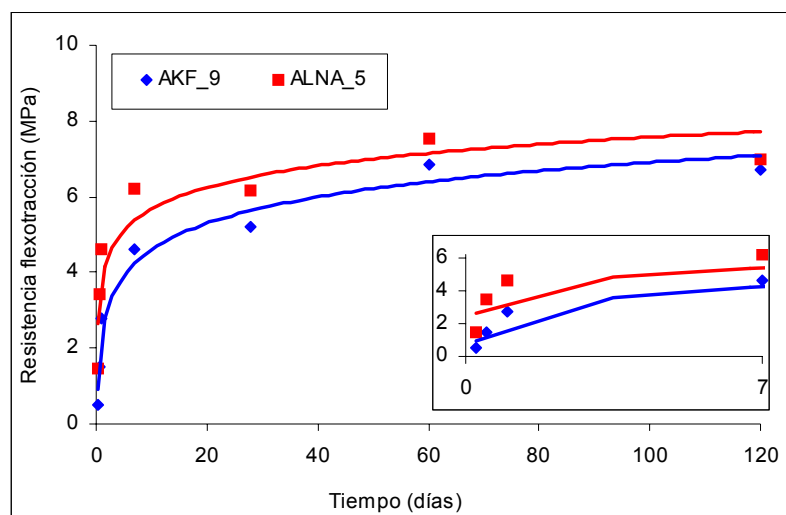


Figura 4.29: Resistencias a la flexión en morteros con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 42,5R

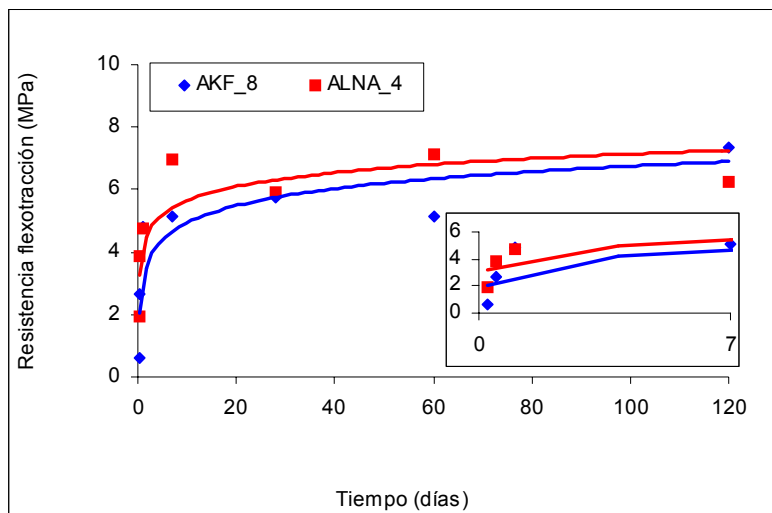


Figura 4.30: Resistencias a la flexión en morteros con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 52,5R

En la tabla 4.18 se dan los resultados relativos a las resistencias a compresión en distintas edades de los morteros con los acelerantes AKF y ALNA, con cementos CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente. Así mismo, en las figuras de 4.31 y 4.32 se visualiza la evolución de estas resistencias.

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)			
	CEM I 42,5R		CEM I 52,5R	
	AKF_9	ALNA_5	AKF_8	ALNA_4
0,25	1,80	5,76	2,37	9,61
0,5	6,13	10,96	11,46	19,51
1	10,52	18,72	27,56	25,74
7	35,18	29,19	37,37	33,93
28	40,02	34,41	48,56	39,07
60	50,40	36,95	53,42	41,52
120	43,65	42,59	46,05	50,78

Tabla 4.18: Resistencias a la compresión en morteros CEM I 42,5R y 52,5R.

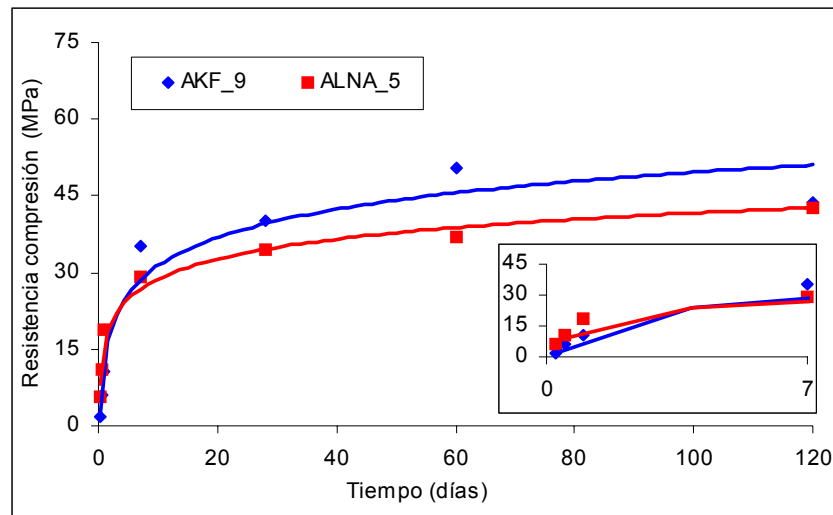


Figura 4.31: Resistencias a la compresión en morteros con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 42,5R

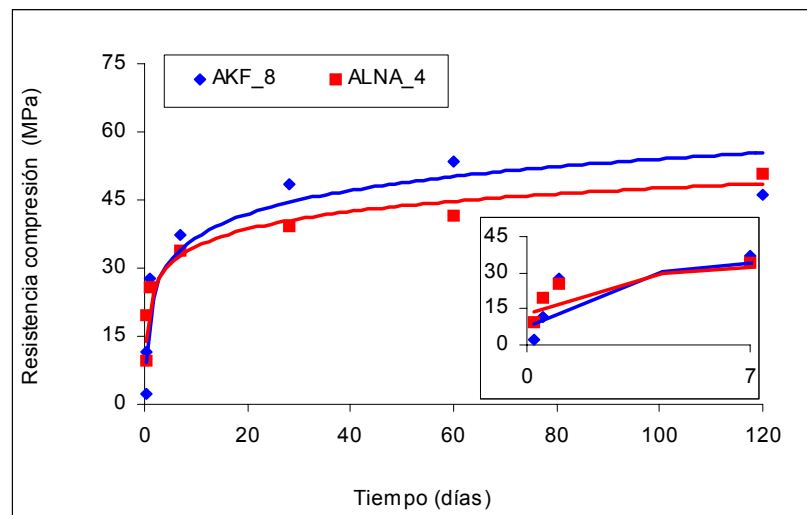


Figura 4.32: Resistencias a la compresión en morteros con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 52,5R

A tempranas edades el ALNA presenta mayores resistencias iniciales a compresión que el AKF. A largo plazo, entre 60 y 120 días, el AKF presenta una disminución de resistencia mientras que en el ALNA la resistencia sigue aumentando entre 60 y 120 días. Estas tendencias se ponen de manifiesto independientemente del tipo de cemento.

En relación a los valores de la resistencia a flexotracción cabe reseñar que son muy sensibles a la compactación de las probetas y a la dispersión homogénea del acelerante en las mismas. Así el valor presentado por la mezcla ALNA\_4 con CEM I 52,5R se ha observado una disminución de resistencia a flexotracción a los 28 días, el cual puede imputarse a una compactación no homogénea de la probeta dada la distribución del acelerante en la misma y su

efecto activo en el endurecimiento de la misma. Este efecto no tiene la misma significación en las resistencias a compresión, en donde la muestra es menos sensible a estos efectos.

#### 4.2.5.2. Acelerantes AFA15XX

En la tabla 4.19 se presentan los resultados relativos a las resistencias a la flexotracción en distintas edades de los morteros patrones AKF y ALNA y demás morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA\_15XX, con cementos CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente. Así mismo, en las figuras 4.33 y 4.34 se visualiza la evolución de estas resistencias.

Resistencia a flexotracción (MPa)						
CEM I 42,5R						
Tiempo (días)	AKF	ALNA	AFA 1500	AFA 1501	AFA 1502	AFA 1503
0,25	0,51	1,48	-	-	0,83	-
0,5	1,51	3,42	0,55	1,03	3,09	0,13
1	2,77	4,60	1,83	2,79	3,54	2,75
7	4,62	6,20	3,40	3,97	7,66	3,68
28	5,23	6,17	6,84	4,06	6,53	3,63
60	6,84	7,54	6,97	5,13	6,52	4,99
120	6,72	7,00	7,31	5,82	6,96	6,88
CEM I 52,5R						
Tiempo (días)	AKF	ALNA	AFA 1500	AFA 1501	AFA 1502	AFA 1503
0,25	0,59	1,93	0,98	-	0,80	0,66
0,5	2,65	3,88	3,31	4,14	2,41	0,91
1	4,83	4,77	3,87	4,55	4,99	3,53
7	5,12	6,95	5,55	7,37	7,03	5,80
28	5,72	5,94	5,89	7,09	6,41	6,14
60	5,12	7,15	6,74	6,63	6,65	7,91
120	7,37	6,24	7,09	4,38	7,63	9,26

Tabla 4.19: Resistencias a la flexotracción en morteros CEM I 42,5R y 52,5R.

Los resultados de resistencia a la flexotracción expuestos en la tabla 4.19, obtenidos en mezclas fabricadas con la serie de acelerantes AFA\_15XX con CEM I 42,5R han seguido una evolución similar con el comportamiento presentado por la mezcla patrón AKF, a la excepción del resultado presentado por el AFA\_1502 a los 28 días.

El valor máximo obtenido a los 120 días para ambos los tipos de cemento se sitúa cerca de los 7 MPa, a la excepción del AFA\_1501 con CEM I 52,5R que presentó un valor inferior igual a 5,48 MPa.

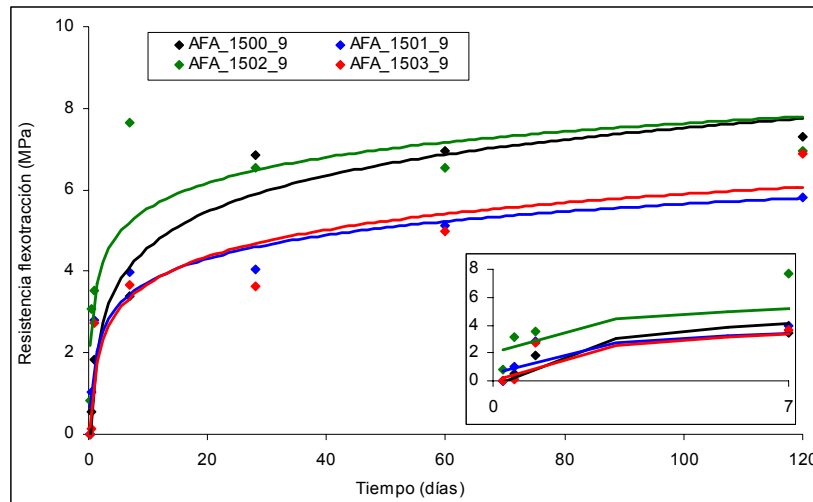


Figura 4.33: Resistencias a la flexión en morteros AFA\_15XX con CEM 42,5R

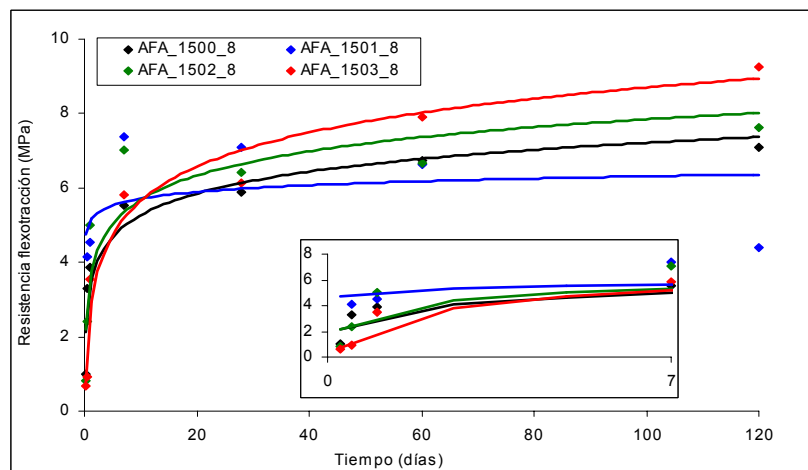


Figura 4.34: Resistencias a la flexión en morteros AFA\_15XX con CEM 52,5R

Las gráficas ilustradas en las figuras 4.33 y 4.34 evidencian la ganancia de resistencia anteriormente comentada así como la dispersión de los valores presentados en el caso del AFA\_1502 con CEM I 42,5R. Tal como se ha expuesto anteriormente, este hecho ha puesto de manifiesto la influencia de la compactación de las mezclas, estando esta directamente relacionada con el tipo de acelerante. Cuanto más reactivo el acelerante, más seca era la mezcla fabricada y peores eran su homogeneidad y su compactación.

En la tabla 4.20 se presentan los resultados relativos a las resistencias a la compresión en distintas edades de los morteros patrones AKF y ALNA y demás morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA\_15XX, con cementos CEM I

42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente. Así mismo, en las figuras 4.35 y 4.36 se visualiza la evolución de estas resistencias.

Resistencia a compresión (MPa)						
CEM I 42,5R						
Edad (días)	AKF	ALNA	AFA 1500	AFA 1501	AFA 1502	AFA 1503
0,25	1,80	5,76	-	-	2,50	
0,5	6,13	10,96	2,16	3,63	12,73	0,86
1	10,52	18,72	5,56	11,99	15,82	9,04
7	35,18	29,19	30,53	20,72	49,03	14,29
28	40,02	34,41	38,64	30,58	48,96	14,21
60	50,40	36,95	40,57	29,97	52,95	17,54
120	43,65	42,59	46,95	25,02	48,34	42,34
CEM I 52,5R						
Edad (días)	AKF	ALNA	AFA 1500	AFA 1501	AFA 1502	AFA 1503
0,25	2,37	9,61	8,24		2,99	6,87
0,5	11,46	19,51	14,42	18,81	8,58	3,79
1	27,56	25,74	21,99	25,44	27,75	13,65
7	37,37	33,93	40,18	43,76	46,46	39,37
28	48,56	39,07	50,59	49,78	42,12	50,28
60	53,42	41,52	34,25	40,39	47,28	57,52
120	46,05	50,78	49,69	30,92	53,80	61,76

Tabla 4.20: Resistencias a la compresión en morteros CEM I 42,5R y 52,5R.

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos en los morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA 15XX han seguido prácticamente la misma evolución observada en los morteros fabricados con las muestras patrones AKF con los dos tipos de cemento. A la excepción de la mezcla AFA\_1503 que presentó valores inferiores de resistencia con el CEM I 42,5R con un máximo de 14,73 MPa a los 28 días, frente al patrón AKF que presentó 37,91 MPa en esta misma edad. La mezcla AFA\_1500 presentó una evolución de resistencia más próxima a la presentada por el patrón AKF, independientemente del tipo de cemento. La mezcla AFA\_1502 con CEM I 42,5R ha presentado resistencias superiores al patrón AKF en todas las edades.

La resistencia máxima a los 120 días observada en la serie AFA\_15XX ha sido presentada por la mezcla AFA\_1501 con CEM I 52,5R con el valor de 57,83 MPa. Con este mismo cemento, las demás mezclas de esta serie han mantenido el valor de resistencia máxima a los 120 días próximo a los 50 MPa.



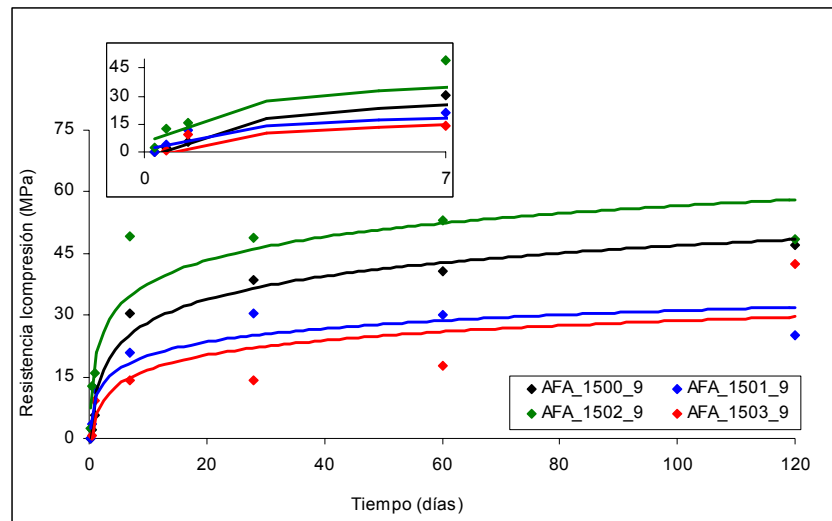


Figura 4.35: Resistencias a la compresión en morteros AFA\_15XX con CEM I 42,5R

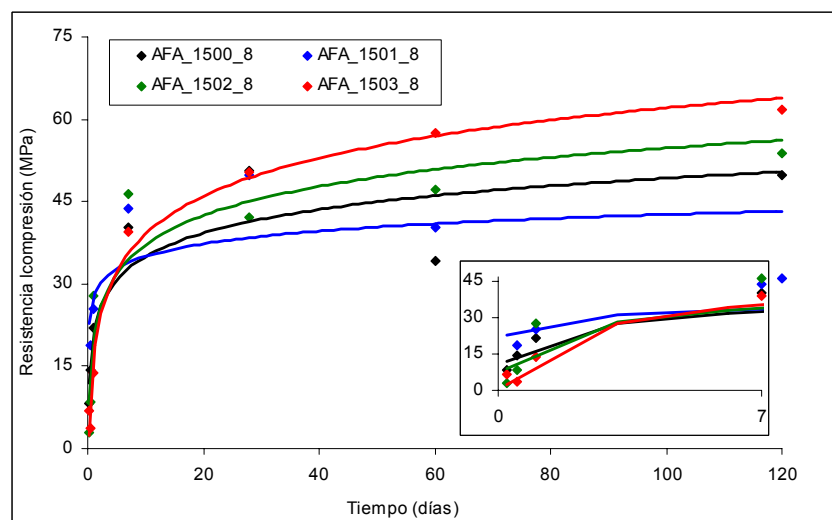


Figura 4.36: Resistencias a la compresión en morteros AFA\_15XX con CEM I 52,5R

#### 4.2.5.3. Acelerantes AFA16XX

En las tablas 4.21 y 4.22 se presentan los resultados relativos a las resistencias a la flexión en distintas edades de los morteros patrones AKF y ALNA y demás morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA\_16XX, con cementos CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente. Así mismo, en las figuras 4.37 y 4.38 se visualiza la evolución de estas resistencias.

Resistencia a flexotracción (MPa)						
CEM I 42,5R						
Tiempo (días)	AKF	ALNA	AFA 1600	AFA 1601	AFA 1602	AFA 1603
0,25	0,51	1,48	0,53	0,53	0,77	0,91
0,5	1,51	3,42	1,49	0,90	1,02	1,15
1	2,77	4,60	2,04	1,52	2,76	3,47
7	4,62	6,20	2,91	5,80	3,13	5,72
28	5,23	6,17	4,97	5,17	3,42	7,20
60	6,84	7,54	6,03	6,21	6,62	7,29
120	6,72	7,00	7,09	6,21	6,16	7,29
CEM I 52,5R						
Tiempo (días)	AKF	ALNA	AFA 1600	AFA 1601	AFA 1602	AFA 1603
0,25	0,59	1,93	0,99	0,63	1,19	1,34
0,5	2,65	3,88	3,13	3,09	3,37	4,13
1	4,83	4,77	4,47	3,84	3,45	4,92
7	5,12	6,95	5,43	5,20	4,81	6,30
28	5,72	5,94	6,05	6,41	5,45	7,12
60	5,12	7,15	6,63	7,49	7,69	7,85
120	7,37	6,24	6,59	8,23	5,48	7,22

Tabla 4.21: Resistencias a la flexión en morteros CEM I 42,5R y 52,5R.

Los resultados de resistencia a la flexotracción dados en la tabla 4.21, obtenidos en mezclas fabricadas con la serie de acelerantes AFA\_16XX para ambos tipos de cemento, han seguido una evolución similar al comportamiento presentado por la mezcla patrón AKF, con valores máximos próximos a 7 MPa a los 120 días.

Las gráficas visualizadas en las figuras 4.37 y 4.38 evidencian la ganancia de resistencia a la flexotracción anteriormente comentada.

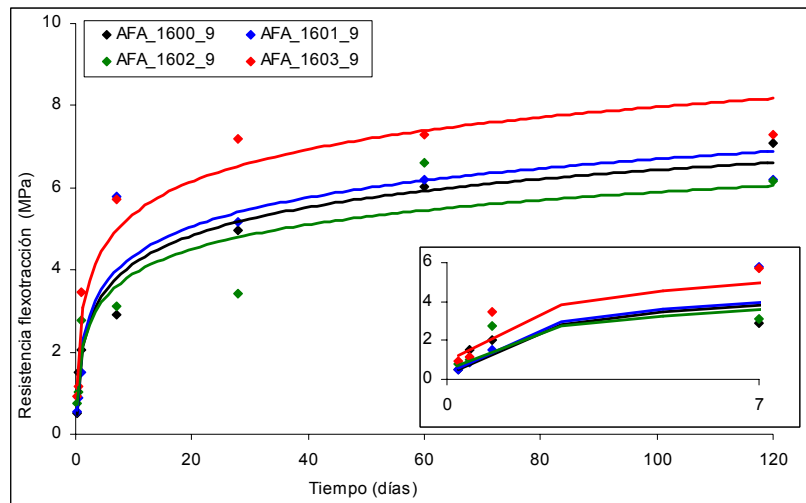


Figura 4.37: Resistencias a la flexión en morteros AFA\_16XX con CEM 42,5R

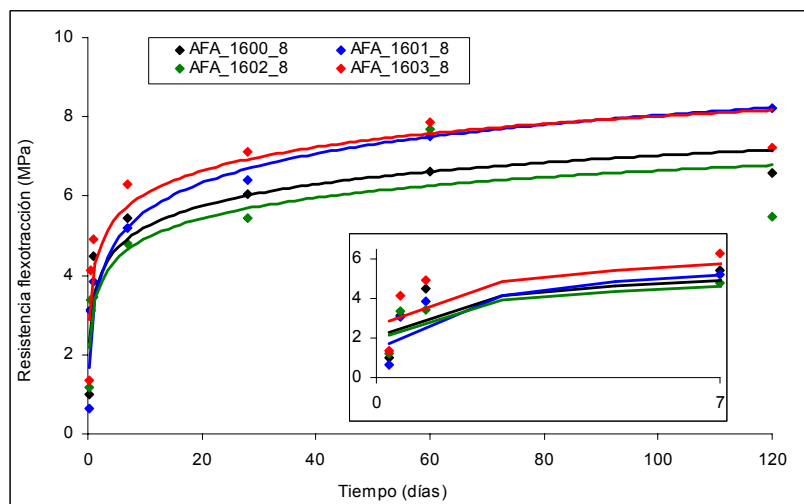


Figura 4.38: Resistencias a la flexión en morteros AFA\_16XX con CEM 52,5R

En la tabla 4.22 se presentan los resultados relativos a las resistencias a la compresión en distintas edades de los morteros patrones AKF y ALNA y demás morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA\_16XX, con cementos CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente. Así mismo, en las figuras 4.39 y 4.40 se visualiza la evolución de estas resistencias.

Resistencia a compresión (MPa)						
CEM I 42,5R						
Edad (días)	AKF	ALNA	AFA 1600	AFA 1601	AFA 1602	AFA 1603
0,25	1,80	5,76	1,41	1,67	2,40	3,17
0,5	6,13	10,96	5,04	3,33	3,34	4,64
1	10,52	18,72	6,78	12,52	15,43	16,95

Resistencia a compresión (MPa)						
CEM I 42,5R						
Edad (días)	AKF	ALNA	AFA 1600	AFA 1601	AFA 1602	AFA 1603
7	35,18	29,19	16,71	30,17	29,87	33,69
28	40,02	34,41	42,61	35,83	29,99	42,11
60	50,40	36,95	42,79	51,74	45,04	49,32
120	43,65	42,59	40,51	54,93	42,54	45,48
CEM I 52,5R						
Edad (días)	AKF	ALNA	AFA 1600	AFA 1601	AFA 1602	AFA 1603
0,25	2,37	9,61	8,18	8,74	4,66	6,29
0,5	11,46	19,51	11,88	13,61	14,61	20,14
1	27,56	25,74	22,34	21,41	19,91	31,04
7	37,37	33,93	36,78	36,52	34,98	41,61
28	48,56	39,07	43,80	48,48	33,64	45,86
60	53,42	41,52	40,80	49,06	52,27	54,21
120	46,05	50,78	44,04	57,76	45,14	53,31

Tabla 4.22: Resistencias a la compresión en morteros CEM I 42,5R y 52,5R.

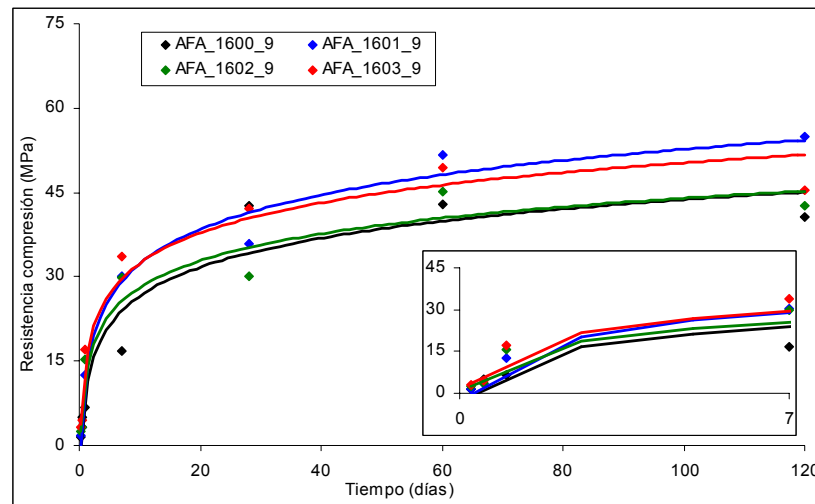


Figura 4.39: Resistencias a compresión en morteros AFA\_16XX con CEM I 42,5R

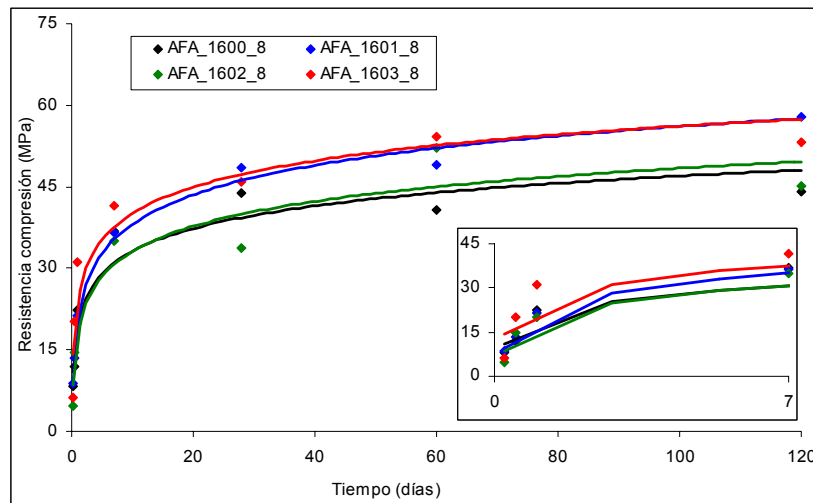


Figura 4.40: Resistencias a la compresión en morteros AFA\_16XX con CEM I 52,5R

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos de los morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA 16XX han puesto de manifiesto que las mezclas AFA\_1603 y AFA\_1601 han aportado mayor resistencia a compresión en ambos tipos de cemento, frente a las mezclas AFA\_1600 y AFA\_1602.

Los resultados obtenidos con la serie de acelerantes AFA 16XX y CEM I 42,5R han presentado valores inferiores a los encontrados en las muestras patrones AKF, a excepción de las mezclas AFA\_1600 y AFA\_1601 que presentaron 42,61 MPa a los 28 días y 54,93 MPa a los 120 días, valores estos superiores a los presentados por el patrón AKF con 37,91 MPa y 48,22 MPa, a las respectivas edades.

La resistencia máxima a los 120 días observada en la serie AFA\_16XX ha sido presentada por la mezcla AFA\_1601 con CEM I 52,5R con el valor de 57,76 MPa, prácticamente idéntico al valor presentado por la mezcla AFA\_1501 con 57,83 MPa. Seguidamente la mezcla AFA\_1603 presentó una resistencia a los 120 días igual a 53,31 MPa. Con este mismo cemento, las demás mezclas AFA\_1600 y AFA\_1602 de esta serie han mantenido el valor de resistencia máxima a los 120 días próximo a los valores presentados por el patrón AKF, con cerca de 45 MPa.

#### 4.2.5.4. Acelerantes AFA30XX

En la tabla 4.23 se presentan los resultados relativos a las resistencias a la flexión en distintas edades de los morteros patrones AKF y ALNA y demás morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA\_30XX, con cementos CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente. Así mismo, en las figuras 4.41 y 4.42 se visualiza la evolución de estas resistencias.

Resistencia a flexotracción (MPa)						
CEM I 42,5R						
Tiempo (días)	AKF	ALNA	AFA 3000	AFA 3001	AFA 3002	AFA 3003
0,25	0,51	1,48				
0,5	1,51	3,42	0,77	0,84	0,80	0,15
1	2,77	4,60	2,80	2,52	1,65	0,83
7	4,62	6,20	6,20	5,85	5,58	5,91
28	5,23	6,17	7,19	5,35	6,61	6,15
60	6,84	7,54	6,35	7,74	7,17	7,07
120	6,72	7,00	8,92	9,21	8,05	6,90
CEM I 52,5R						
Tiempo (días)	AKF	ALNA	AFA 3000	AFA 3001	AFA 3002	AFA 3003
0,25	0,59	1,93	1,06	0,90	0,90	0,86
0,5	2,65	3,88	3,47	2,83	2,05	2,50
1	4,83	4,77	5,06	5,09	4,98	4,67
7	5,12	6,95	7,58	5,91	5,82	6,91
28	5,72	5,94	6,30	7,00	7,11	6,46
60	5,12	7,15	8,70	7,24	6,41	8,02
120	7,37	6,24	8,65	6,60	8,21	7,93

Tabla 4.23: Resistencias a la flexión en morteros CEM I 42,5R y 52,5R.

Los resultados de resistencia a la flexotracción presentes en la tabla 4.23, obtenidos en mezclas fabricadas con la serie de acelerantes AFA\_30XX para ambos tipos de cemento, han seguido una evolución semejante al comportamiento presentado por la mezcla patrón AKF con valores máximos próximos a 7 MPa a los 28 días.

Respecto al CEM I 42,5R la mezcla AFA\_3000 ha presentado valores superiores a los presentados por las demás mezclas del grupo con resultado de 7,19 MPa a los 28 días. Por otra parte, los resultados presentados por las mezclas fabricadas con el CEM I 52,5R a los 28 días se han mantenido próximos a los 7 MPa con dispersiones significativamente menores entre ellos.

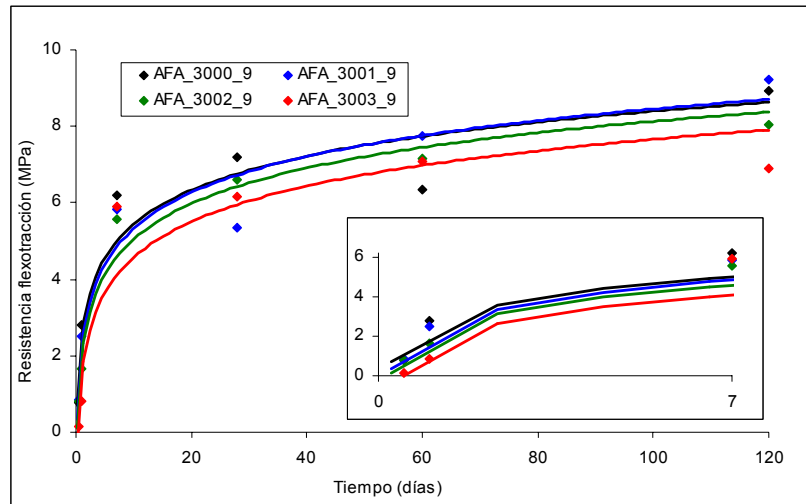


Figura 4.41: Resistencias a la flexión en morteros AFA\_30XX con CEM 42,5R

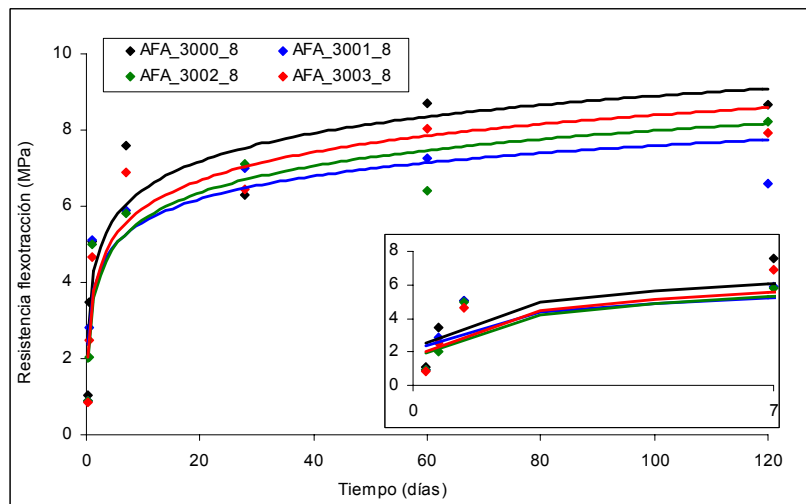


Figura 4.42: Resistencias a la flexión en morteros AFA\_30XX con CEM 52,5R

En la tabla 4.24 se presentan los resultados relativos a las resistencias a la compresión en distintas edades de los morteros patrones AKF y ALNA y demás morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA\_30XX, con cementos CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente. Así mismo, en las figuras 4.43 y 4.44 se visualiza la evolución de estas resistencias.

Resistencia a compresión (MPa)						
CEM I 42,5R						
Edad (días)	AKF	ALNA	AFA 3000	AFA 3001	AFA 3002	AFA 3003
0,25	1,80	5,76				
0,5	6,13	10,96	2,83	2,66	2,37	0,56
1	10,52	18,72	11,01	10,59	10,75	8,83

Resistencia a compresión (MPa)						
CEM I 42,5R						
Edad (días)	AKF	ALNA	AFA 3000	AFA 3001	AFA 3002	AFA 3003
7	35,18	29,19	38,19	32,11	35,58	37,54
28	40,02	34,41	46,55	44,67	48,85	37,88
60	50,40	36,95	42,41	53,24	50,30	49,81
120	43,65	42,59	50,92	61,08	52,90	50,19
CEM I 52,5R						
Edad (días)	AKF	ALNA	AFA 3000	AFA 3001	AFA 3002	AFA 3003
0,25	2,37	9,61	8,61	8,17	8,26	7,64
0,5	11,46	19,51	16,56	13,68	11,66	10,28
1	27,56	25,74	24,16	25,71	26,68	27,98
7	37,37	33,93	50,12	51,69	41,88	54,52
28	48,56	39,07	45,73	62,48	55,58	56,34
60	53,42	41,52	65,22	63,74	60,61	56,86
120	46,05	50,78	61,75	60,62	65,38	57,45

Tabla 4.24: Resistencias a la compresión en morteros AFA 30XX CEM I 42,5R y 52,5R.

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos de los morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA 30XX y CEM I 42,5R han presentado valores superiores a los encontrados en las muestras patrones AKF a partir de 7 días de edad. La muestra que presentó mayor resistencia a los 28 días ha sido la AFA\_3000 con 51,02 MPa, seguida de las demás mezclas cuyos valores se sitúan entre 40 y 50 MPa, aproximadamente. Todas estas han superado el valor presentado por la mezcla patrón AKF que presentó 37,91 MPa en esta misma edad.

La resistencia máxima la ha alcanzado la mezcla AFA\_3003 con CEM I 52,5R cuyo valor a los 28 días llegó a 62,48MPa, superior al valor correspondiente en la mezcla patrón AKF que presentó 53,07 MPa. Las demás mezclas con este mismo cemento han presentado valores igualmente superiores a la resistencia patrón presentada por el AKF.



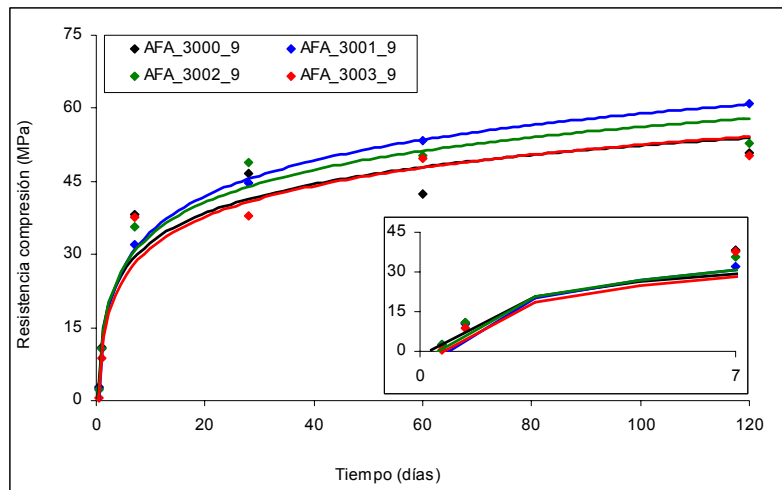


Figura 4.43: Resistencias a la compresión en morteros AFA\_30XX con CEM I 42,5R

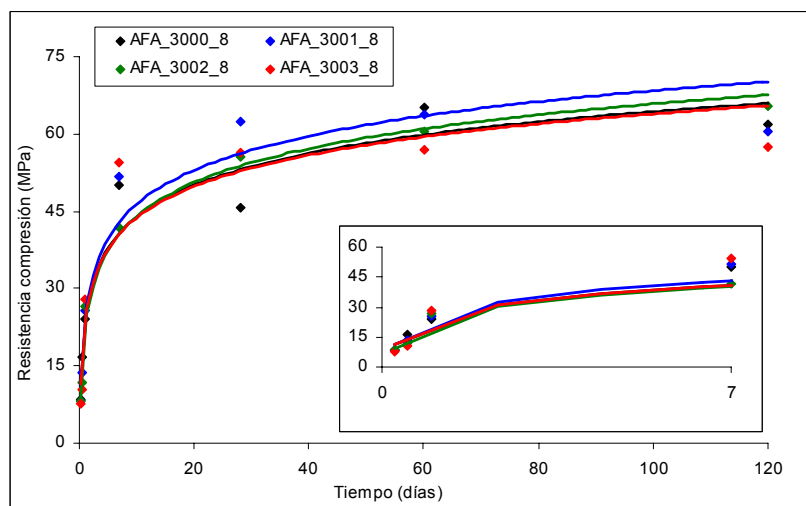


Figura 4.44: Resistencias a la compresión en morteros AFA\_30XX con CEM I 52,5R

## 4.2.6. RESULTADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS RELATIVOS A RESISTENCIAS A LA PENETRACIÓN EN MORTEROS

### 4.2.6.1. Acelerantes Patrones

En esta etapa de la campaña hemos considerado como metodología de ensayo para medidas de resistencias a la penetración la utilización de la aguja de diámetro 32mm ya que esta es la única dimensión posible de ser correlacionada con resistencias a la compresión a través de un ábaco presente en la norma UNE 83-603-94.

En las Figuras 4.45 y 4.46 se ilustran los valores de resistencia a la penetración que han presentado los morteros con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 42,5 y CEM I 52,5, respectivamente.

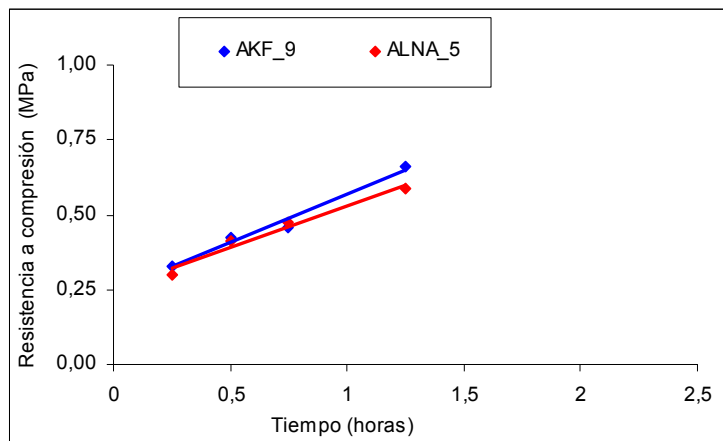


Figura 4.45: Valores correspondientes a las resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 42,5.

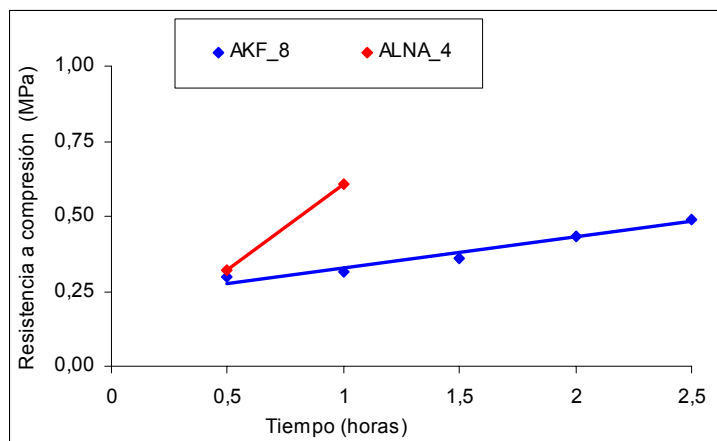


Figura 4.46: Valores correspondientes a las resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros con acelerantes AKF y ALNA con CEM I 52,5.

Las resistencias en MPa que presentaran los morteros con los acelerantes AKF y ALNA en las primeras horas desde su fabricación se encuentran en la tabla 4.25.

CEM I 42,5					
AKF_9			ALNA_5		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/4	20,67	0,22 a 0,43	1/4	15,33	0,22 a 0,38
1/2	32,67	0,27 a 0,58	1/2	32,33	0,26 a 0,56
3/4	36,33	0,30 a 0,62	3/4	38,33	0,32 a 0,63
1 1/4	56,33	0,49 a 0,83	1 1/4	49,67	0,43 a 0,75
1 1/2	-	-	1 1/2	-	-

CEM I 52,5					
AKF_8			ALNA_4		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/2	14,5	0,22 a 0,37	1/2	19,67	0,22 a 0,42
1	18,33	0,22 a 0,41	1	52	0,44 a 0,77
1 1/2	28	0,22 a 0,50	1 1/2	-	-
2	36	0,29 a 0,58	2	-	-
2 1/2	40	0,34 a 0,64	2 1/2	-	-

Tabla 4.25: Resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros con acelerantes AKF y ALNA a través del Penetrómetro

En la tabla 4.25 se dan los resultados de los ensayos de penetración realizados en un marco temporal desde 0,25 a 2,25 horas. Estos resultados muestran el ya conocido incremento de la resistencia con el tiempo.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la influencia del tipo de cemento en la resistencia a la penetración. Asociando estas resistencias con el tiempo de endurecimiento se pone de manifiesto que la muestra con acelerante ALNA\_4 y CEM I 52,5R se ha mostrado la más rápida, no presentando penetración en tiempos superiores a 1 hora. Respecto al CEM I 42,5R, las muestras con acelerante AKF se han comportado de forma similar a las del ALNA en su endurecimiento.

#### 4.2.6.2. Acelerantes AFA15XX

En esta etapa de la campaña hemos considerado como metodología de ensayo para medidas de resistencias a la penetración la utilización apenas de la aguja de diámetro 32mm una vez que esta es la dimensión posible de ser correlacionada con resistencias a la compresión a través de un ábaco presente en la norma UNE 83-603-94.

En las Figuras 4.47 y 4.48 se ilustran los valores de resistencia a la penetración que han presentado los morteros AFA\_15XX.

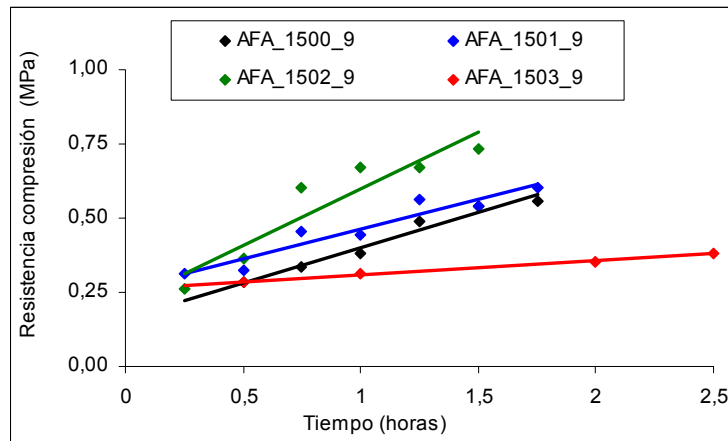


Figura 4.47: Valores correspondientes a las resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros AFA\_15XX con CEM I 42,5R.

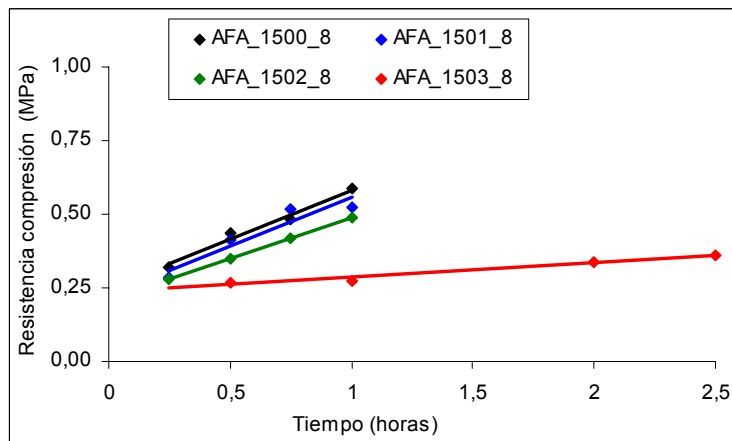


Figura 4.48: Valores correspondientes a las resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros AFA\_15XX con CEM I 52,5R.

Las resistencias en MPa que presentaran los morteros AFA 15XX en las primeras horas desde su fabricación se encuentran en la tabla 4.26.

CEM I 42,5					
AFA_1500_9			AFA_1501_9		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/2 h	13,00	0,22 a 0,35	1/2 h	20,33	0,22 a 0,43
3/4h	21,67	0,22 a 0,45	3/4h	35,67	0,30 a 0,61
1h	29,00	0,23 a 0,53	1h	35,33	0,29 a 0,60
1 1/4h	40	0,33 a 0,65	1 1/4h	47,00	0,40 a 0,73
1 1/2h	45	0,38 a 0,70	1 1/2h	45,33	0,38 a 0,70

AFA_1502_9			AFA_1503_9		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/2 h	27,33	0,22 a 0,51	1/4h	6,00	-
3/4h	51,00	0,43 a 0,77	1/2 h	13,33	0,22 a 0,35
1h	58,67	0,50 a 0,84	1 h	16,67	0,22 a 0,40
1 1/4h	58,67	0,50 a 0,84	2 hs	24,67	0,22 a 0,49
1 1/2h	65,00	0,56 a 0,91	2 1/2h	29,33	0,23 a 0,53
CEM I 52,5					
AFA_1500_8			AFA_1501_8		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/4 h	20	0,21 a 0,43	1/4 h	13	0,22 a 0,35
1/2 h	34,33	0,28 a 0,59	1/2 h	31,33	0,26 a 0,56
3/4h	38,67	0,33 a 0,64	3/4h	42,67	0,36 a 0,68
1 h	48,67	0,42 a 0,75	1 h	43,33	0,37 a 0,68
AFA_1502_8			AFA_1503_8		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/4 h	12,33	0,22 a 0,34	1/4 h	5,33	0,22 a 0,32
1/2 h	24,33	0,22 a 0,48	1/2 h	10,33	0,22 a 0,33
3/4h	32,33	0,27 a 0,57	1 h	11,00	0,22 a 0,45
1 h	39,67	0,33 a 0,65	2 hs	21,33	0,22 a 0,50

Tabla 4.26: Resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros AFA\_15XX a través del Penetrómetro.

En la tabla 4.26 se exponen los resultados de los ensayos de penetración realizados en un marco temporal desde 0,25 a 2,25 horas. Asociando estas resistencias con el tiempo de endurecimiento se pone de manifiesto que la muestra con acelerante AFA\_1502 y CEM I 42,5R se ha mostrado la más rápida. Esta ha presentado una resistencia a la compresión situada entre 0,50 y 0,84 MPa.

En el caso del CEM I 52,5R, la mezcla que ha presentado mayor resistencia a la penetración ha sido la AFA\_1500 con valores de resistencia a la compresión equivalentes entre 0,42 y 0,75 MPa desde 1 hora de su fabricación.

#### 4.2.6.3. Acelerantes AFA16XX

En esta etapa de la campaña hemos considerado como metodología de ensayo para medidas de resistencias a la penetración la utilización apenas de la aguja de diámetro 32mm una vez que esta es la dimensión posible de ser

correlacionada con resistencias a la compresión a través de un ábaco presente en la norma UNE 83-603-94.

En las Figuras 4.49 y 4.50 se ilustran los valores de resistencia a la penetración que han presentado los morteros AFA\_16XX.

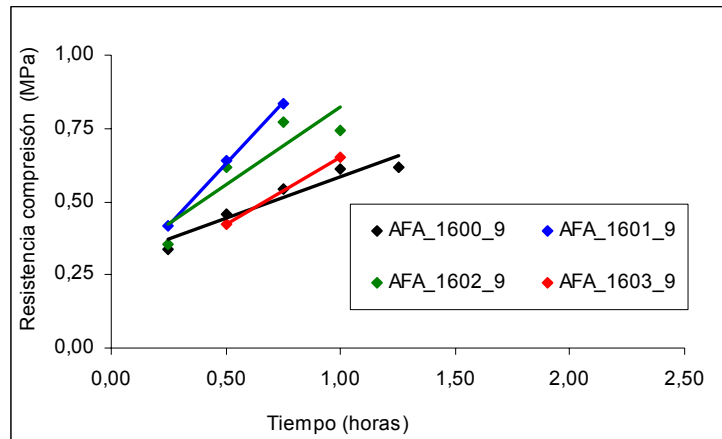


Figura 4.49: Valores correspondientes a las resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros AFA\_16XX con CEM I 42,5R.

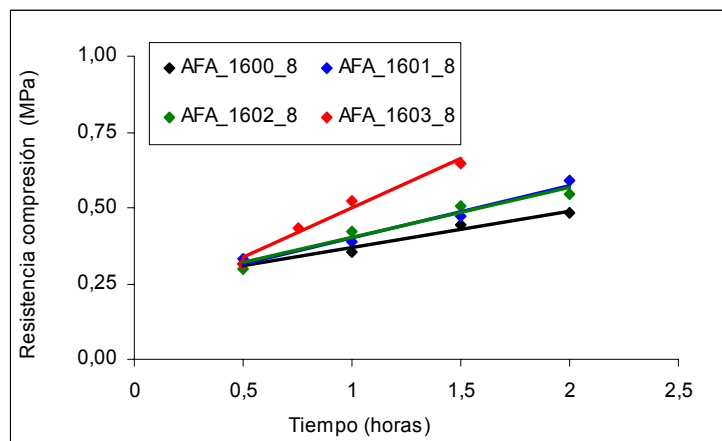


Figura 4.50: Valores correspondientes a las resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros AFA\_16XX con CEM I 52,5R.

Las resistencias en MPa que presentaran los morteros AFA 16XX en las primeras horas desde su fabricación se encuentran en la tabla 4.27.

CEM I 42,5					
AFA_1600_9			AFA_1601_9		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/4h	20,33	0,22 a 0,45	1/4h	32,33	0,26 a 0,57
1/2 h	36,67	0,30 a 0,61	1/2 h	54,33	0,47 a 0,81
3/4 h	47,67	0,39 a 0,70	3/4 h	76,00	0,67 a 1,00
1 h	52,33	0,44 a 0,78	1 h	-	-
1 1/4h	53,33	0,45 a 0,78	1 1/4h	-	-
AFA_1602_9			AFA_1603_9		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/4h	25,67	0,22 a 0,49	1/2 h	33,33	0,27 a 0,58
1/2 h	53,00	0,45 a 0,78	1 h	56,67	0,48 a 0,82
3/4 h	68,00	0,59 a 0,95	1 1/2h	-	-
1 h	65,67	0,57 a 0,92	2 hs	-	-
1 1/4h	-	-	2 1/2h	-	-
CEM I 52,5					
AFA_1600_8			AFA_1601_8		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/2 h	17,67	0,22 a 0,41	1/2 h	20,83	0,22 a 0,44
1 h	26,00	0,22 a 0,49	1 h	30,33	0,25 a 0,53
1 1/2h	35,33	0,29 a 0,60	1 1/2h	38,67	0,32 a 0,62
2 hs	40,33	0,33 a 0,64	2 hs	49,67	0,43 a 0,75
2 1/2h	-	-	2 1/2h	-	-
AFA_1602_8			AFA_1603_8		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/2 h	16,67	0,22 a 0,38	1/2 h	18,33	0,22 a 0,41
1 h	32,67	0,27 a 0,57	3/4 h	33,67	0,28 a 0,58
1 1/2h	43,00	0,35 a 0,66	1 h	42,67	0,37 a 0,68
2 hs	47,33	0,39 a 0,70	1 1/2h	55	0,48 a 0,81
2 1/2h	-	-	2 hs	-	-

Tabla 4.27: Resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros AFA\_16XX a través del Penetrómetro

En la tabla 4.27 se exponen los resultados de los ensayos de penetración realizados en un marco temporal desde 0,25 a 2,25 horas. Asociando estas resistencias con el tiempo de endurecimiento se pone de manifiesto que la muestra con acelerante AFA\_1601 y CEM I 42,5R se ha mostrado la más rápida. Esta ha presentado una resistencia a la compresión situada entre 0,67 y 1 MPa en menos de 1 hora desde su fabricación.

Respecto al CEM I 42,5R, las demás mezclas también han presentado valores de resistencia a la penetración más elevados que las demás mezclas de la serie con CEM I 52,5R en los tiempos equivalentes.

En el caso del CEM I 52,5R, la mezcla que ha presentado mayor resistencia a la penetración ha sido la AFA\_1603 con valores de resistencia a la compresión equivalentes entre 0,48 y 0,81 MPa a partir de 1 hora y 30 minutos de su fabricación.

#### 4.2.6.4. Acelerantes AFA30XX

En esta etapa de la campaña hemos considerado como metodología de ensayo para medidas de resistencias a la penetración la utilización apenas de la aguja de diámetro 32mm una vez que esta es la dimensión posible de ser correlacionada con resistencias a la compresión a través de un ábaco presente en la norma UNE 83-603-94.

En las Figuras 4.51 y 4.52 se ilustran los valores de resistencia a la penetración que han presentado los morteros AFA 30XX.

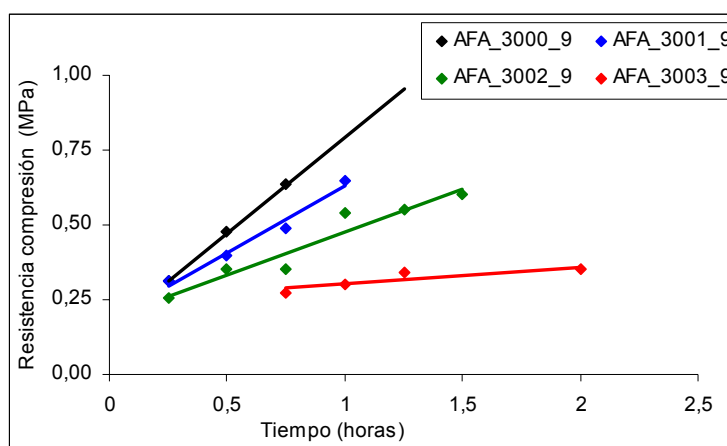


Figura 4.51: Valores correspondientes a las resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros AFA\_30XX con CEM I 42,5R.



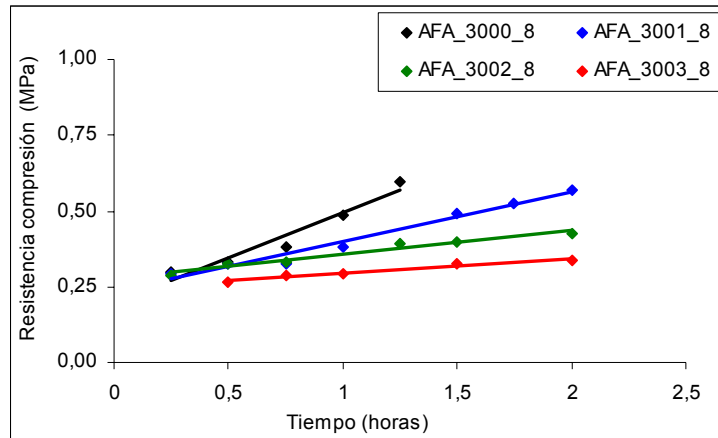


Figura 4.52: Valores correspondientes a las resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros AFA\_30XX con CEM I 52,5R.

CEM I 42,5					
AFA_3000_9			AFA_3001_9		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/4h	16,33	0,22 a 0,41	1/4h	15,33	0,22 a 0,40
1/2 h	38,67	0,32 a 0,63	1/2 h	31,67	0,25 a 0,55
3/4 h	54,00	0,47 a 0,80	3/4 h	40,00	0,33 a 0,65
1 h	-	-	1 h	56,33	0,48 a 0,82
1 1/4h	-	-	1 1/4h	-	-
AFA_3002_9			AFA_3003_9		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/2 h	23,33	0,22 a 0,48	1/4 h	2,00	-
3/4 h	25,00	0,22 a 0,48	3/4 h	12,33	0,22 a 0,33
1 h	45,33	0,38 a 0,70	1 h	14,67	0,22 a 0,38
1 1/4 h	46,00	0,38 a 0,72	1 1/4h	22,67	0,22 a 0,46
1 1/2 h	51,33	0,43 a 0,77	2 hs	24,00	0,22 a 0,48
CEM I 52,5					
AFA_3000_8			AFA_3001_8		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/4h	15	0,22 a 0,38	1/2 h	19,67	0,22 a 0,43
1/2 h	21,33	0,22 a 0,44	3/4 h	20,67	0,22 a 0,43
3/4 h	29,00	0,23 a 0,53	1 h	30,00	0,23 a 0,53
1 h	40,33	0,33 a 0,64	1 1/2 h	40,00	0,33 a 0,65
1 1/4h	50,33	0,43 a 0,76	1 3/4 h	43,33	0,37 a 0,68

AFA_3002_8			AFA_3003_8		
Tiempo horas	Penetración Kp	Compresión MPa	Tiempo	Penetración Kp	Compresión MPa
1/2 h	19,67	0,22 a 0,43	1/2 h	8,67	0,22 a 0,31
3/4 h	21,33	0,23 a 0,43	3/4 h	12,33	0,22 a 0,36
1 1/4h	30,33	0,24 a 0,54	1 h	14,67	0,22 a 0,37
1 1/2h	31,67	0,25 a 0,55	1 1/2h	19,67	0,22 a 0,43
2 hs	34,00	0,27 a 0,58	2 hs	21	0,22 a 0,45

Tabla 4.28: Resistencias a la penetración en las primeras horas en morteros AFA\_30XX a través del Penetrómetro.

En la tabla 4.28 se exponen los resultados de los ensayos de penetración realizados en un marco temporal desde 0,25 a 2,25 horas. Asociando estas resistencias con el tiempo de endurecimiento se pone de manifiesto que la muestra con acelerante AFA\_3000 y CEM I 42,5R se ha mostrado la más rápida. Esta ha presentado una resistencia a la compresión situada entre 0,22 y 0,48MPa en 45 minutos desde su fabricación.

Respecto al CEM I 42,5R, las demás mezclas han presentado valores de resistencia a la penetración inferiores a las demás mezclas de la serie con CEM I 52,5R en los tiempos equivalentes.

En el caso del CEM I 52,5R, la mezcla que ha presentado mayor resistencia a la penetración ha sido la AFA\_3000 con valores de resistencia a la compresión equivalentes entre 0,43 y 0,76 MPa a partir de 1 hora y 15 minutos de su fabricación.

### 4.3. ANÁLISIS GLOBAL DE RESULTADOS RELATIVOS A LAS DISTINTAS FAMILIAS DE ACELERANTES

#### 4.3.1. Acelerantes AFA15XX

En un análisis general de los ensayos realizados con la familia AFA\_15XX, a nivel pasta se puede observar que los distintos tipos de acelerantes han presentado valores próximos tanto para el I.F./F.F. como para las temperaturas. Sin embargo, el acelerante AFA\_1501, que contiene un 12% de HCCOH, es el que, para ambos tipos de cemento, ha presentado mejores resultados para los tiempos de I.F. y F.F. (dentro del rango 2-6 minutos); asimismo, mayores valores de temperatura máxima, de 44,4°C y 40°C (CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente).

A nivel morteros, aunque los valores de temperatura máxima se han presentado en el acelerante AFA\_1503, que lleva un 14% de HF, sus resultados de resistencia a compresión, hasta los 7 días, han sido los más bajos de la serie

con el CEM I 52,5R. Lo mismo se ha verificado con el CEM I 42,5R en todas las edades para este acelerante. Respecto al I.F. y F.F., el AFA\_1501 con CEM I 42,5R y el AFA\_1503 con CEM I 52,5R han presentado los peores resultados con valores situados entre 3 y 13 minutos. Se podría relacionar estos resultados con la concentración más elevada del ácido, en este caso de un 12% de HCOOH y un 14% de HF, frente a las concentraciones del AFA\_1500 con un 9% de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> y del AFA\_1502 con un 4% de HCOOH. Asimismo, si por un lado esta concentración más elevada del ácido proporciona unos mejores tiempos de I.F./F.F. en pastas, por otro lado, las resistencias a nivel mortero se ven perjudicadas. Tal como se ha comentado anteriormente, puede que este hecho se deba a que las mezclas presenten peor compactación debido a su rápido endurecimiento.

Los menores tiempos de I.F. y F.F. con CEM I 42,5R los ha presentado el AFA\_1502, lo cual se ve refrendado por los resultados de resistencia a la penetración. Respecto al CEM I 52,5R, el AFA\_1500 es el acelerante que presenta mejores resultados de resistencia a la penetración con valores que se sitúan entre 0,42 y 0,75 MPa a 1 hora de su fabricación.

#### 4.3.2. Acelerantes AFA16XX

A nivel pasta, la serie de acelerantes AFA\_16XX ha mantenido los valores de IF/FF relativamente próximos. En las temperaturas, igualmente se ha observado poca diferencia entre los resultados presentados por los acelerantes de esta familia.

Respecto a los morteros los valores de temperatura máxima han resultado también bastante próximos. Los tiempos de IF/FF obtenidos han sido inferiores con el CEM I 42,5R en relación a los obtenidos con el CEM I 52,5R. Entre ellos, el acelerante AFA\_1601 (3% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) con el CEM I 42,5R y el acelerante AFA\_1602 (2% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) con el CEM I 52,5R han sido los acelerantes que han presentado valores más bajos de IF/FF. En los resultados de resistencia a la penetración también se ha puesto de manifiesto una mejor respuesta de la serie de acelerantes AFA\_16XX con el CEM I 42,5R, cuyos valores han sido superiores a los encontrados con el CEM I 52,5R. Entre ellos, con el CEM I 42,5R, ha sido el AFA\_1601 el acelerante que ha presentado una mayor resistencia a la penetración; con el CEM I 52,5R, ha sido el AFA\_1603.

Los valores de resistencia a compresión para ambos tipos de cemento han indicado que el AFA\_1603, (0% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), ha sido el acelerante que ha presentado valores más elevados en prácticamente todas las edades. Por otro lado, el AFA\_1600, acelerante que lleva mayor concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (4%), con el CEM I 42,5R, ha presentado valores bastante inferiores a los del AFA\_1603 hasta la edad de 7 días. A partir de los 28 días esta diferencia ha disminuido.

### 4.3.3. Acelerantes AFA30XX

A nivel pasta los tiempos de IF/FF han presentado valores inferiores cuando se ha utilizado el CEM I 52,5R; por otra parte, las temperaturas no han presentado diferencias significativas.

A nivel mortero, los tiempos de IF/FF, para ambos tipos de cemento, ponen de manifiesto una tendencia creciente a medida que disminuye la concentración del DEAH, y, especialmente en el tiempo correspondiente al final de fraguado.

Respecto al ensayo de penetración, la resistencia a compresión estimada pone claramente de manifiesto una evolución más lenta de resistencias cuando disminuye la concentración de DEAH.

La evolución de resistencias a compresión es similar en ambos tipos de cemento, siendo los valores a largo plazo menores en el AFA\_3003, con nula concentración de DEAH.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Realizado el estudio expuesto en los anteriores capítulos y obtenidos los resultados, y los análisis de resultados, de los ensayos con pastas de cemento y morteros con las diferentes familias de aditivos acelerantes se ha llegado a diferentes conclusiones.

Este capítulo recoge las conclusiones generales, donde se compara mediante los resultados obtenidos las dos tipologías de acelerantes estudiadas, la basada en aluminatos y la libre de álcalis. En estas conclusiones generales también se recogen diferentes aspectos que tratan de mejorar el procedimiento de fabricación de las mezclas y la manera de mejorar los ensayos con estas.

También se recogen conclusiones específicas donde se comentan las características que aportan las variaciones de componentes de los aditivos acelerantes libres de álcalis.

Estas conclusiones deben entenderse dentro del contexto de los materiales componentes y proporciones de los mismos utilizados en este estudio.

Finalmente, este capítulo contiene las posibles futuras vías de investigación sobre la caracterización de los aditivos acelerantes para hormigón proyectado por vía húmeda.

## 5.2. CONCLUSIONES GENERALES

### Comparación entre acelerantes basados en aluminatos y acelerantes libres de álcalis:

Una vez realizado este estudio, se puede afirmar que el uso de aditivos acelerantes basados en aluminatos y el uso de aditivos acelerantes libres de álcali implican similares características a las pastas de cemento y morteros ensayados, con lo que cabe decir, que también lo harían en el hormigón proyectado.

La diferencia entre el uso de ambos aditivos reside en las concentraciones de cada tipo de acelerante. Para conseguir unas mismas características en las pastas de cemento y en los morteros utilizando ambos aditivos debemos aumentar las concentraciones del acelerante libre de álcali respecto al acelerante basado en aluminatos. Esto se puede observar si nos fijamos en los resultados del capítulo 4 donde se comparan los acelerantes patrones (ALNA y AKF).

Esta conclusión implica el necesario estudio económico en cada obra para poder escoger la opción más óptima: usar los acelerantes libres de álcali, que tienen grandes ventajas como la de no atacar a los operarios que están proyectando o no provocar impacto negativo al medioambiente; o seguir usando los acelerantes basados en aluminatos, los cuales sí provocan impactos negativos, tanto en las personas como en el medio, pero que por el contrario son más "económicos", debido a la menor concentración de aditivo que es necesaria para conseguir una calidad alta de hormigón proyectado.

Como opinión personal, estar a favor del uso de acelerantes libres de álcali es la mejor opción, ya que los gastos que implican una mayor dosis de acelerante siempre será menor que el daño que pueda sufrir un operario.

### Conclusiones relativas a los procedimientos de ensayo utilizados

Estas conclusiones pretenden poner de manifiesto algunos aspectos de carácter específico vinculados al trabajo en laboratorio con acelerantes, a nivel pasta y mortero, que se han constatado en el desarrollo de la intensa campaña experimental realizada. Estas consideraciones pretenden ser una aportación para la realización, en su caso, de nuevos estudios experimentales.

### *Fabricación de muestras*

La alta velocidad de reacción del acelerante dificulta en ocasiones la obtención de una mezcla homogénea, lo que consecuentemente incide en

plasticidad y en la compactación de las probetas. Ello se fundamenta en que hay zonas en donde el acelerante provoca un endurecimiento más rápido que en otras zonas de la misma muestra. Este aspecto puede tener influencia en la dispersión de resultados obtenidos en los ensayos de caracterización mecánicos (resistencias a compresión, flexotracción y penetración).

En línea con estas consideraciones, cabe reflexionar, por una parte, sobre la cantidad de acelerante a emplear en las dosificaciones, y, por otra parte, en el número de muestras a ensayar (tamaño de la muestra).

#### *Inicio/final de fraguado en morteros*

Los ensayos realizados con el Vicat Automático no proporcionan una definición clara de los tiempos de fraguado según los criterios adoptados para su determinación. Ello se fundamenta en un comportamiento no lineal entre la penetración y el tiempo, el cual se manifiesta mediante las fluctuaciones visualizadas en las gráficas representativas de los resultados obtenidos mediante esta técnica.

### **5.3. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS**

Estas conclusiones se han estructurado en dos bloques principales; uno, referente a los resultados obtenidos en el desarrollo de la campaña experimental realizada, para poder así comparar las familias de acelerantes ensayadas; y el otro, relativo a aspectos vinculados a los procedimientos de ensayo utilizados. Se ha hecho de esta manera para que las futuras líneas de investigación sean más fiables.

#### **5.3.1. Conclusiones relativas a los ensayos AKF y ALNA**

##### Inicio/final de fraguado en pastas con acelerantes patrones AKF y ALNA

Para el conjunto de pastas patrones, los tiempos de inicio y final de fraguado se sitúan en el intervalo comprendido entre 50 segundos y 2 minutos y 48 segundos.

A nivel cualitativo, y si se exceptúan las pastas AKF\_9 - CEM I 42,5R y AKF\_8 -CEM I 52,5R, la duración del fraguado en el resto de los casos es inferior en los cementos CEM I 52,5 R frente a la correspondiente a los cementos CEM I 42,5 R, independientemente del tipo de acelerante.

### Inicio/final de fraguado en morteros con acelerantes patrones AKF y ALNA.

Las muestras fabricadas con AKF presentan tiempos de inicio y final de fraguado inferiores a los presentados por las muestras fabricadas con el ALNA. Se pone de manifiesto que los valores presentados por el AKF cumplen los valores óptimos de referencia (IF inferior a dos minutos y FF inferior a seis minutos) prácticamente en ambos cementos, mientras que el ALNA ha presentado valores bastante superiores.

### Evolución térmica en pastas con acelerantes patrones AKF y ALNA

Independientemente del tipo de cemento y de la presencia o no del superplastificante, los acelerantes AKF presentan temperaturas máximas superiores a los acelerantes ALNA.

### Evolución térmica en morteros con acelerantes patrones AKF y ALNA

Independientemente del tipo de cemento, los acelerantes AKF presentan temperaturas máximas superiores a los acelerantes ALNA. En este sentido, si bien esta tendencia ya se ha puesto de manifiesto a nivel de pasta, los valores de la máxima temperatura en el mortero son inferiores a los registrados en las pastas.

Para un mismo tipo de acelerante (sea AKF, sea ALNA), la influencia del tipo de cemento se ha mostrado poco significativa respecto a los valores de la temperatura máxima. Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura se sitúa en un intervalo de tiempo comprendido entre 0,25 y 1,5 minutos.

La evolución de la temperatura en todos los morteros patrones estudiados, ha puesto de manifiesto una caída brusca de la temperatura tras el pico térmico inicial y una posterior recuperación de temperatura hasta un segundo pico (de valor inferior al máximo) a partir del cual se busca el equilibrio con la temperatura ambiente. Este comportamiento es significativamente distinto del mostrado por las pastas, en donde tras el pico término, la temperatura evoluciona hacia el equilibrio con la temperatura ambiente.

### Resistencias a flexión y compresión en morteros patrones AKF y ALNA

A tempranas edades el ALNA presenta mayores resistencias iniciales a compresión que el AKF. A largo plazo, entre 60 y 120 días, el AKF presenta una disminución de resistencia mientras que en el ALNA la resistencia sigue



umentando entre 60 y 120 días. Estas tendencias se ponen de manifiesto independientemente del tipo de cemento.

### Resistencias a la penetración en morteros patrones AKF y ALNA

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la influencia del tipo de cemento en la resistencia a la penetración. Con el CEM I 52,5R el ALNA ha endurecido más rápidamente, mientras que con el CEM I 42,5R, las muestras con acelerante AKF se han comportado de forma similar a las del ALNA en su endurecimiento.

### **5.3.2. Acelerantes AFA\_15XX**

#### Inicio/final de fraguado en pastas con acelerantes AFA\_15XX

Para el conjunto de pastas fabricadas con los acelerantes de la serie AFA 15XX, los tiempos de inicio y final de fraguado se sitúan en el intervalo comprendido entre 1 minuto y 5 segundos y 3 minutos y 35 segundos.

Los IF y FF se ven influenciados por el tipo de cemento. La presencia del superplastificante supone un aumento en los tiempos de IF y FF, a excepción del AFA 1501, independientemente del tipo de cemento.

#### Inicio/final de fraguado en morteros con acelerantes AFA\_15XX

De entre las mezclas fabricadas con la serie AFA 15XX y CEM I 42,5R las que presentan una duración de fraguado inferior son las mezclas AFA\_1502 y AFA\_1503, con valores situados entre 1 minuto y 25 segundos y 3 minutos y 17 segundos.

Para las mezclas fabricadas con el CEM I 52,5R la duración de fraguado inferior se observa en las mezclas AFA\_1500 y AFA\_1501, con valores situados entre 1 minuto y 55 segundos y 4 minutos y 55 segundos para el inicio y final de fraguado, respectivamente.

#### Evolución térmica en pastas con acelerantes AFA\_15XX

Respecto al CEM I 42,5R, las mezclas que han presentado mayor temperatura han sido las AFA\_1501 y AFA\_1502, independientemente de la incorporación del superplastificante. Así, para el AFA\_1501 la temperatura máxima obtenida ha sido de 44,4 °C mientras que para el AFA\_1502 la temperatura máxima ha sido de 43,3 °C.

Respecto al CEM I 52,5R, a la excepción de las mezclas AFA\_1500, las demás mezclas presentan temperaturas máximas situadas alrededor de los 40°C, independientemente de la incorporación del superplastificante.

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura se sitúa en un intervalo de tiempo comprendido entre 2,25 y 3,5 minutos para CEM I 42,5, y 2 y 3,5 minutos para CEM I 52,5.

#### Evolución térmica en morteros con acelerantes AFA\_15XX

Para los dos tipos de cemento la mezcla AFA\_1503 presenta una temperatura más elevada en las 6 primeras horas, tiempo a partir del cual, así como las demás mezclas, la temperatura evoluciona hacia el equilibrio con la temperatura ambiente.

También, para ambos los tipos de cemento, la mezcla que ha presentado la mayor temperatura máxima ha sido la AFA\_1503 con valores cerca de los 29°C. La mezcla AFA\_1501 con CEM I 42,5 presentó 26,5 °C, y las demás mezclas han presentado valores de temperatura máxima situados entre 20,8 °C y 23,6 °C.

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, a excepción de las mezclas AFA\_1502 y AFA\_1503 con CEM I 42,5R, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura ha sido prácticamente instantáneo con la ejecución del ensayo.

#### Resistencias a flexión y compresión en morteros AFA\_15XX

Tomando como referencia el intervalo de 28 días, las mayores resistencias iniciales (a un día) se han obtenido con la mezcla AFA 1502, para ambos tipos de cemento, mientras que a los 28 días la mayor resistencia se ha obtenido con el AFA 1500 y cemento CEM I 52,5.

#### Resistencias a la penetración en morteros AFA\_15XX

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la influencia del tipo de cemento en la resistencia a la penetración. La muestra con acelerante AFA\_1502 y CEM I 42,5R se ha mostrado la más rápida, mientras que en el caso del CEM I 52,5R, la mezcla que ha presentado mayor resistencia a la penetración ha sido la AFA\_1503.

### Análisis global de resultados relativos a la serie de acelerantes AFA 15XX

A nivel pasta se puede observar que los distintos tipos de acelerantes han presentado valores próximos tanto para el I.F./F.F. como para las temperaturas. Sin embargo, el acelerante AFA\_1501, que contiene un 12% de HCCOH, es el que, para ambos tipos de cemento, ha presentado mejores resultados para los tiempos de I.F. y F.F. (dentro del rango 2-6 minutos); asimismo, mayores valores de temperatura máxima, de 44,4°C y 40°C (CEM I 42,5R y CEM I 52,5R, respectivamente).

A nivel morteros, aunque los valores de temperatura máxima se han presentado en el acelerante AFA\_1503, que lleva un 14% de HF, sus resultados de resistencia a compresión, hasta los 7 días, han sido los más bajos de la serie con el CEM I 52,5R. Lo mismo se ha verificado con el CEM I 42,5R en todas las edades para este acelerante.

Respecto al I.F. y F.F., el AFA\_1501 con CEM I 42,5R y el AFA\_1503 con CEM I 52,5R han presentado los peores resultados con valores situados entre 3 y 13 minutos. Se podría relacionar estos resultados con la concentración más elevada del

ácido, en este caso de un 12% de HCOOH y un 14% de HF, frente a las concentraciones del AFA\_1500 con un 9% de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> y del AFA\_1502 con un 4% de HCOOH. Asimismo, si por un lado esta concentración más elevada del ácido proporciona unos mejores tiempos de I.F./F.F. en pastas, por otro lado, las resistencias a nivel mortero se ven perjudicadas. Tal como se ha comentado anteriormente, puede que este hecho se deba a que las mezclas presenten peor compactación debido a su rápido endurecimiento.

Los menores tiempos de I.F. y F.F. con CEM I 42,5R los ha presentado el AFA\_1502, lo cual se ve refrendado por los resultados de resistencia a la penetración. Respecto al CEM I 52,5R, el AFA\_1500 es el acelerante que presenta mejores resultados de resistencia a la penetración con valores que se sitúan entre 0,42 y 0,75 MPa a 1 hora de su fabricación.

#### **5.3.3. Acelerantes AFA\_16XX**

##### Inicio/final de fraguado en pastas con acelerantes AFA\_16XX

Para el conjunto de pastas fabricadas con los acelerantes de la serie AFA 16XX, los tiempos de inicio y final de fraguado se sitúan en el intervalo comprendido entre 58 segundos y 2 minutos y 56 segundos.

Respecto al CEM I 42,5R, la serie de acelerantes AFA\_15XX presentó una duración de fraguado prácticamente constante en todas las muestras con valores situados entre 1 minuto y 2 minutos, respectivamente, para inicio y final de fraguado., independientemente de la incorporación del superplastificante.

Esta tendencia se ha mantenido igualmente para el CEM I 52,5R, a la excepción de las mezclas AFA\_1601 y AFA\_1602 cuya duración de fraguado presentó una ligera elevación frente a las mezclas fabricadas con CEM I 42,5R. Estas han presentado tiempos de inicio y final de fraguado entre 1 minuto y 7 segundos y 2 minutos y 56 segundos, respectivamente.

#### Inicio/final de fraguado en morteros con acelerantes AFA\_16XX

Las mezclas fabricadas con la serie AFA 16XX y CEM I 42,5R presentan una duración de fraguado inferior, con valores situados entre 1 minuto 48 segundos y 4 minutos y 48 segundos, frente a los resultados obtenidos con el CEM I 52,5R que presentaron valores entre 1 minuto 48 segundos y 9 minutos y 56 segundos.

#### Evolución térmica en pastas con acelerantes AFA\_16XX

Respecto al CEM I 42,5R, independientemente de la incorporación del superplastificante, las mezclas han presentado una temperatura máxima alrededor de los 40 °C habiendo sido la mezcla AFA\_1603 la que presentó mayor valor de temperatura con 42,9 °C.

Respecto al CEM I 52,5R, las mezclas que han mostrado mayor valor de temperatura frente a las demás han sido las AFA\_1602 y AFA\_1603. Independientemente a la incorporación del superplastificante, estas mezclas alcanzaron

valores máximos entre 40,1 °C y 42,8 °C; esta última temperatura ha sido presentada por la mezcla AFA\_1603.

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura se sitúa en un intervalo de tiempo de 0,75 minutos para ambos cementos utilizados.

#### Evolución térmica en morteros con acelerantes AFA\_16XX

En el estudio de la evolución térmica en morteros con acelerante de la familia AFA\_16XX los resultados presentados corresponden a ensayos realizados en distintas épocas del año, debido a que resultados anómalos en las

primeras determinaciones, han conducido a repetir los ensayos con nuevas muestras. Es decir, ensayos con el AFA\_1600 y AFA\_1603 se han realizado el mes de abril (temperatura ambiente de 17 °C) y con el AFA\_1601 y AFA\_1602 se han realizado el mes de junio (temperatura ambiente de 24 °C). Teniendo en cuenta el diferente origen en la temperatura inicial, los resultados ponen de manifiesto que no existen diferencias significativas entre el comportamiento térmico de los aditivos de esta familia.

#### Resistencias a flexión y compresión en morteros AFA\_16XX

Los resultados de resistencia a la flexotracción obtenidos en mezclas fabricadas con la serie de acelerantes AFA\_16XX han seguido una evolución similar para ambos tipos de cemento, con valores máximos próximos a 7 MPa a los 120 días. La mezcla AFA\_1603 ha presentado los valores más altos, seguida ordinalmente de las mezclas AFA\_1601, AFA\_1600 y AFA\_1602, para ambos tipos de cemento.

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos de los morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA 16XX han puesto de manifiesto que las mezclas AFA\_1603 y AFA\_1601 han aportado mayor resistencia a compresión en ambos tipos de cemento, frente a las mezclas AFA\_1600 y AFA\_1602.

La máxima resistencia a la compresión a los 120 días en la serie AFA\_16XX la ha alcanzado la mezcla AFA\_1601 con CEM I 52,5R con el valor de 57,76 MPa, seguida de la mezcla AFA\_1603 que ha presentado una resistencia a los 120 días igual a 53,31 MPa. Con este mismo cemento, las demás mezclas AFA\_1600 y AFA\_1602 de esta serie han mantenido el valor de resistencia máxima a los 120 días próximo de 45 MPa.

Respecto al CEM I 42,5R la mezcla AFA\_1601 ha presentado 54,93 MPa a los 120 días, seguida de las mezclas AFA\_1603, AFA\_1600 y AFA\_1602 que han presentado 46,21 MPa, 43,18 MPa y 38,03 MPa, respectivamente.

#### Resistencias a la penetración en morteros AFA\_16XX

La muestra con acelerante AFA\_1601 y CEM I 42,5R se ha mostrado la más rápida. Esta ha presentado una resistencia a la compresión situada entre 0,67 y 1 MPa en menos de 1 hora desde su fabricación.

En el caso del CEM I 52,5R, la mezcla que ha presentado mayor resistencia a la penetración ha sido la AFA\_1603 con valores de resistencia a la compresión equivalentes entre 0,48 y 0,81 MPa a partir de 1 hora y 30 minutos de su fabricación.

### Análisis global de resultados relativos a la serie de acelerantes AFA 16XX

A nivel pasta, la serie de acelerantes AFA\_16XX ha mantenido los valores de IF/FF relativamente próximos. En las temperaturas, igualmente se ha observado poca diferencia entre los resultados presentados por los acelerantes de esta familia.

Respecto a los morteros los valores de temperatura máxima han resultado también bastante próximos. Los tiempos de IF/FF obtenidos han sido inferiores con el CEM I 42,5R en relación a los obtenidos con el CEM I 52,5R. Entre ellos, el acelerante AFA\_1601 (3% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) con el CEM I 42,5R y el acelerante AFA\_1602 (2% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) con el CEM I 52,5R han sido los acelerantes que han presentado valores más bajos de IF/FF. En los resultados de resistencia a la penetración también se ha puesto de manifiesto una mejor respuesta de la serie de acelerantes AFA\_16XX con el CEM I 42,5R, cuyos valores han sido superiores a los encontrados con el CEM I 52,5R. Entre ellos, con el CEM I 42,5R, ha sido el AFA\_1601 el acelerante que ha presentado una mayor resistencia a la penetración; con el CEM I 52,5R, ha sido el AFA\_1603.

Los valores de resistencia a compresión para ambos tipos de cemento han indicado que el AFA\_1603, (0% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), ha sido el acelerante que ha presentado valores más elevados en prácticamente todas las edades. Por otro lado, el AFA\_1600, acelerante que lleva mayor concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (4%), con el CEM I 42,5R, ha presentado valores bastante inferiores a los del AFA\_1603 hasta la edad de 7 días. A partir de los 28 días esta diferencia ha disminuido.

#### **5.3.4. Acelerantes AFA\_30XX**

##### Inicio/final de fraguado en pastas con acelerantes AFA\_30XX

Para el conjunto de pastas fabricadas con los acelerantes de la serie AFA 30XX, los tiempos de inicio y final de fraguado se sitúan en el intervalo comprendido entre 2 minutos y 7 segundos y 5 minutos y 30 segundos para mezclas con CEM I 42,5R, respectivamente. Para pastas fabricadas con CEM I 52,5R este intervalo se sitúa entre 50 segundos y 3 minutos y 35 segundos.

Respecto al CEM I 42,5R, la serie de acelerantes AFA\_30XX presentó una duración de fraguado superior en prácticamente todas las mezclas frente a las mezclas fabricadas con CEM I 52,5R, independientemente de la incorporación del superplastificante.

### Inicio/final de fraguado en morteros con acelerantes AFA\_30XX

La serie AFA 30XX han presentado una duración de fraguado en tiempos se sitúan entre 3 minutos y 30 segundos y 12 minutos y 20 segundos para CEM I 42,5R. Para el CEM I 52,5R la duración de fraguado se sitúa entre 3 minutos y 3 segundos y 13 minutos y 18 segundos, para el inicio y final de fraguado, respectivamente.

### Evolución térmica en pastas con acelerantes AFA\_30XX

Las mezclas AFA\_30XX han presentado temperaturas máximas muy similares en ambos tipos de cemento, con valores alrededor de 38 °C. El tipo de cemento ha presentado poca influencia respecto a los valores máximos de temperatura obtenidos. Las diferencias se refieren, fundamentalmente, al tiempo transcurrido hasta que se alcanza el pico de temperatura, el cual ha sido variable entre dos y cinco minutos.

### Evolución térmica en morteros con acelerantes AFA\_30XX

Para ambos tipos de cemento, la mezcla que ha presentado el valor más elevado de temperatura ha sido la AFA\_3000 con valores de 30,7 °C para el CEM I 42,5R y de 28,8 °C para el CEM I 52,5R.

Para el conjunto de temperaturas máximas medidas, el tiempo en que se alcanza la máxima temperatura ha sido próximo a los 10 minutos con el CEM I 42,5R y próximo a los 5 minutos con el CEM I 52,5R.

### Resistencias a flexión y compresión en morteros AFA\_30XX

Los resultados de resistencia a la flexotracción obtenidos en mezclas fabricadas con la serie de acelerantes AFA\_30XX han puesto de manifiesto que, respecto al CEM I 42,5R, la mezcla AFA\_3000 ha presentado valores superiores a las demás mezclas del grupo con un valor de 7,19 MPa a los 28 días. Por otra parte, los resultados presentados por las mezclas fabricadas con el CEM I 52,5R a los 28 días se han mantenido próximos a los 7 MPa si bien con menores dispersiones entre los mismos.

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos en los morteros fabricados con la serie de acelerantes AFA\_30XX y CEM I 42,5R han puesto de manifiesto que la muestra AFA\_3000 con 51,02 MPa, ha sido la que ha presentado mayor resistencia a los 28 días; las demás mezclas han presentado valores que se sitúan entre 40 y 50 MPa, aproximadamente.

Respecto al CEM I 52,5R la resistencia máxima la ha alcanzado la mezcla AFA\_3003 cuyo valor a los 28 días ha sido de 62,48MPa; las demás mezclas han presentado valores que se sitúan entre 53 y 56 MPa, aproximadamente.

#### Resistencias a la penetración en morteros AFA\_30XX

La muestra con acelerante AFA\_3000 y CEM I 42,5R se ha mostrado la más rápida. Esta ha presentado una resistencia a la compresión situada entre 0,22 y 0,48 MPa en 45 minutos desde su fabricación.

Respecto al CEM I 42,5R, las demás mezclas han presentado valores de resistencia a la penetración inferiores a las demás mezclas de la serie con CEM I 52,5R en los tiempos equivalentes.

En el caso del CEM I 52,5R, la mezcla que ha presentado mayor resistencia a la penetración ha sido la AFA\_3000 con valores de resistencia a la compresión equivalentes entre 0,43 y 0,76 MPa a partir de 1 hora y 15 minutos de su fabricación.

#### Análisis global de resultados relativos a la serie de acelerantes AFA 30XX

A nivel pasta los tiempos de IF/FF han presentado valores inferiores cuando se ha utilizado el CEM I 52,5R; por otra parte, las temperaturas no han presentado diferencias significativas.

A nivel mortero, los tiempos de IF/FF, para ambos tipos de cemento, ponen de manifiesto una tendencia creciente a medida que disminuye la concentración del DEAH, y, especialmente en el tiempo correspondiente al final de fraguado.

Respecto al ensayo de penetración, la resistencia a compresión estimada pone claramente de manifiesto una evolución más lenta de resistencias cuando disminuye la concentración de DEAH.

La evolución de resistencias a compresión es similar en ambos tipos de cemento, siendo los valores a largo plazo menores en el AFA\_3003, con nula concentración de DEAH.

#### **5.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Ya se ha dicho que este estudio es el inicio de la caracterización de los aditivos acelerantes para hormigón proyectado y por este motivo se han ensayado estos aditivos en pastas de cemento y en morteros.



A partir de este punto, el estudio de caracterización de los aditivos debe ampliarse de manera que se puedan obtener mayor cantidad de información. Por ejemplo, un ensayo que se deberá realizar en un futuro es el del estudio de retracción de estas pastas y morteros.

El paso siguiente es el de empezar a ensayar los acelerantes con hormigón proyectado por vía húmeda, con lo que esto implica, mayor espacio para los ensayos y el trabajo con áridos de tamaño menor a 12 centímetros.

Una vez ejecutados estos ensayos, obtenido los resultados y analizados estos, podremos caracterizar de manera más exacta estos aditivos acelerantes de nueva fabricación de la manera más óptima en su uso para el hormigón proyectado.

## REFERÉNCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

### BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

A. Lascorz, L. Agulló y T.Garcia

*Estudio relativo a la incorporación de aditivos químicos de última generación en el hormigón proyectado por vía húmeda.* Tesina de especialidad, ETSCCPB-UPC, 2002.

Hae-Geun Park et al.

*"Influence of a C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> mineral-based accelerator on the strength and durability of shotcrete"*. Cement and Concrete Research, 2007.

C. Paglia et al.

*"The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerator within cement systems"*. Cement and Concrete Research, 2001.

C.Maltese et al.

*"A case History: Effect of moisture on the setting behaviour of a Portland cement reacting with an alkali-free accelerator"*. Cement and Concrete Research, 2007

C. Maltese et al.

"Effects of setting regulators on the efficiency of an inorganic acid based alkali-free accelerator reacting with a Portland cement" Cement and Concrete Research, 2007.

C. Paglia et al.

"The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems". Cement and Concrete Research, 2001.

American Concrete Institute, ACI  
ACI-506 R, Guide to shotcrete, 1990.

American Society of Civil Engineers, ASCE  
Standard practice for shotcrete, 1995.

E.H.E 08, Instrucción de Hormigón Estructural  
Ministerio de Fomento, 2008.

Manuel Fernández Canovas  
Hormigón, Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos-Colección escuelas,  
1989.

Manuel Fernández Canovas  
Últimas tendencias en el hormigón proyectado, Revista Cemento-Hormigón nº 722,  
1993.

Rivas J.L

Túneles y Obras subterráneas. Sika S.A., 2001.

BASF Chemical Company  
Acelerantes para hormigón proyectado, 2002.

Annual Book of ASTM Standards  
Norma ASTM C 403 ("Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures  
by Penetration Resistance)

Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR  
*Norma EN 196/3 ("Métodos de ensayo de cementos. Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen")*

Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR  
*Norma EN 196/3 ("Métodos de ensayo de cementos. Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen")*

Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR  
*Norma EN 196-1 ("Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas")*

Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR  
*Norma UNE 83-603-93, Correspondencia entre las lecturas en  $K_p$  con valores de resistencia a compresión en MPa.*