



Escuela Técnica Superior de  
Arquitectura y Edificación  
Cartagena



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

**Grupo de Investigación de Ciencia y Tecnología Avanzada de la  
Construcción**

**Escuela Técnica Superior de Arquitectura y Edificación  
Universidad Politécnica de Cartagena**



**Trabajo Final de Máster**

## **Hormigones biológicos**

Autor:

**Federica Fiamingo**

Dirigida por:

**Dr. Carlos José Parra Costa**  
Arquitecto

**Dra. Isabel Miñano Belmonte**  
Ingeniero de Edificación

**Dr. Francisco Javier Benito Saorin**  
Ingeniero de Edificación

Cartagena, 9 de Octubre de 2017



## Sumario

|  |    |
|--|----|
| Resumen.....   | 5  |
| Abstract .....   | 7  |
| Capítulo 1. Introducción .....   | 9  |
| 1.1 ASPECTOS GENERALES.....  | 9  |
| 1.2 OBJETIVOS.....   | 12 |
| 1.2.1 Objetivos generales.....   | 12 |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....  | 12 |
| 1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....  | 12 |
| Capítulo 2. El Hormigón.....   | 15 |
| 2.1 INTRODUCCIÓN .....   | 15 |
| 2.2 COMPONENTES.....   | 16 |
| 2.3 MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN .....  | 19 |
| 2.4 ENSAYOS SOBRE EL HORMIGÓN.....   | 20 |
| Capítulo 3. Sostenibilidad de los hormigones biológicos .....                            | 25 |
| 3.1 INTRODUCCIÓN.....  | 25 |
| 3.2 BENEFICIOS DE LOS HORMIGONES SOSTENIBLES .....                                       | 26 |
| 3.2.1 Eficiencia energética .....  | 26 |
| 3.2.2 Aislamiento térmico .....  | 27 |
| 3.2.3 Edificios con certificación Leed .....   | 29 |
| 3.2.4 Jardín vertical sin estructura auxiliar y de poco<br>mantenimiento.....            | 32 |
| 3.2.5 Aislamiento acústico .....   | 35 |
| 3.2.6 Fachada descontaminante: absorbedor de dióxido de<br>carbono de la atmósfera ..... | 38 |
| 3.2.7 Bioindicadores: evaluar la calidad del aire con los líquenes<br>y musgos           | 39 |
| Capítulo 4. Los hormigones biológicos.....   | 43 |
| 4.1 INTRODUCCIÓN.....  | 43 |
| 4.2 CEMENTOS DE BAJO PH.....   | 44 |
| 4.2.1 Cementos de fosfato de magnesio .....  | 44 |
| 4.2.2 Cementos ácido-base .....  | 65 |
| 4.2.3 Empleo del café en los materiales de construcción .....                            | 68 |
| 4.3 CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS SOBRE FACHADAS.....                                       | 71 |
| 4.3.1 Organismos que pueden crecer sobre las fachadas de los<br>edificios                | 71 |
| 4.3.2 Colonización de los materiales pétreos de los<br>microorganismos.....              | 75 |

|  |     |
|--|-----|
| Capítulo 5. Fase experimental.....   | 79  |
| 5.1 INTRODUCCIÓN.....  | 79  |
| 5.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....   | 80  |
| 5.2.1 Introducción.....  | 80  |
| 5.2.2 Fichas técnicas.....   | 82  |
| 5.2.3 Determinación de la granulometría de las partículas del<br>árido empleado..... | 84  |
| 5.2.4 Difracción de Rayos X.....   | 88  |
| 5.2.5 Composición química.....   | 97  |
| 5.2.6 Componentes de traza de la composición.....                                    | 101 |
| 5.2.7 Análisis termogravimétrico.....  | 104 |
| 5.2.8 Análisis del pH de la materia prima.....                                       | 113 |
| 5.3 DOSIFICACIONES DE LAS PASTAS Y DE LOS MORTEROS.....                              | 118 |
| 5.4 ANÁLISIS DEL PH DE LAS PASTAS.....   | 125 |
| 5.5 ENSAYOS DE LOS MORTEROS EN ESTADO FRESCO.....                                    | 126 |
| 5.5.1 Determinación del pH durante el fraguado.....                                  | 126 |
| 5.5.2 Ensayo de consistencia (Slump-Flow).....                                       | 126 |
| 5.6 ENSAYOS DE LOS MORTEROS EN ESTADO ENDURECIDO ...                                 | 127 |
| 5.6.1 Ensayo de resistencia a compresión.....  | 127 |
| 5.6.2 Ensayo de retracción.....  | 129 |
| 5.6.3 Determinación del pH en estado endurecido.....                                 | 132 |
| 5.6.4 Ensayo de absorción de agua.....   | 133 |
| 5.6.5 Evaluación de la pérdida de peso.....  | 133 |
| Capítulo 6. Resultados y discusión.....  | 135 |
| 6.1 PH EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO.....  | 135 |
| 6.2 CONSISTENCIA.....  | 144 |
| 6.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....  | 146 |
| 6.4 RETRACCIÓN.....  | 152 |
| 6.5 ABSORCIÓN DE AGUA.....   | 155 |
| 6.6 PÉRDIDA DE PESO.....   | 159 |
| Capítulo 7. Conclusiones.....  | 163 |
| 7.1 INTRODUCCIÓN.....  | 163 |
| 7.2 CONCLUSIONES.....  | 163 |
| 7.3 TRABAJOS FUTUROS.....  | 165 |
| Bibliografía.....  | 167 |

## Resumen

El tema de la sostenibilidad ambiental desde el punto de vista del desarrollo de materiales de construcción ha llamado la atención de muchos investigadores, lo que ha originado un gran número de estudios sobre materiales innovadores en términos de sostenibilidad medioambiental.

En esta misma dirección se mueve este proyecto, teniendo como punto de partida el estudio artículos e investigaciones de la literatura técnica para estudiar los parámetros que permiten generar un material apto para crecimiento de las plantas. Las características que influyen en el comportamiento del hormigón en términos de bio-receptividad son: en el específico; la porosidad; y un pH bajo.

El hormigón por su naturaleza es un material altamente alcalino, con un pH valores entorno a 12,5. Para disminuir este valor se añaden a la masa aditivos como ligantes cementos de fosfato de magnesio.

Una vez hallada la composición y la dosificación para la fabricación del hormigón, la investigación se ha enfocado en la búsqueda de las especies de organismos que son capaces de crecer en el material realizado y que al mismo tiempo tienen capacidad de funcionar como indicadores de la calidad ambiental.

Terminadas estas fases de investigación y de preparación de las dosificaciones, se procede con las pruebas sobre los ensayos para medir las características mecánicas y químicas del material: medición del pH y de consistencia en estado fresco, mientras en estado endurecido pruebas de resistencia a compresión, de retracción, de absorción y otras.



## Abstract

The issue of environmental sustainability from the point of view of the development of building materials has attracted the attention of many researchers. Many studies on innovative materials in terms of environmental sustainability has been developed.

This project begins with the study of papers and other researches in order to achieve the parameters that make possible a material suitable for the growth of plants. Properties that influence the behavior of the concrete in terms of bio-receptivity are: the porosity and the low pH. As concrete is a highly alkaline material (very high pH), additives are needed to be added in order to reduce this high pH. Mortars used for the manufacture of biological concrete are those that have as binder magnesium phosphate cements.

Once that we found the composition and dosage for the manufacture of the concrete, we focused the research on specific species of plants that may can grow in the realized material and at the same time would be able to evaluate the environmental quality.

In the realized mortars specific tests have been carried out to measure mechanical and chemical properties of the material: pH and consistency measurements in the fresh state, while in the hardened state compressive strength, absorption, shrinkage and other tests.



# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 ASPECTOS GENERALES

El crecimiento urbano sobre el territorio de las ciudades europeas durante los últimos años, resultado de la extraordinaria expansión de la urbanización, ha causado un abuso de recursos y de suelo, llevando como consecuencia la falta de espacios urbanos verdes.

De tal manera las ciudades, y sobre todo sus cascos antiguos, no suelen tener suficiente verde urbano y a menudo no llegan tampoco a los valores mínimos de espacios verdes prescritos por las normas, con el resultado que las ciudades se hacen menos habitables en muchos aspectos.

En primer lugar, la ausencia de espacios verdes hace las ciudades más estériles estéticamente. La presencia de vegetación tiene efectos terapéuticos a nivel psicológico de los ciudadanos y además ofrece la oportunidad de percibir la diferencia entre las estaciones.

En términos energéticos la vegetación, gracias a la respiración de las plantas, ayuda a mantener una temperatura óptima de las ciudades, contribuyendo a evitar el actual fenómeno de las islas urbanas de calor, o sea de esas zonas edificadas que, a causa de la acumulación de calor debida a la construcción con materiales absorbentes, presentan temperaturas promedio más altas que el campo abierto que las rodea.

Una de las formas para mitigar este fenómeno es la instalación de fachadas verdes para que por un lado aumente la cantidad de verde urbano y por otro los cerramientos de los edificios no acumulen calor a lo largo de las horas de soleamiento y lo liberen durante la noche impidiendo que bajen las temperaturas.

Además, desde el punto de vista de la calidad del aire el uso de materiales como musgos o líquenes en fachada se puede considerar un instrumento de detección del nivel de contaminación de las ciudades, gracias a las propiedades de estos organismos, y podría incluso ser de ayuda para descontaminar el aire atmosférico, absorbiendo el dióxido de carbono.

A partir de estas consideraciones, se lleva a cabo una investigación sobre un material innovador para las fachadas de los edificios tal que pueda mejorar la estética y la calidad del aire de las ciudades. Este material es un hormigón de tipo biológico, es decir un material a base de Clinker en que se posibilita el crecimiento de plantas, en particular musgos y líquenes.

Las fachadas verdes no representan una innovación de los últimos años, ya que las primeras utilizaciones ocurren al siglo decimoquinto, aunque el empleo ha subido en el siglo decimoséptimo en Europa y hoy en día se ha extendido en todo el mundo.

La evidencia que este sistema no es innovador se encuentra en algunos datos estadísticos: por ejemplo, en Alemania uno sobre diez techos ya en el 1996 era realizado con este tipo de sistema y en Suiza el 70% de los edificios tenían el techo jardín. En Asia el desarrollo de este sistema ha aumentado en países como Japón, Singapur y Hong Kong.

Sin embargo, la integración de la vegetación en las fachadas últimamente ha arraigado en la construcción de arquitecturas renombradas.

En España el ejemplo más considerable es el Caixa Fórum de Madrid, diseñado los arquitectos Herzog y De Meuron. Para este edificio Patrick Blanc, creador de jardines verticales, ha revestido con una capa de verde una pared entera de 24 metros.

El mismo Patrick Blanc ha curado la instalación del jardín vertical del Musée du Quai Branly en París, o también el palacio del Ambassade de France en New Dehli o le Cheminée de France a la Défense en París.



**Figura 1.1 - Caixa Forum de Madrid**



**Figura 1.2 - Musée du Quai Branly en París**

Como estos dos edificios mencionados existe una grande variedad de ejemplos en arquitectura, y sobre todo dentro de la moderna y contemporánea se aprecia una tendencia hacia el diseño sostenible mediante integración de la vegetación con el edificio.

En los siguientes apartados serán descritos en los detalles los aspectos sobre los cuales se investigará en el trabajo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivos generales**

Este trabajo final de Máster consiste en el desarrollo y en el estudio de la composición y de la realización de un hormigón biológico. Para obtener este material se procede investigando las características que debe tener este material y, una vez terminada esta parte de investigación, se procede a la realización del material con tales características, tratando los varios efectos que tienen las adiciones.

Además, se investiga sobre las muchas especies de organismos para proceder a su implantación en el hormigón y verificar la compatibilidad entre estos y el “sustrato”.

Por último, se hacen las pruebas comunes de resistencia mecánica, de composición química y otras que estarán especificadas en las siguientes partes de la tesis.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un hormigón donde es posible el crecimiento de las plantas, estudiando por una parte las posibles composiciones y dosificaciones tales que las características sean compatibles con organismos vivos y por otra los organismos compatibles con sustratos minerales cual es el hormigón.

Se plantea finalmente una serie de ensayos para el conocimiento del comportamiento del hormigón a nivel químico y mecánico.

## **1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

Esta tesis se estructura en siete capítulos:

### 13 Hormigones biológicos

- El Capítulo 1, o sea el presente, es una introducción del proyecto, incluyendo los objetivos generales y específicos de esto.
- El Capítulo 2 es un capítulo general sobre el hormigón, en que se especifica dentro de los párrafos las características generales, las dosificaciones de los diferentes componentes, el método de fabricación y los ensayos que se realizan para definir las propiedades del material.
- El Capítulo 3 es una introducción sobre el hormigón biológico en términos de sostenibilidad, haciendo referencia a los beneficios que pueden dar los sistemas de fachada verde.
- El Capítulo 4 se centra sobre los hormigones biológicos, enfocándose sobre el estado del arte de hormigones de bajo pH, indispensable para la elección de los componentes de las mezclas que se realizarán en la fase experimental, y de las plantas compatibles con el hormigón.
- En el Capítulo 5 se desarrolla la fase experimental del proyecto, se enfoca sobre el programa del plan experimental y se describen los ensayos en estado fresco y endurecido.
- En el Capítulo 6 se muestran los resultados de los ensayos.
- El Capítulo 7 es el capítulo de las conclusiones extraídas del proyecto.



# Capítulo 2. El Hormigón

## 2.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material de construcción compuesto básicamente por cemento, agregados, agua y aditivos. Las características de estos componentes y sus relaciones cuantitativas y cualitativas determinan los requisitos del hormigón de tal manera realizado y, por consecuencia, sus posibles aplicaciones.

Dado el elevado número de variables, el resultado es que existe una grande variedad de mezclas. De hecho, además de los hormigones tradicionales, se realizan muchos compuestos resultados de investigaciones.

El hormigón tiene orígenes muy antiguos, ya que parece que los asirios y los egipcios emplearan este material para las construcciones. Asimismo, los griegos conocían esta técnica y la han utilizado para realizar acueductos, tanques y otras construcciones. Sin embargo, fue gracias a los romanos que este material llegó a ser utilizado en la mayoría de las obras; además, gracias a ellos empezaron a surgir estudios y escritos sobre la producción de la cal y de los conglomerados artificiales. Estudiosos de estos conglomerados fueron por ejemplo Marco Vitruvio Pollione, que en el “De Architectura” definió como “saxum caementitium” el bloque de agregados juntados por medio de un ligante. Por último, los romanos sustituyeron la arena con la puzolana. Durante los siglos siguientes, sobre todo durante la Edad Media, la evolución tecnológica paró y se volvió a producir nuevos materiales solo en el siglo XVIII, cuando John Smeaton descubrió la cal hidráulica insertando impurezas argilosas. El hito que llevó al cemento Portland fue la definición de la fórmula de la cal hidráulica por Vicar en el

1818, aunque el primero que realizó cemento hidráulico fue Joseph Aspidin, que patentó el cemento Portland en el 1824.

La evolución definitiva del hormigón se debe al cambio del hormigón por dosificación, para el cual el diseñador tenía que indicar las características de las mezclas para garantizar el  $R_{ck}$  querido, a hormigón por prestación, en el cual el diseñador tiene solo que indicar la resistencia, durabilidad y trabajabilidad queridas del hormigón. Este hito es muy importante porque hoy en día el hormigón es prefabricado industrialmente en las plantas de producción.

En fin, la calidad del conglomerado ha evolucionado ulteriormente, y sigue evolucionando, gracias a la introducción de aditivos que modifican el comportamiento y las prestaciones de las mezclas.

## **2.2 COMPONENTES**

El hormigón es el resultado de la mezcla de dos componentes: el conglomerante, o sea la parte que, como resultado de la reacción con agua, confiere solidez al conjunto porque actúa como ligante del material; el árido aglomerado, que consiste en arena de tamaño variable y que tiene la función de esqueleto portador.

Para la realización del hormigón, el cálculo de las relaciones de mezcla se efectúa basándose sobre los volúmenes de los componentes. En particular, la composición de 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional es realizada con los siguientes volúmenes:

- 0,15 m<sup>3</sup> de agua;
- 0,09 m<sup>3</sup> de cemento;
- 0,38 m<sup>3</sup> de arena;
- 0,38 m<sup>3</sup> de grava.

La composición del hormigón puede ser bastante variable, de hecho la exacta dosificación de sus componentes influye considerablemente sobre sus características mecánicas.

Estos componentes deben tener las siguientes características:

- áridos: pueden ser naturales (materiales de cantera, de río, etc.) o artificiales (escorias de alto horno, etc.). Deben ser homogéneos, limpios, de forma regular y sin impurezas; además, deben tener una resistencia adecuada, mayor de la del ligante. Para obtener un producto compacto y de buena resistencia, los tamaños deben responder a las curvas granulométricas, o sea deben ser de tamaño variables de manera que los elementos más pequeños ocupen el espacio libre entre los elementos más grandes.

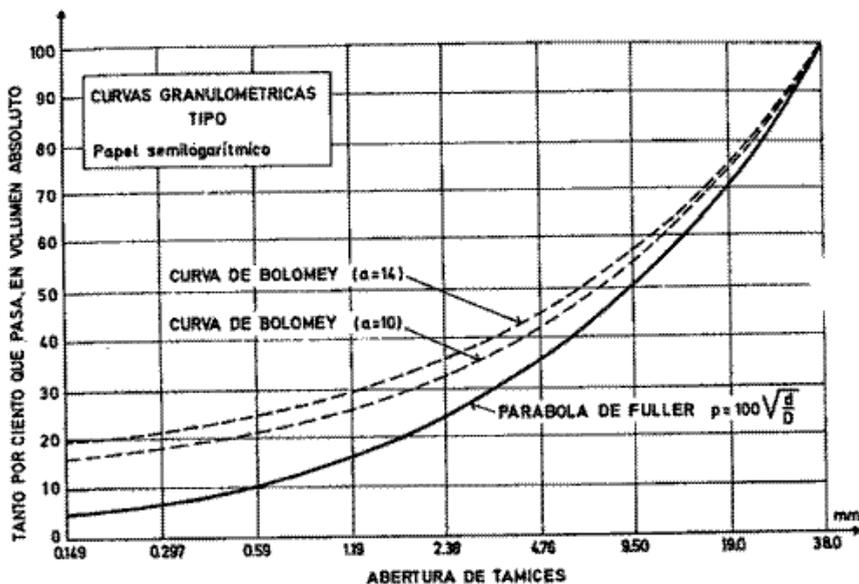


Figura 2.1 - Curvas gravimétricas

- agua: debe ser limpia, con la menor cantidad de sales posible y se debe cuidar la cantidad, dado que una cantidad excesiva tiene

la consecuencia de disminuir la resistencia, aumentar la retracción y la separación de los áridos.

- ligantes: los más importantes tradicionales son las en base cal, el yeso y los cementos. Los cementos en particular pueden ser de diferentes tipos: portland, puzolánico, de alto horno, aluminoso, a rápido endurecimiento, coloreados, etc. Según como se realiza el fraguado, se pueden clasificar en aéreas e hidráulicas.
- aditivos: son componentes cuya inclusión tiene como objeto modificar las propiedades de los conglomerados. Pueden tener diferentes funciones, de hecho se pueden emplear como acelerantes o retardadores, plastificantes, etc.

En esta investigación como árido ha sido utilizado lo de tipo calizo. Estos áridos, debido a su carácter básico, son los que adhieren mejor con los cementos y tienen un coeficiente de dilatación bajo. Además son muy económicos dado que son muy comunes en España.

Como ligante se han empleado el cemento Portland de tipo CEM I 52,5R, la ceniza volante y el cemento de fosfato de magnesio. El cemento Portland es un cemento de tipo hidráulico que se obtiene por la pulverización del clinker portland. En particular, el CEM I 52,5R siendo de tipo I está compuesto de clinker por un 95% y tiene una resistencia a compresión a los 28 días que supera los 52,5 MPa. La ceniza volante es el residuo de la combustión de carbón pulverizado en centrales térmicas y son sujetas a enfriamiento rápido. La consecuencia de esto es que los silicatos fundidos en el hogar no disponen del tiempo necesario para la cristalización, quedando en estado vítreo. Este es el fundamento de la actividad hidráulica de las cenizas volantes. Como establecido de la EHE, la ceniza volante solo se puede adicionar a cemento tipo CEM I. Los cementos de fosfato de magnesio son materiales generados por una reacción ácido-base rápida y exotérmica entre el óxido de magnesio (MgO) y fosfatos

solubles en agua y es un material que endurece rápidamente, que tiene buena adhesividad y que adquiere buenas propiedades mecánicas a tiempos cortos.

Entre los aditivos, en este trabajo se han utilizado el ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) y el bórax ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ) en forma cristalina, empleados como retardadores de fraguado en particular en los cementos de fosfato de magnesia. En particular, estos son empleados para retardar la hidratación del cemento a través de la formación de un film superficial de compuestos de borato de magnesio alrededor de los granos de magnesia. Tanto el ácido bórico como el bórax se presentan como un polvo blanco y ambos son levemente ácidos.

### **2.3 MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN**

Dado que no existe solo una tipología de hormigón, a pesar de que se puede confeccionar un número ilimitado de ellos en función de las características que se quieren obtener, hay que estudiar las proporciones en que hay que combinar sus diferentes componentes para conseguir mezclas que posean determinadas características de consistencia, compacidad, resistencia, durabilidad, etc.: para lograr este objetivo existen los métodos de dosificación.

No existe un único método de dosificación, ya que el logro de las prestaciones depende no solo de la cantidad de los materiales, sino también de las condiciones ambientales y de otros factores que influyen en las propiedades del hormigón.

En general, la determinación de las dosificaciones se basa en los tres tipos siguientes:

- según mezcla de sus componentes en volumen;
- por peso de sus componentes;

- en razón a las resistencias requeridas a los 7 y 28 días.

En función de las necesidades que tengamos, los parámetros de diseño son la relación agua/cemento, que gobierna la resistencia y la trabajabilidad, la cantidad y el tipo de cemento, el tipo de árido y su granulometría y, por último, los aditivos y adiciones.

En este trabajo las proporciones utilizadas son las correspondientes a las especificadas en la UNE-EN 196-1:2005: Methods for Testing Cement. Determination of strength, según el cual los componentes deben estar entre ellos en estas proporciones en peso:

**Tabla 2.1 - Dosificaciones establecidas por la UNE-EN 196-1:2005**

| <b>Material</b>                        | <b>Dosificación (g)</b> |
|--|-------------------------|
| <b>Cemento</b>                         | 450 ± 2                 |
| <b>Agua</b>                            | 225 ± 1                 |
| <b>Arena 0-5 mm (caliza triturada)</b> | 1350 ± 5                |

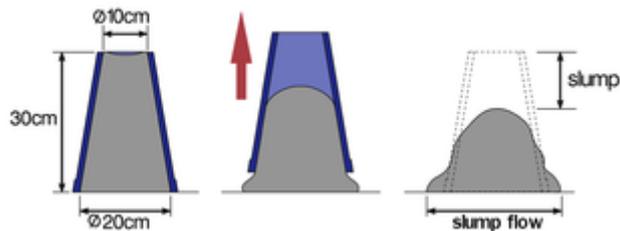
## **2.4 ENSAYOS SOBRE EL HORMIGÓN**

Después de haber decidido la dosificación del hormigón en relación con las características que debe alcanzar, el hormigón debe ser caracterizado en términos de sus propiedades mecánicas y químicas, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

En estado fresco principalmente se efectúa un control sobre la consistencia, mientras en estado endurecido las pruebas más ejecutadas son pruebas de evaluación de la resistencia mecánica y de durabilidad, aunque por exigencias particulares se pueden realizar otras pruebas.

La prueba de consistencia de los hormigones se realiza por medio del cono de Abrams, o sea, como establecido de la UNE-EN 12350-2:2006, un cono de chapa de 30 cm de altura y 10 y 20 cm de diámetro de base superior e inferior, respectivamente (Figura 2.2). Para proceder con la prueba, se pone la mezcla dentro del cono, lo cual se pone sobre una superficie lisa, plana y no absorbente y mediante una varilla de acero se dan 21 golpes

a la mezcla. Después que se hayan dado los golpes se levanta el molde y se miden mediante una regla graduada el diámetro y la altura a que se para la mezcla al final del descenso. El diámetro y la altura halladas permiten conocer la consistencia de la mezcla.



**Figura 2.2 – Prueba de consistencia mediante el cono de Abrams**

Las pruebas de resistencia mecánica se efectúan a los 28 días, cuando el hormigón haya terminado de endurecerse. El ensayo de resistencia a compresión se realiza en probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Después de rellenar las probetas con la mezcla debe efectuarse inmediatamente la compactación por vibración. Después de 28 días, se efectúa la prueba de resistencia a compresión: la probeta se pone dentro de una prensa y se aumenta gradualmente la presión sobre ella hasta que no se rompa, determinando de tal manera el valor de tensión que genera la rotura. Para efectuar el ensayo de resistencia a flexión se realiza una probeta prismática de hormigón y después de los 28 días se coloca esta sobre dos rodillos y se aplica una carga en los tercios de la luz.



**Figura 2.3 - Ensayos de resistencia a compresión (a) y a flexión (b)**

En función de evaluaciones específicas de cada trabajo será oportuno hacer otras tipologías de ensayos, diferenciados por categorías:

- ensayos de caracterización en estado endurecido:
  - módulo de deformación;
  - densidad;
  - relación entre densidad y resistencia a compresión a los 28 días;
  - resistencia a tracción;
  - resistencia a flexotracción.
- ensayos de durabilidad:
  - porosimetría por intrusión de mercurio;
  - absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido;
  - resistencia a la penetración de agua;
  - porosidad del hormigón;
  - profundidad de carbonatación;
  - penetración de los iones cloruro;
  - interfaz árido-pasta.

## 23 Hormigones biológicos

- ensayos de estabilidad dimensional:
  - evolución de la temperatura durante el fraguado;
  - pérdida de peso;
  - retracción.
- ensayos industriales:
  - resistencia al fuego;
  - resistencia al impacto.



# Capítulo 3. Sostenibilidad de los hormigones biológicos

## 3.1 INTRODUCCIÓN

La producción de los materiales que constituyen el hormigón convencional requiere la utilización de considerable energía y causa, además, grandes emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto, en un contexto histórico en que el objetivo principal es la minimización de los residuos y del desperdicio energético, ha determinado la intensificación de las investigaciones sobre la producción de hormigones más sostenibles.

En primer lugar, para obtener un hormigón sostenible es necesario disminuir los recursos utilizados, prefiriendo para su fabricación el parcial remplazo del cemento Portland con materiales de desecho, provenientes por ejemplo de la industria agroalimentaria (ceniza de caña común, arroz, maíz, etc.) o de plantas industriales (cenizas volantes, humo de sílice, escorias de alto horno, etc.): esto consiente reducir los gases de invernadero producidos por la industria del cemento y conjuntamente reducir los residuos.

Para designarlo como sostenible el hormigón debe al mismo tiempo proporcionar beneficios para los edificios y mejoras en el entorno urbano, ayudando a reducir la contaminación.

En esta óptica se sitúa el hormigón desarrollado en este trabajo que, gracias a la posibilidad de convertirse en sistema verde por el establecimiento y crecimiento de los organismos vegetales, permite obtener beneficios en términos de sostenibilidad ambientales, específicamente los que están listados y detallados en los siguientes apartados.

## **3.2 BENEFICIOS DE LOS HORMIGONES SOSTENIBLES**

### **3.2.1 Eficiencia energética**

Los hormigones sostenibles se pueden pensar como sistemas verdes, o sea como techos y fachadas verdes; así que, en cuanto sistemas verdes, hay la posibilidad de considerarlos estrategias de rehabilitación de espacios urbanos gracias a sus diferentes ventajas. En primer lugar, la presencia de vegetación tiene efectos terapéuticos a nivel psicológico de los ciudadanos, en cuanto mejora la estética y aumenta la calidad de las ciudades, con la ventaja de no ocupar espacio urbano destinado a las carreteras, utilizando superficies que serían en otros casos estériles.

A parte a nivel estético, la presencia de verde en fachada permite resolver el problema de las islas urbanas de calor, disminuyendo la temperatura de las ciudades.

De hecho, este fenómeno urbano es una situación de acumulación de calor por la gran cantidad de materiales absorbentes de calor en las zonas edificadas, los cuales aumentan la cantidad de energía que permanece en la atmósfera.

Diversos estudios muestran que hay una relación directa entre las altas temperaturas urbanas y la falta de vegetación y obviamente dentro de las causas de este fenómeno está la energía gastada por la refrigeración, actualmente utilizados en exceso porque, por un lado los cerramientos no son suficientemente eficaces y por otro porque ellos mismos forman parte de un círculo vicioso, ya que generan calor extra y su uso se incrementa con la temperatura.

La incorporación de sistemas de paredes verdes como componente integrada en el edificio permite minimizar la penetración de las radiaciones solares dentro del edificio, influyendo de tal manera en la temperatura

tanto del aire interior como la del ambiente exterior; por esta razón constituyen excelentes sistemas de ahorro de energía.

A seguir los resultados de algunas investigaciones llevadas a cabo sobre este tema.

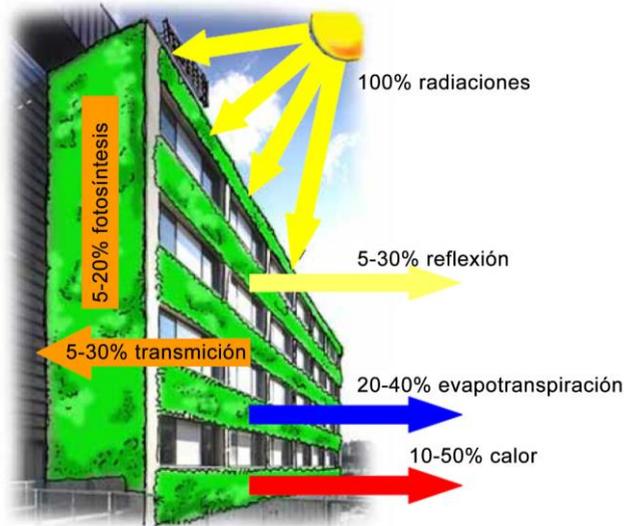
Si por un lado Akbari (2001) ha estimado que el incremento de temperatura de las ciudades de 0.5-3°C provoca un aumento del 5-10% de la de las cargas eléctricas debido a la sola climatización de los edificios, por otro lado Price (2010) ha hallado reducciones de las cargas de climatización entre un 1.4% y un 28.4% solo empleando sistemas verdes para fachadas.

Wong (2009) ha comparado las cargas de refrigeración del mismo edificio considerando su envolvente en un caso opaca y en otro caso añadiendo el sistema verde; de tal forma, ha encontrado una reducción del 74.29% de las cargas en el sistema en que había el verde integrado, demostrando de tal manera su eficiencia a nivel energético.

### **3.2.2 Aislamiento térmico**

Dentro de las ventajas de una fachada verde está el grado de aislamiento térmico que ofrece al edificio. Sobre este tema han sido realizadas muchas investigaciones, en las cuales es posible observar el potencial de estos sistemas de interceptar la radiación solar y reducir en consecuencia la temperatura de las superficies de las paredes del edificio.

La utilización de muros verdes ofrece al edificio un buen grado de aislamiento térmico, así que solo un pequeño porcentaje de radiación solar pasaría a través de la envolvente. En porcentaje, Ottelé (2011) ha estimado que de la radiación solar recibida el 5-30% es reflejado, el 5-20% es utilizado para la fotosíntesis, el 10-50% es convertido en calor, el 20-40% es usado para la evapotranspiración y solo el 5-30% pasa a través de la envolvente.



**Figura 3.1 – Esquemática del balance de energía en una fachada verde**

El ahorro energético de la fachada se realiza esencialmente gracias a la sombra ofrecida de las plantas, a la refrigeración consecuente a la evapotranspiración de las plantas, a la capacidad aislante de las capas del sistema y al efecto barrera para el viento.

Un resultado común de las investigaciones sobre el aislamiento térmico ofrecido del sistema es la reducción de temperatura del aire dentro el edificio aislado y de la radiación solar. Hoyano (1988) ha encontrado una reducción de radiación solar del 60% y consecuentemente una disminución de temperatura interior de 1-3° C. Valores de disminución de temperatura más elevados han sido obtenidos en otras investigaciones: Wong (2010) en sus experimentos en climas tropicales ha encontrado reducciones hasta 4.3° C, Ip (2010) ha obtenido valores de reducción de 3.5° C durante el día y de 5.6° C durante la noche; valores de reducción más elevados han sido encontrados de Pérez (2011), alcanzando valores de disminución de T de 15.2° C.

El beneficio logrado por este sistema depende del porcentaje de superficie recubierta de las plantas, como también del sustrato, de la orientación de la fachada, del color de las plantas.

Para determinar el beneficio en términos de aislamiento térmico se hace referencia al valor de transmitancia térmica  $U$ , definida como el inverso de la resistencia térmica de la envolvente del edificio. En estudios anteriores Krusche (1982) ha encontrado mejoras del aislamiento comparando el valor de  $U$  por la fachada sin capa de verde y el con capa de verde: resulta que este valor baja desde un 10% del valor inicial de  $U$  en las fachadas que tienen un mejor comportamiento térmico hasta un 33% para las fachadas con transmitancia más alta.

También las medidas hechas por Bartfelder y Köhler (1987) en fachadas verdes han llevado a resultados similares: midiendo de hecho la diferencia entre la temperatura de la fachada con capa verde y sin capa verde, han hallado una diferencia entre las dos hasta  $20^{\circ}$  C, el que significa que la fachada verde es capaz de absorber menos calor en comparación con la otra.

### **3.2.3 Edificios con certificación Leed**

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design – es un programa de certificación independiente que puede ser aplicado a todos los edificios, incluyendo tanto comerciales como residenciales, y se refiere a todo el ciclo de vida del edificio mismo, desde el diseño hasta la construcción.

Este programa ha sido desarrollado por la organización no profit U.S. Green Building Council (USGBC), que tiene como objetivo avanzar unas estrategias que permitan una mejora global en el impacto medioambiental. Este objetivo se consigue mediante una evaluación por parte de terceros de las características sustentables de un proyecto y dando un

reconocimiento a las performances que sean virtuosas en términos de salud humana y medioambiental.

La certificación LEED es válida para todos los tipos de construcción, incluyendo las construcciones nuevas de edificios comerciales, residenciales, de oficinas, rehabilitación de edificios existentes y desarrollo de vecindades.

El sistema de certificación LEED permite a los diseñadores de evaluar la estrategia que optimizar la relación entre edificio y entorno. Este se basa sobre la asignación de créditos, por 7 secciones diferentes, junto al cumplimiento de los requisitos que caracterizan la sostenibilidad de los edificios. La suma de los créditos de todas las secciones determina el nivel de certificación obtenido.

En seguida están listadas las secciones:



**Sitios sustentables:** durante el desarrollo de los proyectos hay que tener en cuenta del emplazamiento del proyecto, en términos de revitalización de terrenos abandonados, de cercanía al transporte público y al control de aguas.



**Uso eficiente del agua:** gestionar y utilizar el recurso agua de manera más eficiente, reutilizando el agua de lluvia y utilizando instalaciones sanitarias de bajo consumo.



**Energía y atmósfera:** se tiene que asegurar un ahorro energético en comparación con los estándares.



**Materiales y recursos:** para los proyectos se deben seleccionar materiales regionales, reciclados, renovables y certificados con sellos verdes.



Calidad del ambiente interior: en los edificios tiene que ser obtenida una alta calidad ambiental de los interiores, en términos de salubridad del aire, ventilación adecuada, consumo de energía, confort térmico y acústico.



Innovación en el diseño: el diseño de los edificios tiene que ser innovador y tener aplicaciones sostenibles.



Ubicación y transporte: los edificios tienen que ser construidos en sitios apropiados, reduciendo la distancia de desplazamiento de vehículos.

En el específico la aplicación de este hormigón en las fachadas de edificios nuevos o existentes puede ayudar los diseñadores a obtener una mayor cantidad de puntos para sus proyectos en lo que respecta algunos de los puntos listados previamente, en particular:

- Sitios sustentables: los edificios realizados con este material mejorarán la calidad de los sitios donde surgirán en cuanto la capa de hormigón biológico contribuye a absorber  $\text{CO}_2$ , a disminuir el smog, a reducir el efecto isla de calor de los centros urbanos y a aumentar la cantidad de verde dentro la ciudad.
- Energía y atmósfera: una capa de este hormigón permite ahorrar energía en cuanto las fachadas verdes tienen un óptimo efecto aislante, contribuyendo a reducir la demanda energética de un edificio;
- Materiales y recursos: para realizar este hormigón se utilizarán materiales reciclados como el corcho, la ceniza volante y materiales regionales.
- Calidad del ambiente interior: la posibilidad que crezcan plantas dentro de los cerramientos del edificio impide las infiltraciones de agua, aumenta el poder aislante acústico del cerramiento desde 3

hacia 8 dB, mantiene el edificio más fresco durante el verano protegiendo también de tal manera los materiales de construcción de las excursiones térmicas.

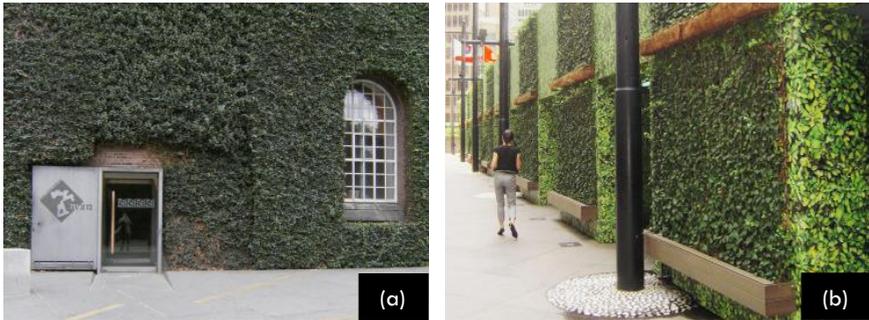
- Innovación en el diseño: los edificios que tendrán esta capa exterior serán más especiales desde el punto de vista estético en frente de la mayoría y además frente a los materiales tradicionales este cumple más funciones.

### **3.2.4 Jardín vertical sin estructura auxiliar y de poco mantenimiento**

La inserción de hormigón biológico como capa exterior del edificio equivale a la creación de un sistema de jardín vertical, que no es una creación innovadora, pero a diferencia de los jardines verticales tradicionales esto no necesita ninguna estructura de soporte, sino consiste en una capa única de hormigón verde.

Existen actualmente distintos sistemas de jardín vertical en función de la manera en que la vegetación puede ser insertada en la envolvente del edificio.

El primer sistema, denominado fachada verde, consta de enredaderas que crecen verticalmente a lo largo de las paredes. Este sistema se puede clasificar en directo, cuando la pared es el soporte y las plantas crecen directamente sobre esa, e indirecto, cuando el sistema incluye una estructura de soporte específica por la vegetación. El sistema indirecto se puede clasificar ulteriormente en continuo si hay una única estructura o modular si se utilizan elementos de soporte modulares.



**Figura 3.2 - Sistema verde directo (a) e indirecto (b)**

Se llaman muros vivos cuando la vegetación está perfectamente integrada con los muros, permitiendo recubrir la fachada con diferentes especies de plantas. Se realizan con paneles de diferentes materiales (plástico, poliestireno, metal, hormigón o barro) con vegetación y geotextiles que dan soporte a las plantas.



**Figura 3.3 - Muro vivo**

Se puede clasificar también este sistema en dos grupos: sistemas continuos, basados sobre la aplicación de pantallas permeables ligeras en las cuales las plantas están insertadas individualmente, y sistemas modulares, que consisten en el empleo de elementos de dimensiones específicas soportados

de estructuras modulares. Estos sistemas se distinguen entre ellos en función de la estructura:

- Bandeja: contenedores rígidos acoplables entre ellos, que contienen las plantas.
- Vasija: soportes para plantas que pueden atarse entre ellas verticalmente.
- Sembradora: consiste en contenedores para singlas plantas y estas no constituyen una capa continua, sino un revestimiento estético para insertar plantas.
- Bolsas flexibles: son contenedores flexibles y ligeros que tienen la función de insertar dentro de ellos las plantas y permiten aplicar el verde en superficies con formas diferentes.

Las investigaciones actuales sobre los muros verdes están enfocadas en el diseño de los sistemas de soporte, para obtener soluciones técnicas más eficientes en términos de mantenimiento e instalación.

### **Soportes**

Las fachadas verdes directas no suelen tener una estructura de soporte porque utilizan la capacidad de las enredaderas de adherir a la superficie vertical, aunque el riesgo de esta tipología de sistema es su caída debida a sí mismo a lo largo de su crecimiento.

Las fachadas verdes indirectas consisten prácticamente de una doble fachada y necesitan la aplicación de una estructura de soporte que puede ser modular o continua y que ayuda en el aumentar la resistencia del sistema contra las acciones medioambientales del viento y de la lluvia. La mayoría de las estructuras de soporte incluye guías modulares, como cables o enrejados en acero.

Los muros vivos continuos suelen incluir una estructura para poder contener los elementos y un soporte para las plantas. Los muros vivos continuos se

basan sobre la instalación de una estructura fijada al cerramiento del edificio, formando un espacio vacío entre el sistema y la superficie. La estructura contiene el panel base que, a su vez, soporta el estrato siguiente.

Los muros vivos modulares requieren una diferente estructura en función de la forma que lleva. Por ejemplo, la estructura con bandejas está formada por partes interconectadas de plástico o metal que suelen estar sujetadas a una estructura vertical o horizontal sujeta a la superficie; las bolsas flexibles también son sujetadas mecánicamente o encoladas a una estructura de la parte trasera fijada a la superficie del edificio en que las plantas están insertadas individualmente.

### **3.2.5 Aislamiento acústico**

La contaminación acústica es actualmente uno de los principales problemas medio ambientales, ya que deteriora los ecosistemas y aporta daño al sueño y a las actividades diarias. Cuando es imposible intervenir en la fuente de ruido, el único método para disminuir el nivel de ruido, pues para proteger a la población, es la construcción de barreras acústicas.

De hecho, incluso la ley actual cuida mucho este aspecto de la vida de los ciudadanos. En España el documento básico HR de protección frente al ruido tiene el objetivo de limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios, de manera que los elementos constructivos que conforman sus recintos tengan unas características acústicas adecuadas para reducir la transmisión del ruido en todas sus formas. Para dar una adecuada respuesta a la exigencia básica de protección frente al ruido, en la elaboración del DB-HR se ha perseguido el objetivo de elevar los niveles de aislamiento acústico en la edificación en respuesta a una demanda social generalizada.

Para reducir la polución acústica, se diseñan las barreras acústicas. Existen diferentes tipologías de barreras acústicas, naturales o artificiales, que tienen diferentes niveles de eficacia. Una barrera tiene la función de obstaculizar la transmisión del ruido absorbiendo parte de la energía sonora que le llega, pues es eficaz en el momento en que la potencia sonora que se transmite por esta es despreciable frente a la transmitida por vía aérea. La eficacia de una barrera sonora es medida y expresa por medio de la atenuación de los decibelios, definida como la diferencia entre el nivel de presión sonora que llega al punto donde se encuentra el receptor y el nivel que se encuentra en la misma posición con la barrera.

En cuanto a las barreras vegetales contra el ruido hay diferentes tipologías, como la utilización de árboles protectores de fachadas, pantallas y vallas acústicas, terraplenes recubiertos de vegetales y finalmente bioparedes, que son el objeto de esta investigación.

En general estas tipologías de barreas necesitan espacios más amplios y resultan mediamente menos eficaces frente a las barreras artificiales, pero son una solución ecológica a la contaminación acústica y mejoran el impacto visual de las estructuras.



**Figura 3.4 – Fachada verde como aislante acústico**

La ventaja de las bioparedes con respecto a los otros sistemas de protección vegetales es que consiguen ofrecer una protección frente al

ruido sin necesitar de espacio que en algunos casos no sería disponible y en otros sería quitado a las infraestructuras.

Actualmente existen ya diferentes sistemas patentados de bioparedes utilizadas para absorber ondas acústicas (por ejemplo la Greensonic® patentada por la HTG (Figura 3.5)) pero todos los sistemas están formados por una parte de soporte a la pared y otra de verde. El objetivo de esta investigación es crear un sistema patentado de biopared que, pero, no necesite soporte convirtiéndose al contrario en una capa integrante de las paredes.



**Figura 3.5 - Biopared Greensonic®**

A la atenuación del ruido contribuyen las hojas de las plantas, la capa de hormigón que aloja las raíces y las raíces mismas. Además, la inclusión del corcho dentro el hormigón permite obtener una mayor absorción de ruido, ya que es uno de los materiales naturales que mejor funciona como aislante acústico.

Las hojas de las plantas absorben las ondas sonoras, sobre todo las de altas frecuencias.

De todas maneras, la inserción de una capa de hormigón para la realización de tabiques equivale a incrementar la masa; la influencia de la masa de la pared, referida a unidad de superficie, es preponderante en el frenado de la propagación de las ondas sonoras: la excitación por las ondas incidentes es tanto más difícil cuanto más masiva es la pared.

$$R = 20 \log\left(\frac{M\pi f}{Z}\right) \quad (\text{Ley de la masa})$$

Las raíces contribuyen a la absorción de las ondas sonoras dado que disminuyen la porosidad del hormigón.

En una investigación conducida por Nyuk Hien Wong (2010) se estudió el comportamiento acústico de la fachada cambiando por un lado el porcentaje de fachada recubierta de vegetación y por otro también la especie de plantas. Generalmente esta tecnología muestra una atenuación mayor a las medio-bajas frecuencias respecto a las altas frecuencias, aunque no todos los sistemas dan una buena reducción del sonido. Entre los sistemas que han sido utilizados, la reducción máxima a que se llega es de 10 dB, pero en media no se superan los 4 dB. En cambio, la absorción acústica ofrecida de estos sistemas es muy alta comparada a otras tecnologías para fachadas y además esta crece al aumentar de las frecuencias y al aumentar del porcentaje de fachada recubierta.

### **3.2.6 Fachada descontaminante: absorbedor de dióxido de carbono de la atmósfera**

En los últimos años el diseño y la realización de edificios ha recibido una interpretación en clave sostenible, con la consecuencia que en ellos se encuentran soluciones tecnológicas enfocadas en la conservación y la regeneración del medio ambiente. En este sentido una solución adoptada es la integración de la vegetación en muchas formas en los edificios: desde la inserción de árboles, arbustos de grandes y pequeñas dimensiones y

plantas en edificios de grande y pequeña altura hasta el proyecto de techos verdes y jardines verticales.

Todas estas soluciones han sido elegidas ya que los arquitectos están siempre más orientados hacia proyectos más sostenibles. A nivel técnico, de hecho, las aportaciones de la vegetación son muchas, en particular la purificación del ambiente, gracias a la absorción de CO<sub>2</sub>. El funcionamiento deriva simplemente de la fotosíntesis de las plantas, por la cual el dióxido de carbono contenido en la atmósfera reacciona con agua y luz produciendo azúcar, que se convierte en su nutrimento, y oxígeno, que será devuelto al aire.

En particular, los musgos, algas y líquenes son más capaces de disminuir el carbono presente en la atmósfera, gracias a su capacidad de captar y absorber el CO<sub>2</sub> y también el nitrógeno. El nitrógeno en particular lo necesitan los líquenes para la formación de proteínas y ácidos nucleicos y los cianolíquenes y por esto son capaces de fijar el N<sub>2</sub> debido a que llevan una cianobacteria como fotobionte asociado.

### **3.2.7 Bioindicadores: evaluar la calidad del aire con los líquenes y musgos**

Los líquenes son organismos vivientes compuestos de dos partes que viven en simbiosis: un hongo y un alga. La ventaja de estos organismos es que pueden sobrevivir en todos los ambientes gracias a sus características morfológicas y fisiológicas, desde los naturales hasta los artificiales. Por esta razón los líquenes se establecen a parte en el terreno en muchos diferentes sustratos, como la corteza de los árboles, las rocas y las superficies producidas por la actividad humana, creando una pátina sobre estas superficies, aunque, con respeto a las fachadas de edificios vetustos y a los monumentos, este fenómeno es negativo ya que disgregan el soporte a que se pegan.

El incremento de la contaminación en las ciudades debido a la calefacción doméstica, al tráfico de coches y a las fábricas tiene la consecuencia de la necesidad de evaluar la calidad del aire. Uno de los métodos utilizados para este tipo de evaluación es el empleo de musgos y líquenes, gracias a su particular sensibilidad a sustancias tóxicas como dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Pues el desarrollo de un hormigón a utilizar para las fachadas sobre todo de edificios en cascos antiguos puede ser de ayuda para el desarrollo de mejoras de una ciudad desde el punto de vista medio ambiental.

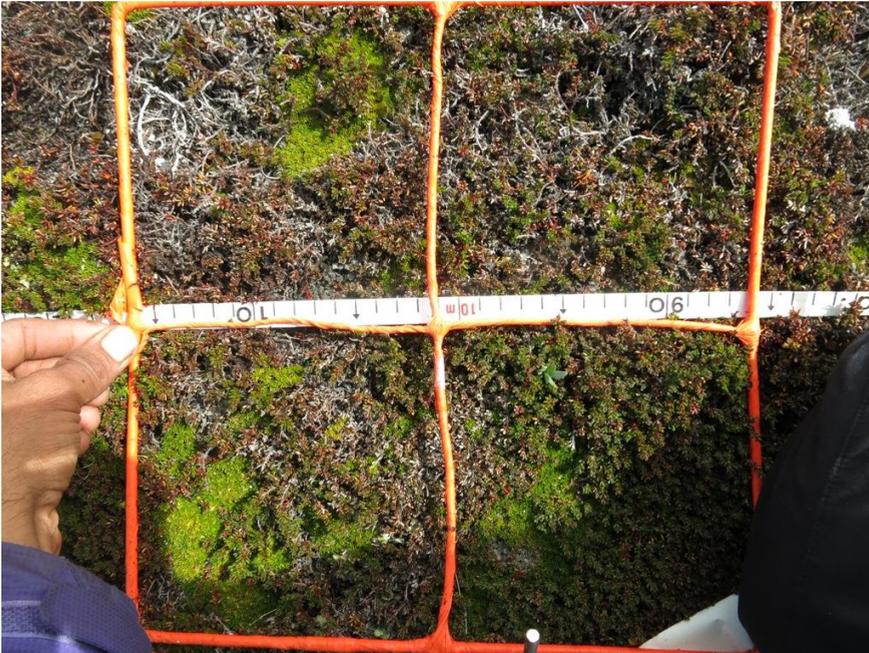
Para evaluar la tasa de contaminación atmosférica mediante los líquenes se utilizan índices cuantitativos, relacionados con la evaluación de la diversidad de especies presentes, teniendo en cuenta el número, frecuencia o cobertura de las especies de líquenes epífitos en un territorio dado. El más utilizado es el índice de pureza atmosférica (IPA), que es un método basado sobre la medición de la biodiversidad, teniendo en cuenta que las sustancias contaminantes provocan una disminución del número de especies y de su frecuencia. El índice de pureza atmosférica es la suma de las frecuencias de las especies de líquenes dentro de un retículo (Figura 3.6).

Las sustancias tóxicas detectadas de los líquenes y musgos son muchas y en el específico están aquí listadas:

- radionucleidos
- azufre
- flúor
- hidrocarburos clorurados
- metales
- polvos sutiles y humos
- cadmio
- cromo
- níquel

## 41 Hormigones biológicos

- manganeso
- plomo
- vanadio
- cinc
- elementos radiactivos (cesio 137)



**Figura 3.6 – Método del índice de pureza atmosférica (IPA)**

De hecho, los líquenes tienen la capacidad de conservar incluso en sus partes muertas la memoria histórica de los agentes contaminantes.

Las principales características que hacen que los líquenes sean buenos indicadores de contaminación atmosférica son las siguientes:

- capacidad de absorción y de almacenamiento de sustancias de la atmósfera;
- resistencia a los estreses medioambientales;
- incapacidad de deshacerse de las sustancias contaminantes;
- crecimiento lento y longevidad de los líquenes;

- sensibilidad a los agentes contaminantes.

No todas las especies de líquenes y musgos presentan la misma tolerancia por las sustancias contaminantes, por esto, utilizando diferentes especies de líquenes, gracias a algunas escalas de tolerancia de estas es posible hacer mapas de contaminación de las ciudades.

Las ventajas del empleo de los líquenes como bioindicadores dentro la capa de hormigón de los edificios son la economicidad del método de evaluación de la calidad del aire y la posibilidad de obtener de manera rápida una estimación de las áreas a mayor riesgo debido a sustancias tóxicas.

# Capítulo 4. Los hormigones biológicos

## 4.1 INTRODUCCIÓN

Para permitir y favorecer el crecimiento de las plantas sobre las fachadas es indispensable tanto que el hormigón tenga características químicas y físicas aptas a esa función como que los organismos vegetales sean idóneos a crecer en las condiciones ofrecidas del hormigón.

En cuanto al sustrato, o sea al hormigón, el parámetro que hay que controlar es el pH. Este, indicando la concentración de iones hidrógeno  $[H]^+$  en una solución, mide su acidez o alcalinidad. El pH varía entre 0 y 14 y así una solución se define ácida si el pH es muy bajo (entre 0 y 4), neutra si el pH está entre 5 y 7, y alcalina si el pH es alto (entre 8 y 14). El hormigón es un material muy alcalino, ya que su pH gira alrededor de 12-13. Las plantas para crecer necesitan de un suelo que no es ni demasiado ácido ni demasiado alcalino, entonces que tiene el pH tiene que tener valores cercanos a 5-7, entonces han sido desarrollados en las investigaciones de los últimos años diferentes tipologías de cemento para bajar el pH del hormigón.

En el parágrafo 4.2 se pasa revista a algunas tipologías de hormigones de bajo pH sobre los cuales se ha investigado en los años, centrándose sobre las composiciones de mezclas elaboradas y los resultados conseguidos en unas investigaciones.

Entre los hormigones desarrollados están los que tienen como ligantes cementos de fosfato de magnesio, que han sido utilizado también para la fabricación de hormigones biológicos para fachadas.

Junto con la realización de cementos de fosfato de magnesio en el mercado son presentes cementos a bajo pH, incluso con pH muy ácido, que son cementos ácido-base, adoptados principalmente como cementos dentales.

Por último, el uso de los posos del café como corrector del pH ha sido tomado de las ciencias agrarias, dado que en ellas es empleado para corregir el pH de suelos alcalinos.

En el parágrafo 4.3 se describirán la interacción entre los organismos biológicos y los materiales a que adhieren, centrándonos sobre las familias de organismos capaces de establecerse sobre sustratos minerales y las propiedades que debería tener el sustrato para favorecer el crecimiento de los organismos.

## **4.2 CEMENTOS DE BAJO PH**

### **4.2.1 Cementos de fosfato de magnesio**

Los cementos de fosfato de magnesio son materiales generados por una reacción ácido-base entre el óxido de magnesio ( $MgO$ ) y fosfatos solubles en agua. Tradicionalmente el cemento de fosfato de magnesio se prepara añadiendo a la mezcla el fosfato monoamónico (ADP). Esto tiene la desventaja de emitir amoníaco, altamente corrosivo; por esta razón este ha sido substituido con el fosfato de potasio monobásico, consiguiendo como producto el MKCP.

Dentro de todas las mezclas de fabricación de este cemento, ya que la reacción ácido-base es muy exotérmica y sobre todo muy rápida (en el caso de utilización del ADP aún más), se suele poner un aditivo retardante, como el bórax.

El producto final de la reacción entre la magnesia y el fosfato monoamónico es la estruvita ( $MgKPO_4 \cdot 6H_2O$ ), mientras la reacción con el fosfato de potasio monobásico es la K-estruvita, que es isoestructural o sea tiene una

estructura parecida, pero en literatura son presentes estudios (Qiao et al. (2016), Ma et al. (2014), Xu et al. (2015), etc.) donde se ha demostrado que el fosfato dihidrato de potasio tiene una constante de disociación menor y una solubilidad más baja, permitiendo de tal manera reacciones más lentas y así obtener cristales más estables.

A continuación se presentan los artículos sobre los cementos de fosfato de magnesio que constituyen el estado del arte de este trabajo, detallando por cada uno las dosificaciones empleadas (a que se recurrirá durante la fase experimental del trabajo) y los correspondientes resultados (que serán comparados con los que se obtendrán al final del trabajo).

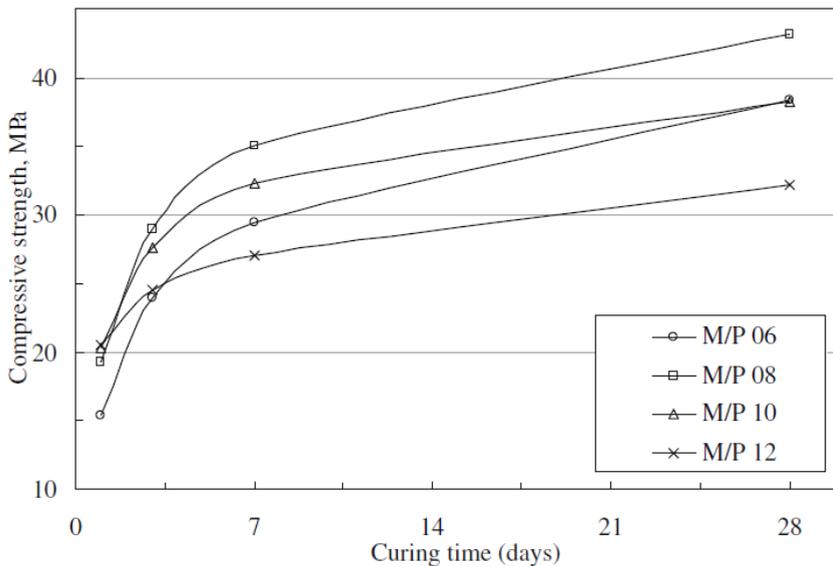
#### **Qiao et al. (2016)**

En la investigación llevada a cabo por el grupo de investigación de Quiao (2016) han sido evaluadas las propiedades del mortero de fosfato de magnesio. El mortero ha sido preparado mezclando magnesia calcinada (MgO) con fosfato de potasio monobásico o KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), aunque para todos los ensayos un 20% de la magnesia ha sido reemplazada de ceniza volante. Los otros componentes de las mezclas son agua potable y arena. Se añadió en todas las mezclas el bórax como retardante.

Las dosificaciones están resumidas en la Tabla 4.1.

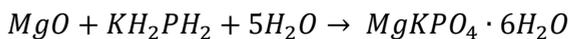
**Tabla 4.1 - Dosificaciones de los morteros de Quiao et al. (2016)**

| Mg/P<br>[g/g] | Bórax/Mg<br>[g/g] | Arena/(Mg+P+B)<br>[g/g] | Agua/(Mg+P+B)<br>[g/g] |
|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| 6             | 7,5               | 1,5                     | 0,20                   |
| 8             | 7,5               | 1,0                     | 0,16                   |
| 8             | 7,5               | 1,5                     | 0,20                   |
| 8             | 7,5               | 2,0                     | 0,23                   |
| 10            | 7,5               | 1,5                     | 0,20                   |
| 12            | 7,5               | 1,5                     | 0,20                   |



**Figura 4.1 - Resistencia a compresión obtenida por Quiao et al. (2016)**

Los resultados encontrados en esta investigación son que la resistencia a compresión y a flexión dependen de la relación Mg/P. Esta relación no modifica la resistencia a compresión a edades tempranas. A mayores edades las mezclas con una relación Mg/P iguales a 8 y 10 aumentan de manera importante. En particular la mezcla que desarrolla una resistencia más alta es la que tiene una relación Mg/P igual a 8. Este resultado puede ser justificado del hecho de que, como muestra la ecuación de reacción de cristalización



para que pueda darse una reacción completa la relación entre MgO y  $KH_2PH_2$ , la relación Mg/P debe ser igual a 1, pero sin embargo el aumento de magnesio en un compuesto permite mejorar la resistencia porque solo reacciona con el KDP (la magnesia superficial) mientras la magnesia que no reacciona contribuye a aumentar de resistencia. Sin embargo, un contenido muy elevado de magnesia puede afectar negativamente porque

puede reducir las uniones de los componentes. Por esta razón, en principio los cementos con relación Mg/P de 8 y 10 son más resistentes mientras a lo largo del tiempo los cementos caracterizados por Mg/P de 6 y 8 desarrollan más resistencia (Figura 4.1).

Resultados similares se obtuvieron para la resistencia a flexión por las mismas razones.

Qiao evidenció también la rapidez en fraguar de estos morteros, sobre todo aumentando la relación Mg/P disminuye el tiempo de fraguado. La explicación de esto es que cuando se mezclan fosfato de potasio y magnesia con el agua, el fosfato se disuelve inmediatamente creándose un ambiente acuoso ácido en el cual luego se disuelve la magnesia (que es básica): con esta reacción se forman los cristales. El tiempo de fraguado es más corto con Mg alto porque la magnesia aumentaría el pH del ambiente de reacción que acelera la reacción entre magnesia y fosfato.

#### Ma et al. (2014)

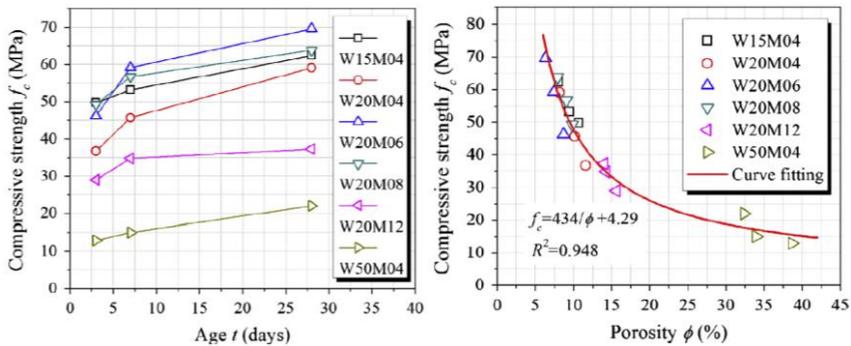
En la investigación conducida por Hongyan Ma (2014) se realizó una pasta de fosfato de magnesio empleando magnesia calcinada a 1500° C durante 5 h y con una pureza del 95.1%, fosfato de potasio monobásico o KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) y agua desionizada, en las dosificaciones de la Tabla 4.2. No se utilizó ningún retardante.

**Tabla 4.2 - Dosificaciones de las pastas de Ma et al. (2014)**

| Nombre pasta  | Mg/P<br>[g/g] | Mg<br>[g] | P<br>[g] | Agua/(Mg+P)<br>[g/g] | Agua<br>[g] |
|---------------|---------------|-----------|----------|----------------------|-------------|
| <b>W15M04</b> | 4             | 161,2     | 136,09   | 0,15                 | 44,59       |
| <b>W20M04</b> | 4             | 161,2     | 136,09   | 0,20                 | 59,46       |
| <b>W20M06</b> | 6             | 241,8     | 136,09   | 0,20                 | 75,58       |
| <b>W20M08</b> | 8             | 322,4     | 136,09   | 0,20                 | 91,70       |
| <b>W20M12</b> | 12            | 483,6     | 136,09   | 0,20                 | 123,94      |
| <b>W50M04</b> | 4             | 161,2     | 136,09   | 0,50                 | 148,64      |

Los resultados obtenidos están resumidos en la Figura 4.2 y muestran que para una misma relación Mg/P, aumentar la relación agua/cemento comporta una disminución de la resistencia.

La mayor resistencia alcanzada en la citada investigación corresponde a un ratio Mg/P de 6 y, como en la investigación anterior, la menor resistencia es obtenida por el mortero con relación Mg/P más elevada. Esto sucede porque, como se muestra en la Figura 4.2(b), el mortero con Mg/P igual a 6 alcanza menor porosidad, mientras el con Mg/P igual a 12 la mayor. Lo cual es obvio dado que la optimización de la relación Mg/P contribuye a densificar el material minimizando los productos no hidratados.



**Figura 4.2 - Resistencia a compresión de los morteros (a) y relación entre su resistencia y su porosidad (b)**

#### **Xu et al. (2015)**

Para la evaluación de la influencia de la relación molar entre magnesia y fosfato en la microestructura, las propiedades mecánicas y térmicas de las pastas de fosfato de potasio, Xu (2015) en su estudio ha comparado sus resultados con los de Chau (2011) y Li (2014). Chau y Li han hallado como resultado que una mayor relación M/P puede facilitar la formación y crecimiento de cristales de K-estruvita; de hecho, Li ha realizado las mezclas variando M/P entre 3 y 6 y obteniendo que el valor óptimo que permite obtener resistencias a compresión y a flexión más altas es 4, mientras Chau

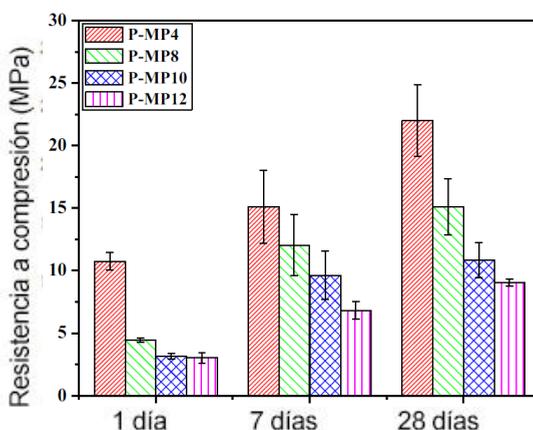
ha observado como aumentar Mg/P de 2 a 10 podría mejorar la resistencia a compresión.

Se realizaron pastas de fosfato de magnesio empleando magnesia calcinada a 1500° C durante 5 h y con una pureza del 95.1%, fosfato de potasio monobásico o KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) y agua desionizada, en las dosificaciones de la Tabla 4.3. Aquí, como antes, no se utilizó ningún retardante.

**Tabla 4.3 - Dosificaciones de las pastas de Xu et al. (2015)**

| Nombre pasta  | Mg/P<br>[g/g] | Mg<br>[g] | P<br>[g] | Agua/(Mg+P)<br>[g/g] | Agua<br>[g] |
|---------------|---------------|-----------|----------|----------------------|-------------|
| <b>P-MP4</b>  | 4             | 161,2     | 136,09   | 0,5                  | 148,645     |
| <b>P-MP8</b>  | 8             | 322,4     | 136,09   | 0,5                  | 229,245     |
| <b>P-MP10</b> | 10            | 403,0     | 136,09   | 0,5                  | 269,545     |
| <b>P-MP12</b> | 12            | 483,6     | 136,09   | 0,5                  | 309,845     |

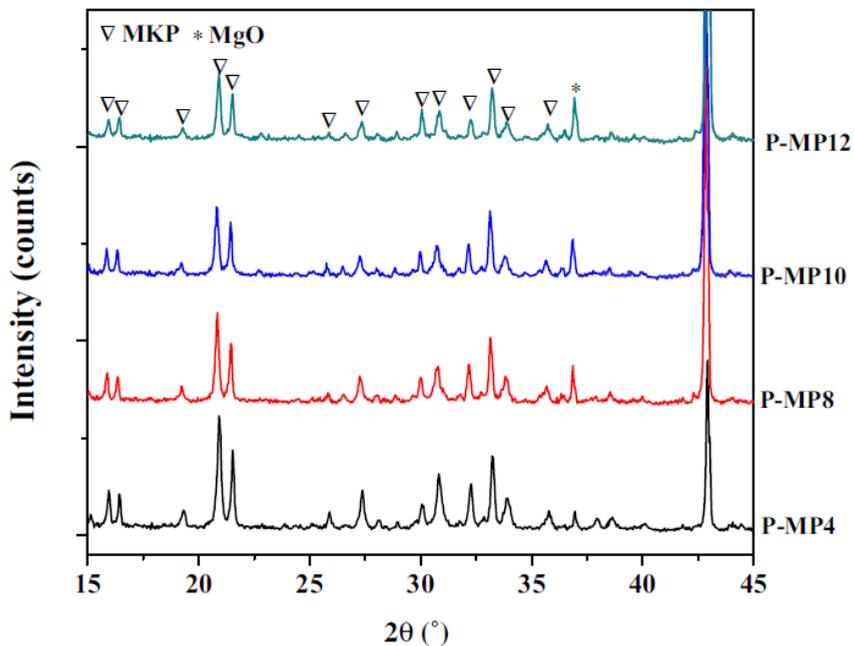
Los resultados encontrados en la investigación están resumidos en la Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5.



**Figura 4.3 – Resistencia a compresión de las pastas de Xu et al. a 1, 7 y 28 días**

Como se observa en la Figura 4.3, en esta investigación se ha encontrado como resultado que resistencia a compresión disminuye aumentando la relación Mg/P, en el específico en comparación con P-MP4 ella disminuye

del 31.03%, 50.75% y 58.79%, para P-MP8, P-MP10 and P-MP12 respectivamente. Esta conclusión está de acuerdo con la de Qiao (2016), para la cual un incremento del potasio con relación al magnesio empeora los enlaces químicos y la adhesión, aunque por otro lado la magnesia constituye la parte resistente. Además, como ilustrado en el difractograma de la Figura 4.4, sabiendo que a  $2\theta = 21^\circ$  corresponde la K-estruvita, se observa como las pastas con bajas relación Mg/P exhiben este pico más evidente, por lo tanto se forman más cristales.



**Figura 4.4 – Difractogramas de XRD de las pastas a los 28 días**

Por la misma razón la resistencia a tracción tiene la misma tendencia a disminuir con el aumentar de la relación Mg/P (Figura 4.5).

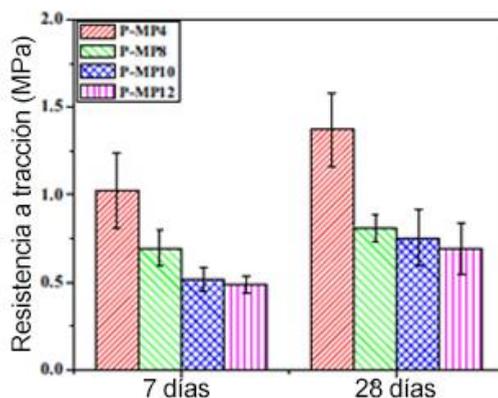


Figura 4.5 - Resistencia a tracción de las pastas a 7 y 28 días

#### Shijian et al. (2014)

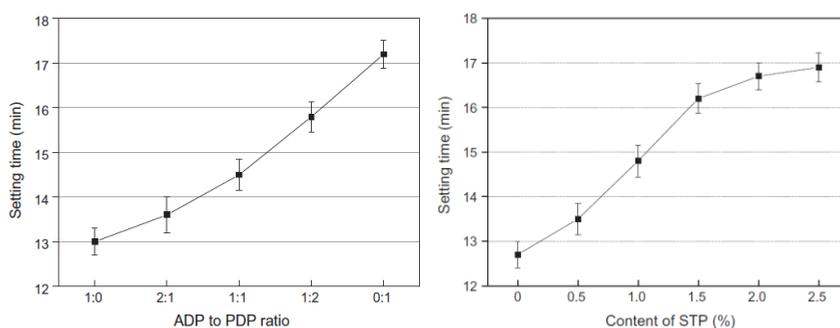
En la investigación de Shijian (2014) se ha estudiado la diferencia en términos de prestaciones de las mezclas realizadas con dos diferentes tipos de fosfato: el fosfato monoamónico (ADP) y el fosfato dihidrato (PDP) de potasio. Además, en las varias mezclas se añaden diferentes cantidades de tripolifosfato de sodio (STP,  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ) para estudiar su influencia en las prestaciones. Las series de fosfato de magnesio han sido preparadas con magnesia calcinada a  $1500^\circ\text{C}$  durante 6 h, ADP y/o PDP, cenizas volantes, bórax y tripolifosfato de sodio (STP).

Tabla 4.4 - Dosificaciones de los morteros de Shijian et al. (2014)

| Nombre serie | ADP<br>PDP<br>[g/g]           | Mg<br>P<br>[mol/mol] | C.V.<br>Mg<br>[g/g] | Agua<br>(Mg+P)<br>[g/g] | Arena<br>Mg<br>[g/g] | STP<br>Mg<br>[g/g]                 | Bórax<br>Mg<br>[g/g] |
|--------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|
| M1           | 1:0, 2:1,<br>1:1, 1:2,<br>0:1 | 5:1                  | 0,4                 | 0,1                     | 1,9:1                | 0                                  | 3,5                  |
| M2           | 1:0, 2:1,<br>1:1, 1:2,<br>0:1 | 5:1                  | 0,4                 | 0,1                     | 1,9:1                | 1,5                                | 3,5                  |
| M3           | 1:1                           | 5:1                  | 0,4                 | 0,1                     | 1,9:1                | 0,<br>0,5,<br>1,5,<br>2,<br>2,5, 3 | 3,5                  |

Para investigar los efectos del STP y la influencia que tienen el ADP y el PDP sobre las propiedades del MPC, las mezclas han sido divididas en tres series (Tabla 4.4):

- M1, donde no hay STP en el compuesto;
- M2, que tienen las mismas proporciones de ADP y PDP, pero se añade al compuesto una cantidad fija de STP;
- M3, en que hay la misma cantidad de ADP y PDP, pero es variable la cantidad de STP.



**Figura 4.6 - Variación del tiempo de fraguado en función de ADP/PDP (a) y del contenido de STP**

Aumentando el PDP en el compuesto aumenta el tiempo de fraguado (Figura 4.6 (a)), dado que el PDP tiene una solubilidad más baja y por esto la reacción ácido-base es más lenta. El aumento de STP también equivale a aumentar el periodo de fraguado (Figura 4.6 (b)), ya que eso tiene el efecto de retardante equivalente al bórax. En términos de pH, cuanto más STP hay más aumenta el pH del compuesto.

En cuanto a la resistencia, esa es más elevada en los compuestos con ADP y PDP en la misma dosificación y los morteros que contienen tanto ADP como PDP exhiben una resistencia a compresión más alta que los morteros que contienen solo uno de los dos componentes (Ilustraciones Figura 4.7 y Figura 4.8). En particular a los 28 días el mortero que presenta una resistencia más elevada es lo que tiene ADP:PDP igual a 1:2. Asimismo la resistencia

aumenta por la presencia de STP, aunque a los 28 días la resistencia más alta es dada del mortero que contiene solo un 1.5% de STP, como se aprecia en la Figura 4.9.

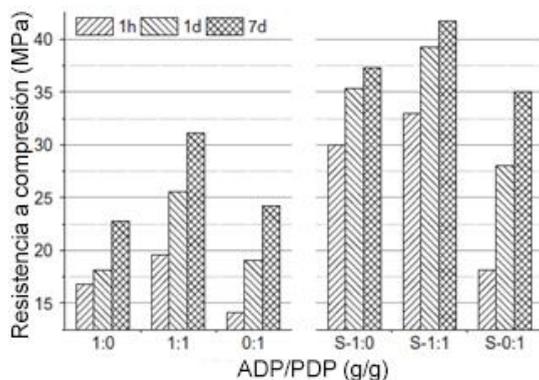


Figura 4.7 - Variación de la resistencia a compresión en función de ADP/PDP

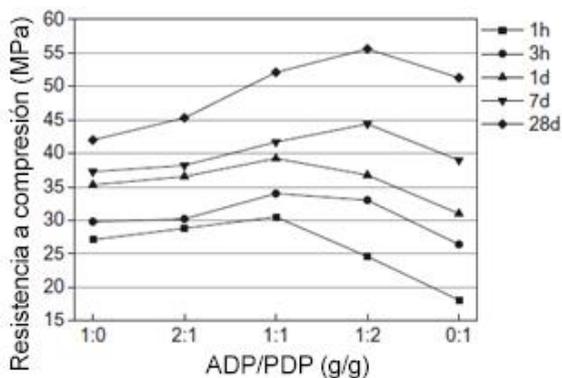


Figura 4.8 - Resistencia a compresión en función de ADP/PDP

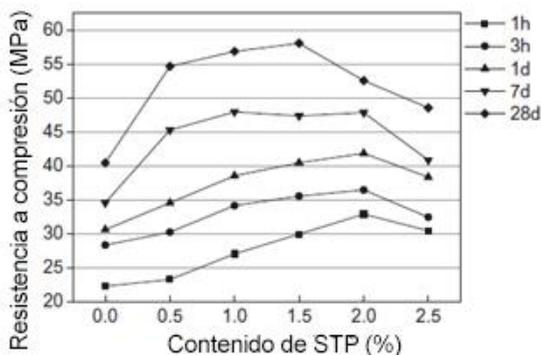


Figura 4.9 - Resistencia a compresión en función del contenido de STP

**Lee et al. (2017)**

En la investigación conducida por Lee (2017) los morteros se prepararon mezclando magnesia calcinada a 1500° C durante 6 horas, fosfato de potasio monobásico y ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) como retardante.

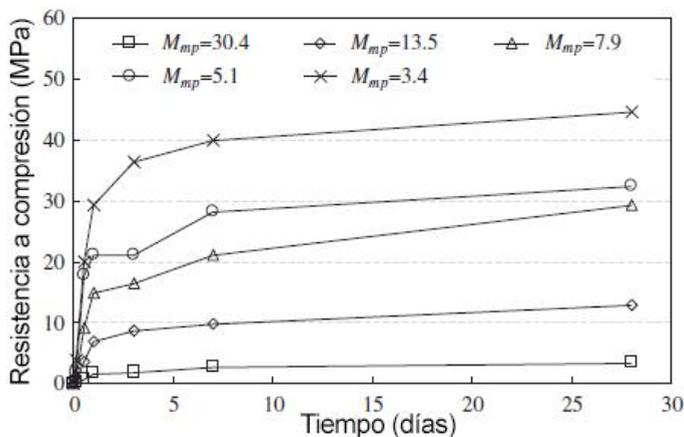
En los ensayos se variaron el contenido de agua desde un 20% hasta un 40% y la relación magnesia/potasio entre un intervalo que va de 9:1 a 5:5. Las dosificaciones de las pastas están resumidas en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5 - Dosificaciones de las pastas de Lee et al. (2017)**

| Nombre pasta | Mg/P<br>[g/g] | Agua/(Mg+P)<br>[g/g] | Arena/(Mg+P)<br>[g/g] |
|--------------|---------------|----------------------|-----------------------|
| 2-30,4       | 30,4          | 0,20                 | 2                     |
| 2-13,5       | 13,5          | 0,20                 | 2                     |
| 2-7,9        | 7,9           | 0,20                 | 2                     |
| 2-5,1        | 5,1           | 0,20                 | 2                     |
| 2-3,4        | 3,4           | 0,20                 | 2                     |
| 2,5-30,4     | 30,4          | 0,25                 | 2                     |
| 2,5-13,5     | 13,5          | 0,25                 | 2                     |
| 2,5-7,9      | 7,9           | 0,25                 | 2                     |
| 2,5-5,1      | 5,1           | 0,25                 | 2                     |
| 2,5-3,4      | 3,4           | 0,25                 | 2                     |
| 3-30,4       | 30,4          | 0,30                 | 2                     |
| 3-13,5       | 13,5          | 0,30                 | 2                     |
| 3-7,9        | 7,9           | 0,30                 | 2                     |
| 3-5,1        | 5,1           | 0,30                 | 2                     |
| 3-3,4        | 3,4           | 0,30                 | 2                     |
| 3,5-30,4     | 30,4          | 0,35                 | 2                     |
| 3,5-13,5     | 13,5          | 0,35                 | 2                     |
| 3,5-7,9      | 7,9           | 0,35                 | 2                     |
| 3,5-5,1      | 5,1           | 0,35                 | 2                     |
| 3,5-3,4      | 3,4           | 0,35                 | 2                     |
| 4-30,4       | 30,4          | 0,40                 | 2                     |
| 4-13,5       | 13,5          | 0,40                 | 2                     |
| 4-7,9        | 7,9           | 0,40                 | 2                     |
| 4-5,1        | 5,1           | 0,40                 | 2                     |
| 4-3,4        | 3,4           | 0,40                 | 2                     |

En esta investigación se estudió la variación de algunas características de los morteros. En el específico, aumentando la relación magnesia-fosfato aumenta la viscosidad, así como el pH, aunque este último va aumentando en el tiempo, como se puede ver en el gráfico. Al contrario, por las mismas razones encontradas en las investigaciones anteriores, la resistencia a compresión disminuye al aumentar el contenido de potasio (a igualdad de relación agua-cemento los morteros que tienen  $M_{mp}$  igual a 30.4 no llegan a tener una resistencia mayor de 5 MPa, mientras los que tienen  $M_{mp}$  igual a 5.1 tienen una resistencia a compresión de 30 MPa) (Figura 4.10). En todos los morteros, sin embargo, la resistencia aumenta en el tiempo con tendencia cercana a la parabólica.

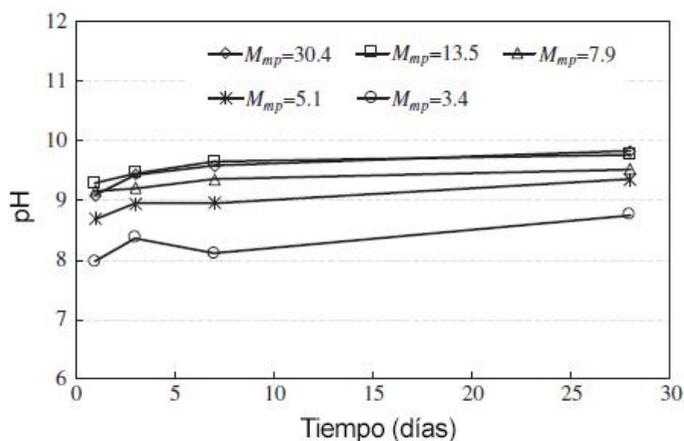
Además, la adición de una gran cantidad de ácido bórico disminuye considerablemente la resistencia del mortero porque las reacciones de cristalizaciones son obstaculizadas por las reacciones entre iones  $\text{BO}_3^{2-}$  ions and  $\text{Mg}^{2+}$ .



**Figura 4.10 - Variación de la resistencia a compresión de los ensayos caracterizados por la relación agua/magnesia =0.30**

En pH aumenta hasta los 7 días, después de los cuales se mantiene prácticamente constante. Los valores están entre 7.6 y 9.3 a 1 día y entre

8.1 y 9.9 a los 7 días. Esto porque la disolución del MgO aumenta el pH durante los primeros días (Figura 4.11).



**Figura 4.11 - Variación del pH de los ensayos caracterizados por la relación agua/magnesia =0.25**

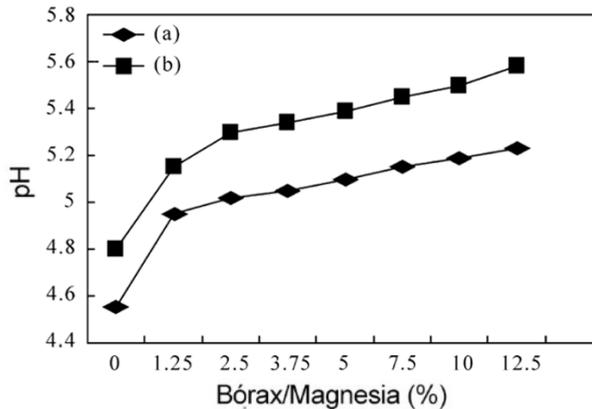
#### Yang et al. (2010)

En la investigación conducida por Yang (2010) se ha analizado como la inserción del bórax dentro de las mezclas de cemento de fosfato de magnesio influencia sus propiedades. Los materiales utilizados son magnesia calcinada, fosfato de potasio monobásico y bórax, variando en todas las mezclas solo el contenido de este último (en porcentaje, la cantidad de bórax varía entre 2.5% y 12.5%).

**Tabla 4.6 - Dosificaciones de las pastas de Yang et al. (2010)**

| Nombre pasta | Mg/P<br>[mol/mol] | Bórax/Mg<br>[%] | Agua/(Mg+P+Bórax)<br>[g/g] |
|--------------|-------------------|-----------------|----------------------------|
| 1            | 5                 | 2,5             | 0,12                       |
| 2            | 5                 | 5,0             | 0,10                       |
| 3            | 5                 | 7,5             | 0,09                       |
| 4            | 5                 | 10,0            | 0,08                       |
| 5            | 5                 | 12,5            | 0,08                       |

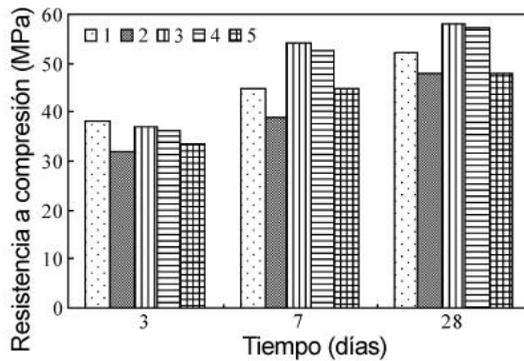
Resulta de las pruebas hechas a los ensayos que la inserción del bórax lleva a un aumento del pH, y en particular el aumento del contenido de bórax en la mezcla provoca su aumento gradual, como puede observarse en el gráfico 4.13. De hecho, cuando está en contacto con el agua el bórax libera iones que llevan a una solución levemente alcalina (Figura 4.12).



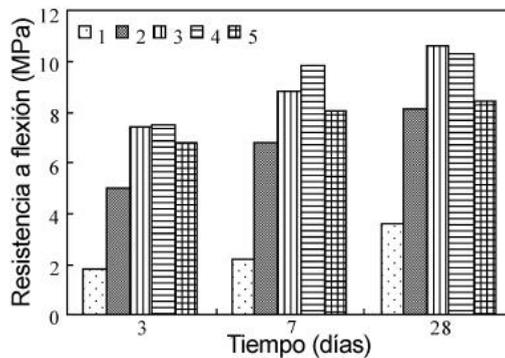
**Figura 4.12 - Variación del pH en función de la relación Bórax/Mg ((a) solución de potasio + bórax + agua, (b) pasta de magnesita + potasio + bórax + agua)**

En cuanto a la resistencia a compresión el contenido de bórax con que se obtiene el valor máximo es de 7,5% (Figura 4.13), mientras no es posible definir un contenido óptimo para la resistencia a flexión.

Como confirman las investigaciones anteriores, la resistencia mecánica depende de la formación de cristales. Cuando se añade el 2.5% de bórax la formación de un film de protección obtenida combinando iones  $B_4O_7^{2-}$  y iones  $Mg^{2+}$  puede retardar la hidratación y promover el crecimiento y la estabilidad de los cristales, aumentando de tal manera la resistencia. Cuando el contenido de bórax es el 5% del total son liberados otros iones aumentando todavía más la producción de cristales. Cuando se aumenta excesivamente el contenido de bórax, los cristales producen un debilitamiento de la adhesión a la superficie de los otros hidratos, disminuyendo la resistencia de la pasta.



**Figura 4.13 - Resistencia a compresión de los morteros a 3, 7 y 28 días**



**Figura 4.14 - Resistencia a flexión de los morteros a 3, 7 y 28 días**

#### **Lai et al (2016)**

En la investigación de Lai (2016) ha sido evaluado el efecto de la inserción de  $Zn^{2+}$  en los cementos de fosfato de magnesio: en general este mineral tiene el efecto de lograr la hidratación al cemento, de aumentar el tiempo de fraguado, pero al mismo tiempo reduce la resistencia a compresión. Sin embargo, los MPC tienen buenas prestaciones en resistencia, estabilidad y porosidad.

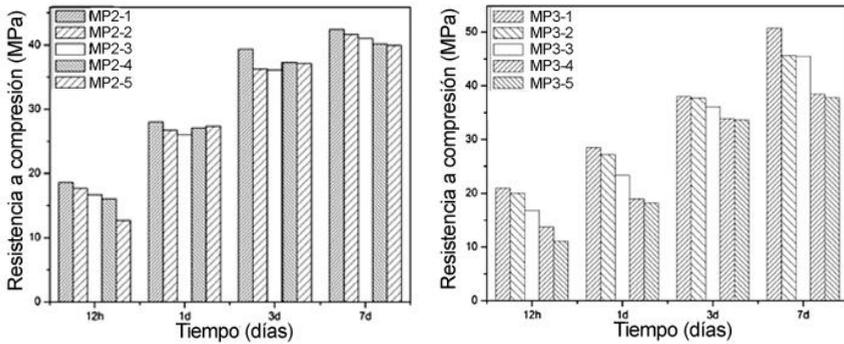
En esta investigación, las mezclas contienen magnesita calcinada, fosfato de potasio monobásico, bórax, nitrato de zinc y agua. Las dosificaciones de los materiales en las diferentes mezclas están en la Tabla 4.7. Las mezclas son divididas en tres series, diferenciadas por la relación M/P:

- MP2, caracterizadas por una relación M/P igual a 2:1;
- MP3, caracterizadas por una relación M/P igual a 3:1;
- MP4, caracterizadas por una relación M/P igual a 4:1.

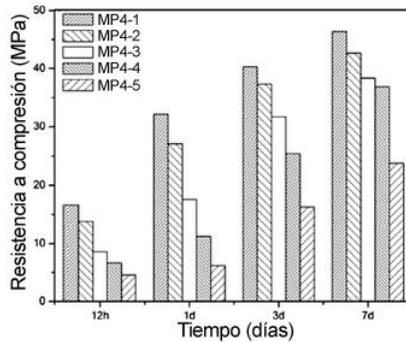
**Tabla 4.7 - Dosificaciones de las pastas de Lai et al. (2016)**

| Nombre pasta                            | Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /sólidos<br>[g/g] | M/P<br>[mol/mol] | Bórax/M<br>[%] | Agua/sólidos<br>[g/g] |
|---|---|------------------|----------------|-----------------------|
| MP2-1, MP2-2,<br>MP2-3, MP2-4,<br>MP2-5 | 0%, 1%, 2%,<br>3%, 4%                               | 2/1              | 0,1            | 0,14                  |
| MP3-1, MP3-2,<br>MP3-3, MP3-4,<br>MP3-5 | 0%, 1%, 2%,<br>3%, 4%                               | 3/1              | 0,1            | 0,14                  |
| MP4-1, MP4-2,<br>MP4-3, MP4-4,<br>MP4-5 | 0%, 1%, 2%,<br>3%, 4%                               | 4/1              | 0,1            | 0,14                  |

Como se puede observar en las Figura 4.15 y Figura 4.16, la resistencia a compresión es influenciada por la relación entre el magnesio y el fosfato, pero es interesante apreciar como la influencia del zinc sobre las características del cemento depende de la relación M/P. De hecho, para las mezclas caracterizadas por M/P igual a 2 la resistencia no cambia de manera apreciable aumentando el contenido de zinc, mientras para las mezclas caracterizadas por M/P igual a 3 (y aún más a 4) a un aumento del zinc corresponde una reducción significativa de la resistencia. De hecho, por ejemplo, la inserción del 4% de Zn en el cemento con M/P igual a 4 disminuye la resistencia del 72% y del 51% a 12 horas y a 7 días, respectivamente, respecto al mismo cemento sin Zn.

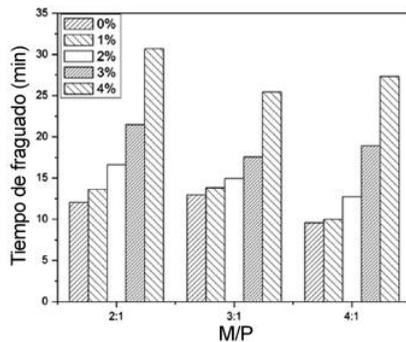


**Figura 4.15 - Resistencia a compresión de las pastas de la serie MP2 (izquierda) y MP3 (derecha)**



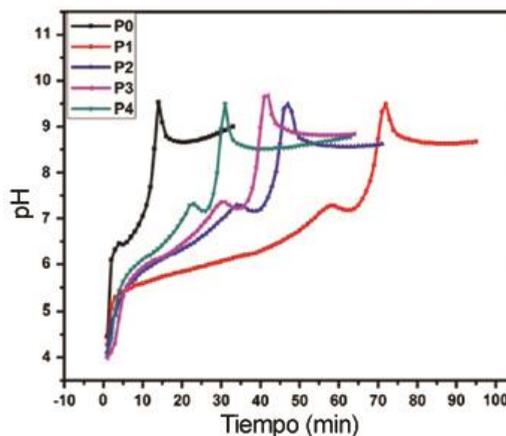
**Figura 4.16 - Resistencia a compresión de las pastas de la serie MP4**

En cuanto al tiempo de fraguado, esto obviamente aumenta con el aumentar del zinc porque este influye de manera directa sobre la hidratación del cemento, aunque sin embargo el aumento de la relación M/P no afecta directamente a eso (Figura 4.17).



**Figura 4.17 - Tiempo de fraguado de las pastas**

Por último, la inserción de diferentes porcentajes de zinc en las mezclas no provoca una variación del pH al final del fraguado, sino su efecto es retardar el proceso de aumento del pH en el tiempo. En general, la tendencia con la cual el pH varía durante el tiempo de fraguado (Figura 4.18) es debida a las reacciones que se producen durante el proceso de hidratación. Sin embargo, poniendo el cinc dentro del cemento se generan otras reacciones. El efecto retardante es más significativo cuando el contenido de cinc es menor, porque el cinc acelera la ionización de los iones del fosfato dihidrógeno, aumentando el contenido de  $H^+$ , cambiando el pH lentamente. Si se aumenta más el cinc, esto puede disolver la magnesia y se pueden consumir los iones  $OH^-$  por su reacción con el  $Zn^{2+}$ . El efecto combinado de estas dos reacciones acelera la variación del pH.



**Figura 4.18 – Variación del pH en función de la cantidad de cinc**

#### **Z. Ding et al. (2014)**

El estudio de Ding (2014) es una investigación sobre morteros de fosfato de magnesio reforzados con fibras de carbono. Para conducir la investigación se realizaron pastas y morteros con diferentes dosificaciones, recogidas en la Tabla 4.8 y en la Tabla 4.9. Los materiales empleados son

magnesia calcinada, fosfato monopotasio, cenizas volantes, ácido bórico como retardante y agua.

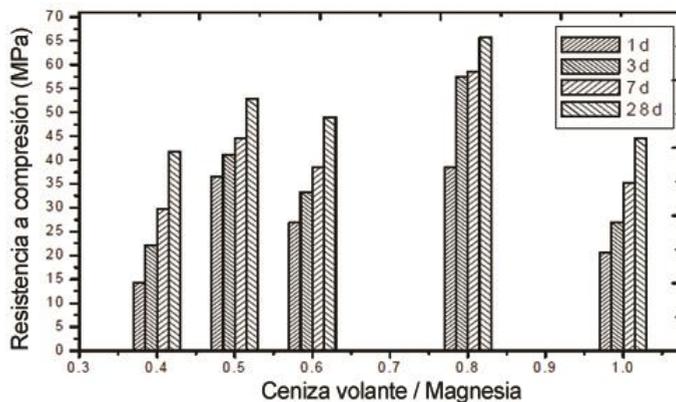
**Tabla 4.8 - Dosificaciones de las pastas de Ding et al. (2014)**

| Pasta | CV/Mg<br>[g/g] | Agua/(CV+Mg+P)<br>[g/g] | Ácido bórico/Mg<br>[g/g] | P/Mg<br>[g/g] |
|-------|----------------|-------------------------|--------------------------|---------------|
| 1     | 0,4            | 0,22                    | 0,1                      | 1:1           |
| 2     | 0,5            | 0,22                    | 0,1                      | 1:1           |
| 3     | 0,6            | 0,22                    | 0,1                      | 1:1           |
| 4     | 0,8            | 0,22                    | 0,1                      | 1:1           |
| 5     | 1,0            | 0,22                    | 0,1                      | 1:1           |

**Tabla 4.9 - Dosificaciones de los morteros de Ding et al. (2014)**

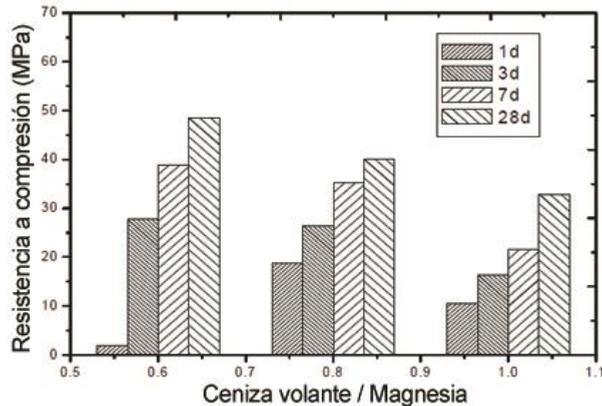
| Mortero | CV/M<br>[g/g] | Agua/(CV+M+P)<br>[g/g] | Ácido bórico/M<br>[g/g] | P/M/Arena<br>[g/g] |
|---------|---------------|------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1       | 0,6           | 0,22                   | 0,1                     | 1:1:1              |
| 2       | 0,8           | 0,22                   | 0,1                     | 1:1:1              |
| 3       | 1             | 0,22                   | 0,1                     | 1:1:1              |

Las prestaciones de las pastas y de los morteros varían en función a la relación entre la ceniza volante y el magnesio, como es posible apreciar en la Figura 4.19 y Figura 4.20.



**Figura 4.19 - Resistencia a compresión de las pastas a 1, 3, 7 y 28 días en función de la relación ceniza volante/magnesia**

En particular, se obtuvo el valor máximo de resistencia a compresión en la pasta realizada con una relación igual a 0.8, porque la ceniza volante después de la reacción de cristalización está bien encapsulada dentro de la K-estruvita, pues ayuda a aumentar la resistencia a compresión (Figura 4.19).



**Figura 4.20 - Resistencia a compresión de los morteros a 1, 3, 7 y 28 días en función de la relación ceniza volante/magnesia**

En el caso de los morteros, la resistencia a compresión se desarrolla cuando su relación es igual a 0.6, o sea la mínima entre las tres consideradas, porque en este caso la ceniza volante es solo un ligante y no constituye una parte resistente y por esto contribuye a disminuir la resistencia (Figura 4.20).

#### **Xu et al. (2017)**

En la investigación conducida por Xu (2017) se han evaluado la capacidad de reaccionar de las cenizas volantes con los morteros de fosfato de magnesio, haciendo una evaluación de las prestaciones. Los morteros han sido preparados mezclando magnesia calcinada (MgO) con fosfato de potasio monobásico o KDP (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) y reemplazando en algunas series parte de la magnesia con ceniza volante. Los otros componentes de las

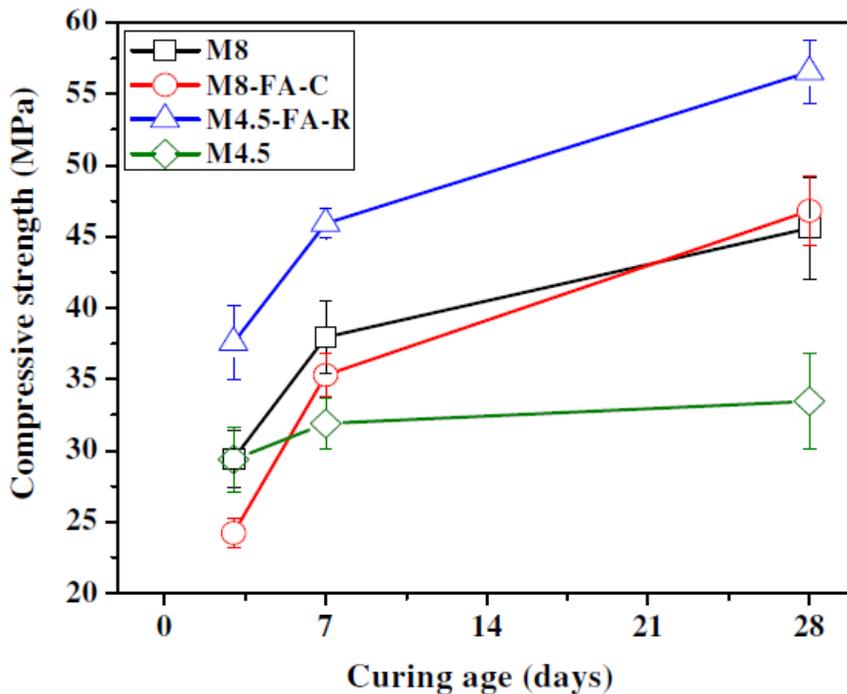
mezclas son agua potable y arena. Se añadió en todas las mezclas el bórax como retardante.

Las dosificaciones están resumidas en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10 - Dosificaciones de los morteros de Xu et al. (2017)**

| Nombre serie | Mg   | P    | CV   | Bórax | s/c  | w/c  |
|--------------|------|------|------|-------|------|------|
| M8           | 1.00 | 0.43 | 0.00 | 0.080 | 0.25 | 0.15 |
| M8-FA-C      | 0.70 | 0.30 | 0.43 | 0.056 | 0.25 | 0.15 |
| M4.5-FA-R    | 0.57 | 0.43 | 0.43 | 0.046 | 0.25 | 0.15 |
| M4.5         | 0.82 | 0.61 | 0.00 | 0.065 | 0.25 | 0.15 |

En este estudio se obtuvo que la ceniza volante reacciona con los sistemas de cemento de fosfato de magnesio, como confirman los siguientes resultados, en términos de trabajabilidad, resistencia a compresión y pH.



**Figura 4.21 - Resistencia a compresión de los morteros**

En estado fresco, se ha obtenido que la inclusión de ceniza volante mejora la trabajabilidad de los morteros debido a la forma esférica de las partículas.

Con respecto a la resistencia a compresión, el mejor resultado viene dado de la mezcla M4.5-FA-R, o sea la que tiene la menor relación Mg/P y la inserción de ceniza volante, mientras la mezcla M4.5 restituye el valor de resistencia más baja de todos (Figura 4.21). Esto es debido al hecho que con una relación Mg/P igual a 4.5 permanecen moléculas de fosfato de potasio no reaccionadas. Esto sugiere que la inserción de ceniza volante tiene efectos benéficos y no influye de forma significativa la relación Mg/P sobre la resistencia.

La elevada reactividad de la ceniza volante con los cementos de fosfato de magnesio es demostrada a través de los análisis microestructurales: resulta que en el mortero que contiene magnesia y potasio hay cristales de K-estruvita que circundan magnesia no reaccionada y arena, desempeñando un papel de ligante; cuando al mismo mortero se ha añadido ceniza volante, la microestructura es más complicada, obteniendo que las partículas de ceniza volante se queden encapsuladas dentro los cristales de K-estruvita.

La ceniza volante, en fin, incrementa el pH. De hecho, ya que esa contiene CaO y SiO<sub>2</sub>, se generan dentro de las mezclas silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), logrando valores de pH entre 10 y 11, contra los valores inferiores a 10 de los cementos de fosfato de magnesio.

#### **4.2.2 Cementos ácido-base**

Los cementos ácido-base son materiales formados por una reacción entre un ácido (generalmente en fase líquida) y una base (generalmente en polvo) y por reacciones de hidratación. La reacción ácido-base se representa con la siguiente ecuación:



La matriz de cemento resultado de la reacción ácido-base es amorfa y es obtenida mediante un proceso de gelación, que le confiere grande rigidez y una estructura similar a la del vidrio.

Estos cementos son todos caracterizados por tener un pH bajo, sobre todo durante la fase de fraguado, y por ser biocompatibles. Por esta última razón, son utilizados para aplicaciones dentales. En los siguientes apartados están indicados algunos de estos cementos.

### **Cemento de fosfato de cinc**

El cemento de fosfato de cinc es una tipología de cemento ácido-base que se obtiene de la mezcla de dos fases: una líquida y una en polvo.

La composición básica del polvo es óxido de cinc y óxido de magnesia añadido como modificador.

El líquido es compuesto de ácido fosfórico, agua, fosfato de aluminio y fosfato de cinc. Este en particular es caracterizado por tener un pH muy ácido.

En estos cementos, la reacción entre polvo y líquido es influenciada y controlada del contenido de agua, que está alrededor del 33%.

La reacción entre las dos fases que genera el producto final, o sea el cemento, es muy exotérmica, es decir genera una considerable cantidad de calor, y cuando la mezcla es completa el cemento que se obtiene llega a un pH de 2,14. El pH, pero, aumenta considerablemente después de 24 horas de la reacción, llegando a un valor de 5,5, que lo hace neutro.

Esta categoría de cementos tiene buenas propiedades mecánicas: de hecho, su resistencia a compresión puede llegar a 104 MPa después de 1 día y tiene un módulo de elasticidad de 13.7 GPa.

Un aspecto negativo de esta categoría de cemento es el tiempo de fraguado que es muy corto, de hecho, esto puede variar entre los 2 y los 8 minutos, aunque existen métodos para aumentarlo sensiblemente, como el control de la temperatura durante el tiempo de trabajo o la reducción del polvo en comparación con el líquido.

No obstante el pH de estos cementos sea apto al crecimiento de las plantas, es muy caro para aplicaciones en la edificación.

### **Cemento de policarboxilato**

Otro cemento que se obtiene mediante reacciones ácido-base es el cemento de policarboxilato. Este cemento, como el anterior, se produce mediante la mezcla de una parte líquida y una en polvo. El polvo es compuesto principalmente de óxido de cinc, óxido de magnesio, bismuto y óxido de aluminio; en algunos casos el óxido de magnesio puede ser sustituido del óxido de estaño, que confiere al cemento una mayor resistencia.

La parte líquida es una solución acuosa de ácido poliacrílico o de un copolímero del ácido acrílico con otros ácidos carboxílicos.

Para este cemento, así como para el anterior, el tiempo de fraguado que es muy corto, de hecho, está entre los 6 y los 9 minutos.

La resistencia mecánica a compresión es inferior a la del cemento de fosfato de cinc, aunque elevada de todas maneras, llegando a ser de 55-60 MPa después de 1 día y su módulo de elasticidad varía entre 2.4 y 4.4 MPa.

El líquido es muy ácido, teniendo un pH igual a 1.7, pero durante el fraguado el pH se neutraliza debido al polvo.

### **Cementos de ionómeros de vidrio**

Con cementos de ionómeros de vidrio se suelen indicar los cementos que resultan de una reacción ácido-base entre polvo de vidrio de silicato y ácido polialquenoico.

El polvo consiste en aluminosilicatos con un alto contenido de fluoruros. El material es compuesto de cuarzo, alúmina, criolita, fluorita, fluoruro de aluminio y fosfato de aluminio.

El líquido es compuesto de ácido poliacrílico y ácido tartárico, utilizado este último para acelerar la reacción de fraguado.

Este cemento tiene buenas prestaciones mecánicas tanto a compresión cuanto a tracción y, además, es bastante flexible. Sus propiedades, pero, empeoran cuando es hidratado.

Una de las limitaciones de estos cementos es el alto costo, por lo cual no es apto para aplicaciones en el campo de la edificación.

Existe una categoría de cementos de ionómeros de vidrio modificados con resinas que fraguan más rápidamente, pero tienen una resistencia más alta.

Otra alternativa de esta tipología de cementos desarrollada es realizada utilizando como componente adicional el aluminato de calcio. La incorporación de este último componente aporta al cemento de ionómeros de vidrio tradicional mejoras de sus propiedades. En primer lugar, hay una producción más elevada de iones  $\text{Ca}^{2+}$ , que contribuye a aumentar su resistencia; a ello se suma que el pH inicial no es tanto ácido como los otros cementos ácido-base, siendo inicialmente igual a 4 y aumentando después de algunas horas hacia un valor de 8.5, el que le permite ser más biocompatible.

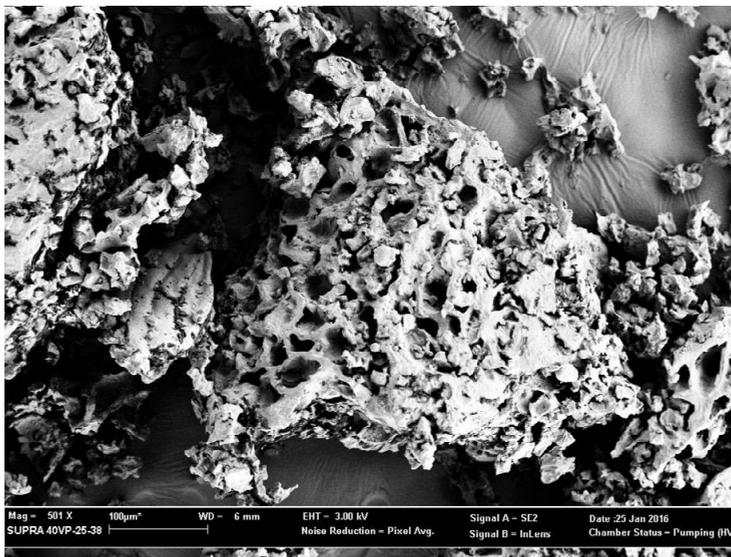
#### **4.2.3 Empleo del café en los materiales de construcción**

Con objeto de disminuir el pH el café se ha mostrado eficaz, y además ha comprobado en el tiempo que el café, como toda la materia orgánica, es una válida alternativa para acidificar los suelos. En particular, en una perspectiva de desarrollo sostenible, se podrían utilizar, para conseguir este objetivo, los posos de café.

Tratándose de un material orgánico que permite la disminución del pH, su inserción dentro de las mezclas ha sido tomada en cuenta como última opción para obtener hormigones biocompatibles de bajo pH.

Todavía en literatura es presente un número muy bajo de artículos sobre este tema, aunque en realidad en los últimos años las investigaciones se están enfocando en la sustitución de materia prima con residuos reciclados como este, dado que esta llevaría beneficios de tipo económico y medioambientales.

La Tabla 4.11 y la Figura 4.22 muestran las características químicas del material, halladas en investigaciones anteriores.



**Figura 4.22 – Análisis al SEM de los posos de café**

**Tabla 4.11 - Composición química de los posos de café**

| Composición química de los posos de café (%) |       |
|--|-------|
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>           | 3.61  |
| <b>CaO</b>                                   | 33.99 |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>                        | 43.10 |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>                       | 16.5  |

Los posos de café han sido utilizados en la investigación de Teck-Ang Kua (2017) para la realización de geopolímeros, o sea polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolymerización que les confieren un elevado potencial para ser usados como sustitutos de cementos portland. De hecho, la geopolymerización es un proceso de enlace químico que utiliza soluciones alcalinas para disolver materiales ricos de aluminosilicatos para formar polímeros de alúmina y sílice.

Teck-Ang Kua ha empleado hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) como activadores alcalinos, mientras como precursores de la geopolymerización ha empleado, a parte de los posos de café, cenizas volantes y escorias de altohorno, en las cantidades resumidas en la Tabla 4.12.

Los posos de café tienen las características de ser orgánicos pero insolubles en agua y exhiben una baja resistencia al corte y una alta compresibilidad, aunque los productos derivados de su geopolymerización poseen resistencias incrementadas, debido a su mezcla con ceniza volante y escorias.

**Tabla 4.12 - Dosificaciones de los geopolímeros con posos de café**

| Café : Escorias : Ceniza Volante | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH | Contenido líquido (%) |
|----------------------------------|---|-----------------------|
| <b>70:30:0</b>                   | 90:10, 70:30, 50:50                     | 30-80                 |
| <b>70:20:10</b>                  | 90:10, 70:30, 50:50                     | 30-80                 |
| <b>70:15:15</b>                  | 90:10, 70:30, 50:50                     | 30-80                 |
| <b>70:10:20</b>                  | 90:10, 70:30, 50:50                     | 45-75                 |

Los valores de resistencia a compresión encontrados para estas dosificaciones de geopolímeros después de 7 días están todos alrededor de 1 MPa, mientras a los 28 días la resistencia aumenta significativamente hasta valores medios de 1.5 MPa, llegando a valores máximos de 1.7 MPa para los geopolímeros con la relación Café:Escorias:Ceniza Volante de 70:10:20 e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$  igual a 50:50. Estos geopolímeros tienen en general una resistencia mucho más baja de los morteros y pastas de las otras tipologías analizadas en precedencia y, además, la resistencia más alta se obtiene en las proporciones antedichas porque así, si por un lado se permite el desarrollo de silicatos hidratos de calcio y aluminio (que se encuentran en el Cemento Portland), sin arriesgar de obstaculizar la disociación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que sería consecuencia de un exceso de ceniza volante, por otro lado gracias a la presencia de las escorias de altohorno, que contienen  $\text{CaO}$ , se permite el desarrollo de resistencia en poco tiempo.

### **4.3 CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS SOBRE FACHADAS**

#### **4.3.1 Organismos que pueden crecer sobre las fachadas de los edificios**

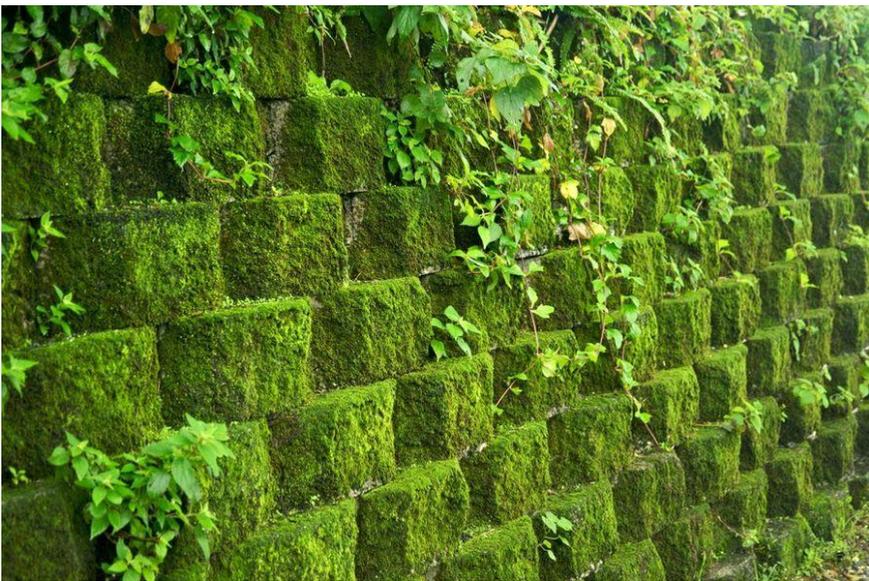
Las comunidades de organismos que se encuentran sobre una fachada son resultado de un acúmulo de estratos distintos de organismos. Inicialmente se forma un biofilm, que es un depósito de microorganismos que adhieren a la superficie de la pared a través de las fuerzas de van der Waals. Una vez generado este biofilm, los siguientes organismos a llegar pueden con facilidad adherir y acumularse sobre esto, posibilitando así el crecimiento de la colonización en el material de fachada.

Las fachadas de los edificios, siendo hechas de piedras (en forma de árido en el caso del hormigón), constituyen unos biosistemas innaturales que permiten el crecimiento de algunos organismos vegetales. Para sobrevivir,

estos deben ser capaces de tolerar la disecación; de hecho, en los seres que tienen esta capacidad, los procesos biológicos pueden parar para empezar nuevamente en cuanto haya disponibilidad de agua.

Entre los principales organismos biológicos que pueden crecer sobre las fachadas están los musgos, las algas, los líquenes, los mohos y las bacterias.

Los musgos son plantas autótrofas que pertenecen a la familia de las briofitas y se caracterizan por no tener ni vasos conductores. Esto significa que los musgos pueden absorber agua y los nutrientes de la entera superficie del organismo, necesitando de tal manera un riego abundante. Además, como no tienen raíces se sujetan al sustrato mediante pequeños rizoides. Se pueden apreciar en cualquier superficie, como troncos de los árboles, techos de las casas, rocas y paredes.



**Figura 4.23 - Colonización de una pared por los musgos**

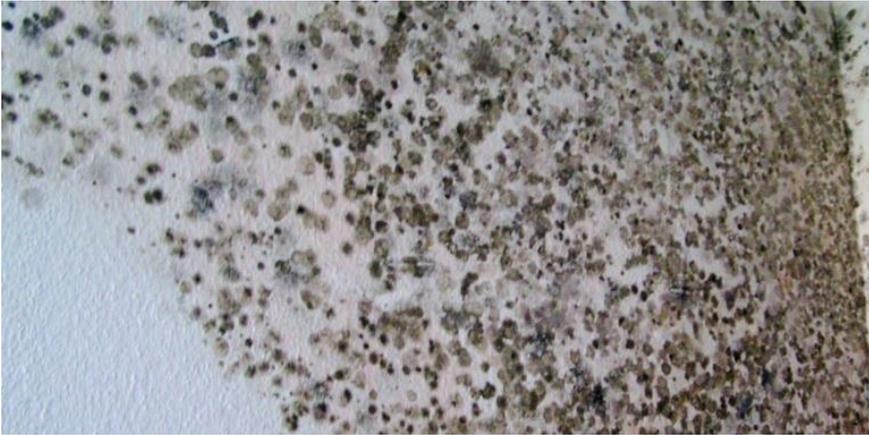
Las algas constituyen un grupo de organismos eucariotas. Como los musgos, son organismos autótrofos que necesitan como fuente de energía solo la luz solar. Aunque la gran mayoría es de tipo acuático, existen las algas

terrestres que es posible encontrar en los trocos de los árboles o sobre las fachadas de los edificios. Estos organismos son capaces de sobrevivir en hábitats extremos, incluso la disecación. Las algas que se encuentran en las fachadas son por la mayoría verdes, pertenecientes a la división *Chlorophyta*, no obstante el aspecto rojo que se ve en algunas fachadas es dado del alga *Heamatococcus pluvialis*.



**Figura 4.24 - Colonización de una fachada por algas**

Los mohos son organismos heterótrofos, es decir tienen que recurrir a fuentes externas para abastecerse de hidratos de carbono, sobre todo necesitan agua para su crecimiento. Sin embargo, algunas especies de mohos pueden sobrevivir durante largos tiempos de disecación. El moho más común que se puede encontrar en las fachadas es el *Cladosporium* o la *Alternaria*, que confieren el color negro a la fachada.



**Figura 4.25 - Colonización de las paredes en el interior de un edificio por mohos**

Los líquenes son mohos que establecen una relación simbiótica con varios organismos fotosintéticos (algas y cianobacterias), originándose un cuerpo vegetativo estable con una estructura, fisiología y ecología propia. De la relación entre algas y mohos deriva que los líquenes pueden crecer donde aquellos no pueden sobrevivir, porque los mohos rodean y protegen las algas de la sequía y los mohos cogen los nutrientes de la actividad fotosintética de las algas. De esta manera, se libera de la necesidad de vivir sobre materia orgánica y sus requerimientos de humedad son también más limitados. Los líquenes se distinguen en función de su aspecto externo en crustáceos, foliáceos y fruticulosos. Los primeros son líquenes fuertemente adheridos al sustrato por su cara inferior, de forma que no se pueden separar de éste sin destruirlo; los foliáceos presentan una estructura en forma de lámina plana, solo parcialmente adherida al sustrato; los fruticulosos desarrollan talos formados por tiras alargadas, sujetándose al sustrato por un punto. El crecimiento de los líquenes es muy lento, de algunos mm por año. Los líquenes se adaptan a todos los sustratos, desde los más ácidos hasta los más alcalinos. Por esta razón se encuentran fácilmente en las fachadas minerales de los edificios, aunque sean afectados del polvo del aire.



*Figura 4.26 - Colonización de una fachada en piedra por líquenes*

#### **4.3.2 Colonización de los materiales pétreos de los microorganismos**

El número de investigaciones sobre los efectos del crecimiento de las plantas sobre materiales pétreos es elevado. La opinión general entre la mayoría de los investigadores es que los microorganismos pueden degradar el sustrato mineral, aunque algunos estudios demuestren como el crecimiento de líquenes actualmente intervenga en la protección de las fachadas de los estreses medioambientales.

Se define biodeterioro cualquier cambio indeseable en las propiedades de un material causado por las actividades vitales de los microorganismos. El mecanismo de biodeterioro incluye la producción ácida y alcalina, la alteración de las propiedades de la superficie, la absorción de calor y la retención de agua y, naturalmente, la penetración de microorganismos dentro del material constituyente el sustrato. Por esta razón, con esta definición podemos referirnos tanto a cambios en el aspecto de las superficies como a deterioros que perjudican su funcionalidad, con consecuente debilitamiento del edificio mismo.

La formación de poblaciones de microorganismos pero depende de las condiciones medioambientales en que se encuentra el edificio asimismo de las propiedades físico-químicas del material expuesto.

En consecuencia, se define bioreceptividad de un material su aptitud a ser colonizado de uno o más grupos de seres vivos sin necesariamente someterse a deterioro. En particular, se puede definir como la totalidad de las propiedades del material que contribuyen al establecimiento y al desarrollo de fauna y/o flora. En materiales pétreos, por ejemplo, se refiere mayormente a las propiedades de la superficie expuesta a los eventos climáticos, como la rugosidad, porosidad, humedad y composición química del estrato. Existe más de un tipo de bioreceptividad: la primera bioreceptividad indica el potencial inicial de la colonización, cuando todavía no hayan cambiado las propiedades del material del estado inicial. Cuando las características evolucionan bajo efecto de la colonización de los organismos se suele referir a la bioreceptividad secundaria. En fin, si algunos tratamientos humanos cambian las características iniciales o secundarias del material se indica como bioreceptividad terciaria.

Las propiedades del material que contribuyen a la colonización biológica son tanto físicas como químicas. Entre los factores físicos la rugosidad es, según algunos investigadores, el factor más importante, ya que una superficie más rugosa favorece la adhesión de los microorganismos y además la materia orgánica y el agua fluyen dentro el sustrato; al mismo tiempo la rugosidad aumenta la absorción de radiación solar. Otros factores de tener en cuenta son la porosidad y la distribución dimensional de los poros, que influyen la absorción y la retención de agua: cuanto más poroso es el material tanta más agua es retenida, aumentando así su disponibilidad. Entre los factores químicos, el pH tiene una importancia relevante, dado que el crecimiento de las plantas tiene lugar cuando se

haya carbonatada la superficie y por consecuencia se haya bajado el pH a un valor alrededor de 9.

La influencia de las propiedades intrínsecas de los morteros sobre el proceso de biodegrado por efecto de los microorganismos ha sido investigado en el estudio de Thu Hien Tran (2012). Se eligió como microorganismo el alga verde *Klebsormidium flaccidum* por su facilidad de cultivación, mientras para el sustrato se optó por un mortero realizado con cemento portland CEM I 52.5 N, arena silícea, adición calcárea y agua con dos dosificaciones, es decir con una relación agua/cemento igual a 0.5 y a 1. Además, sobre la superficie se aplicó el acabado con tres diferentes métodos, uno con rodillo (ensayo R1) y dos mediante rasguños de diferentes rugosidades (ensayos R2 y R3). Dentro de los resultados se aprecia que la porosidad aumenta significativamente incrementando la cantidad de agua y, en más, durante la carbonatación esta se reduce. En cambio, los valores del pH no son dependientes de la relación agua cemento, si no solo del grado de carbonatación del mortero.

**Tabla 4.13 – Tipos y características de los ensayos de Thu Hien Tran et al. (2012)**

| Relación w/c |                | Código | Porosidad (%) | pH   |
|--------------|----------------|--------|---------------|------|
| 0.5          | No carbonatado | 05UC   | 15.9          | 11.2 |
|              | Carbonatado    | 05C    | 10.6          | 9.5  |
| 1            | No carbonatado | 10UC   | 37.2          | 11   |
|              | Carbonatado    | 10C    | 32.1          | 9    |

Para evaluar la colonización de microorganismos, ha sido evaluado el tiempo necesario para el recubrimiento por parte de las algas de la entera superficie en función de los diferentes parámetros. En cuanto a la rugosidad de la superficie, el tiempo de colonización es más corto en las superficies más rugosas, pues es evidente la influencia de la rugosidad sobre la colonización, sobre todo en los morteros no carbonatados. En relación con el pH, la colonización de los morteros carbonatados empieza mucho antes

de la de los no carbonatados y, además, el índice de recubrimiento por parte de los organismos es mayor en estos últimos. De hecho, valores de pH cercanos o mayores de 10 inhiben el crecimiento de los organismos. De esto se concluye que el pH y la rugosidad son las propiedades más influyentes para la colonización biológica del mortero.

Un estudio análogo a este fue realizado por el grupo de Dubosc (2001), en el cual se investigó la colonización de organismos sobre morteros con cuatro diferentes relaciones agua/cemento (0.38, 0.5, 0.6 and 0.7). Para confeccionar los morteros ha sido utilizado cemento Portland ordinario y arena sílicea. Para permitir la aparición de organismos, los ensayos han sido expuestos durante 3 h/día a llovizna intermitente con agua desionizada enriquecida con minerales contenientes esporas de algas y luego se han dejado encubados bajo una lámpara a fluorescencia de 2000 lux durante 12 h/día, con una temperatura variable entre los 21°C por la noche y los 25°C por la mañana, una humedad relativa variable entre el 95% por la noche y el 80% por el día. De esta manera han sido identificados dos tipos de algas, o sea Cyanophyceae y Chlorophyceae, y como resultado se ha encontrado que la colonización aumenta con el aumentar de la relación agua/cemento y con la porosidad.

Resumiendo, para favorecer el nacimiento y el desarrollo de poblaciones de microorganismos sobre el sustrato mineral, que sea mortero o hormigón, los parámetros en que centrarse durante la fabricación del material son el pH, que debe tener un valor de máximo 9.5-10, la rugosidad superficial y la porosidad del sustrato, que deben ser ambos maximizados.

# Capítulo 5. Fase experimental

## 5.1 INTRODUCCIÓN

La fase experimental de esta tesis se compone de diferentes tareas: en primera lugar ha sido caracterizada la materia prima para conocer el efecto que tienen los diferentes materiales que van a configurar las dosificaciones y han sido elegida la composición de las pastas basándose sobre los resultados de las investigaciones del estado del arte (cfr. apartado 4.2); solo en función de los resultados obtenidos en estas dos primeras tareas ha sido elegida la composición de los ensayos de mortero los cuales, finalmente, han sido caracterizados mediante pruebas para evaluar sus propiedades.

Para caracterizar la materia prima se facilitan fichas técnicas de los laboratorios de procedencia. Además, han sido sacados en laboratorio resultados de las pruebas aquí listadas:

- difracción de rayos X;
- composición química;
- componentes de traza de la composición;
- análisis termogravimétrico;
- análisis de pH.

En cuanto a las pastas realizadas mezclando dos o más materiales que al final compondrán los morteros, sobre esas ha sido evaluado el pH tanto en el momento de la mezcla cuanto a los 7 días.

Las pruebas realizadas sobre los morteros son tanto en estado fresco cuanto en estado endurecido. En estado fresco, se hizo el ensayo de

consistencia (slump-flow) y el ensayo de determinación de pH. En estado endurecido, los ensayos sobre ellos son los siguientes:

- ensayo de resistencia a compresión;
- ensayo de retracción;
- determinación del pH en estado endurecido;
- ensayo de carbonatación;
- ensayo de resistencia a los cloruros;
- ensayo de absorción de agua;
- evaluación de la pérdida de peso.

## **5.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA**

### **5.2.1 Introducción**

Los materiales que se han empleado en este trabajo son derivados de los resultados de las investigaciones constituyentes el estado del arte y son los siguientes:

- Cemento CEM I 52,5R;
- Ceniza Volante;
- Óxido de magnesio ( $MgO$ );
- Fosfato de potasio monobásico ( $KH_2PO_4$ );
- Ácido Bórico ( $H_3BO_3$ );
- Bórax;
- Posos de café.

De estos materiales algunos son provenientes de laboratorios de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (Figura 5.1), pues ellos se proporcionaron juntos con sus fichas técnicas, mientras otros se han caracterizado por medio de las pruebas mencionadas en el apartado anterior.



**Figura 5.1 - Materiales suministrados por los laboratorios**



**Figura 5.2 - Materiales analizados en los laboratorios de la UPCT (a la derecha particular del aspecto del fosfato de potasio monobásico)**

Dentro de los materiales está el óxido de magnesio. Para este material es importante subrayar que la ficha técnica del óxido de magnesio facilitada por el laboratorio proveedor (Figura 5.6) se refiere a eso no calcinado. Sin embargo, en la mayoría de las investigaciones las pastas y los morteros se fabricaron con óxido de magnesio calcinado, entonces fue necesario caracterizar este material tanto antes como después de su calcinación. Para

calcinar el óxido de magnesio se utilizó un horno de mufla, donde se dejó el material durante 2 horas a la temperatura de 1200°C (Figura 5.3).



**Figura 5.3 - Calcinación del óxido de magnesio dentro del horno de mufla**

### 5.2.2 Fichas técnicas

En este párrafo se facilitan las fichas técnicas de los productos procedentes del laboratorio.

| Sr no. | Tests                       | Specifications | Results  |
|--------|-----------------------------|----------------|----------|
| 1      | Assay (Min)                 | 99,5 -100,5%   | 100,2%   |
| 2      | Substances insoluble in H2O | max. 0,005 %   | 0,00005  |
| 3      | Chlorides (Cl)              | max. 0,001%    | 0,000008 |
| 4      | Phosphates (PO4)            | max. 0,001%    | 0,000007 |
| 5      | Sulfates (SO4)              | max. 0,005%    | 0,00004  |
| 6      | Heavy metals (as Pb)        | max. 0,001%    | 0,000005 |
| 7      | Calcium (Ca)                | max. 0,005%    | 0,00004  |

**Figura 5.4 - Ficha técnica del bórax de labkem**

## 83 Hormigones biológicos

| Sr no. | Tests                | Specifications | Results |
|--------|----------------------|----------------|---------|
| 1      | Assay (Min.)         | 0,995          | 100,2%  |
| 2      | pH (5% sol.)         | 4.3-4.5        | 4,4     |
| 3      | Cl-                  | ≤ 0.0005%      | 0,0004% |
| 4      | SO <sub>4</sub>      | ≤ 0.002%       | 0,001%  |
| 5      | Total N              | ≤ 0.001%       | 0,0008% |
| 6      | Heavy metals (as Pb) | < 0.001%       | 0,0008% |
| 7      | Fe                   | ≤ 0.001%       | 0,001%  |
| 8      | Loss on drying       | ≤ 0.2%         | 0,1%    |
| 9      | Insoluble matter     | ≤ 0.01%        | < 0.01% |
| 10     | Na                   | ≤ 0.02%        | 0,01%   |

**Figura 5.5 - Ficha técnica del fosfato de potasio dihidrógeno de labkem**

**Nombre del producto:**  
OXIDO DE MAGNESIO SACO 25 KG

**Fórmula química:** MgO

**Aspecto:** Sólido polvo de color blanco.

| DESCRIPCIÓN CARACTERÍSTICA | UNIDAD | MÍNIMO | MÁXIMO | TÍPICO |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Riqueza                    | %      | 98,27  |        | 98,50  |
| Oxido cálcico              | %      |        | 0,8300 | 0,7400 |
| Oxido de manganeso         | %      |        | 0,1400 | 0,1200 |
| Oxido de silicio           | %      |        | 0,2000 | 0,1200 |
| Oxido férrico              | %      |        | 0,5700 | 0,4400 |
| Trióxido de aluminio       | %      |        | 0,1200 | 0,0700 |
| Trióxido de boro           | %      |        | 0,0200 | 0,0100 |

**Figura 5.6 - Ficha técnica del óxido de magnesio de Vadequímica**

| Sr no. | Tests   | Specifications | Results  |
|--------|---|----------------|----------|
| 1      | Assay   | min. 99,5%     | 100,00%  |
| 2      | Substances insoluble in water                           | max. 0,01%     | 0,008%   |
| 3      | Substances inosuble in C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | Passes test    | conform  |
| 4      | Substances non+volatile with methanol                   | max. 0,05%     | 0,04%    |
| 5      | Chlorides (Cl)  | max. 0,0003%   | 0,00008% |
| 6      | Phosphates (PO <sub>4</sub> )                           | max. 0,001%    | 0,0005%  |
| 7      | Sulphates (SO <sub>4</sub> )                            | max. 0,005%    | 0,001%   |
| 8      | Heavy metals (as Pb)                                    | max. 0,001%    | 0,0005%  |
| 9      | As (Arsenic)  | max. 0,0001%   | 0,00008% |
| 10     | Ca (Calcium)  | max. 0,005%    | 0,004%   |
| 11     | Fe (Iron)   | max. 0,0001%   | 0,00007% |

**Figura 5.7 - Ficha técnica del ácido bórico de labkem**

### **5.2.3 Determinación de la granulometría de las partículas del árido empleado**

Las características de los áridos, en cuanto a su forma y textura, influyen tanto en las propiedades de los morteros en estado fresco como en estado endurecido.

Los áridos se pueden calificar por su forma y tamaño, en base a su grado de redondez y esfericidad. En este proyecto para confeccionar los morteros se emplea, obviamente, árido fino y cuando se debe caracterizar el árido fino, su forma y textura superficial tienen un efecto significativo sobre la demanda de agua en el amasado de las mezclas.

La forma de las partículas del árido puede ser descrita por dos parámetros: esfericidad y curvatura. La esfericidad es dada por el diámetro de las partículas y por la dimensión máxima característica del árido, mientras la curvatura es el radio medio de las extremidades o límite por el radio de circunferencia máxima inscrita de cada partícula.

En cuanto a la textura superficial los áridos, esa es una característica apreciada visualmente, que puede variar desde superficie lisa hasta la áspera, pasando por suave, granular, rugosa y cavernosa.

El árido que se ha utilizado para la confección de todos los morteros en esta investigación es de tipo calizo de origen natural. Todas las texturas pueden ser apreciadas a simple vista a través del estudio microscópico que se muestra en la Figura 5.8 y en la Figura 5.9.



**Figura 5.8 - Micrografía a diferentes escalas del árido calizo (1)**

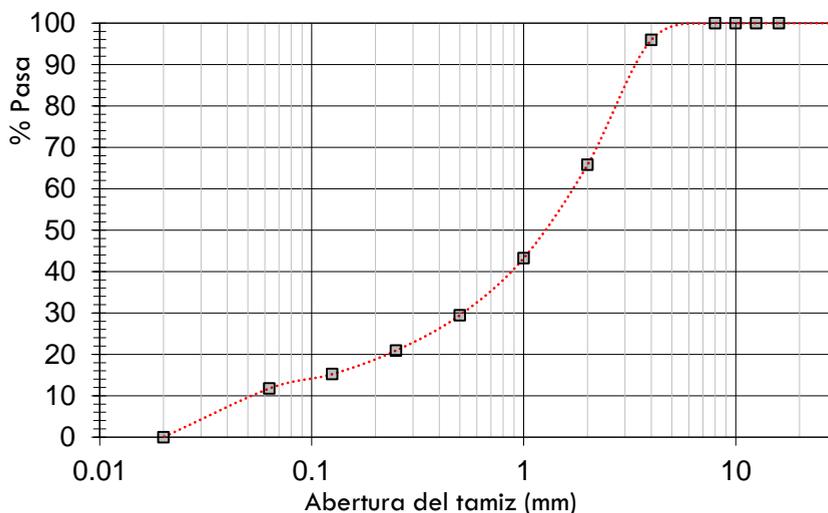


*Figura 5.9 - Micrografía a diferentes escalas del árido calizo (2)*

Los áridos empleados son correspondientes con las fracciones granulométricas designadas según la Instrucción de Hormigón Estructural Española (EHE-08) como 0/4-T-C. A continuación, se muestran los resultados del análisis, ejecutada mediante el método del tamizado en seco, de la granulometría de los áridos utilizados (Tabla 5.1 e Figura 5.10).

**Tabla 5.1 - Granulometría del árido calizo fino**

| <b>ARENA 0/4</b>                        |                          |                             |                               |                           |
|---|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| <b>Tamiz UNE 933-2:2012 [luz en mm]</b> | <b>Peso retenido [g]</b> | <b>Retenido Parcial [%]</b> | <b>Retenido acumulado [%]</b> | <b>Pasa acumulada [%]</b> |
| <b>4</b>                                | 23,95                    | 4,1                         | 4,1                           | 95,9                      |
| <b>2</b>                                | 178,3                    | 30,2                        | 34,2                          | 65,8                      |
| <b>1</b>                                | 133,3                    | 22,5                        | 56,8                          | 43,2                      |
| <b>0,5</b>                              | 81,35                    | 13,8                        | 70,5                          | 29,5                      |
| <b>0,25</b>                             | 50,5                     | 8,5                         | 79,1                          | 20,9                      |
| <b>0,125</b>                            | 33,75                    | 5,7                         | 84,8                          | 15,2                      |
| <b>0,063</b>                            | 20,55                    | 3,5                         | 88,3                          | 11,7                      |
| <b>PASA</b>                             | 69,45                    | 11,7                        | 100,0                         | 0,0                       |
| <b>MUESTRA</b>                          | 591,15                   | Módulo granulométrico       |                               | 3,29                      |



**Figura 5.10 - Curva granulométrica de los áridos naturales calizos**

#### 5.2.4 Difracción de Rayos X

Mediante la difracción de rayos X se ha ejecutado el análisis estructural de cristales de la materia prima empleada para la realización de pastas y morteros.

##### **Cemento CEM I 52,5R**

Se realizó el análisis del cemento CEM I 52,5R permitiendo identificar las principales fases mineralógicas del cemento, donde se aprecia que a  $11^\circ$ ,  $21^\circ$ ,  $29^\circ$ ,  $32^\circ \sim 2\theta$  se tiene el pico de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), en el pico  $38^\circ \sim 2\theta$  se tiene el pico de Calcium aluminium oxide ( $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}$ ), a  $14^\circ \sim 2\theta$  se tiene los picos de Bassanita ( $\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$ ), a  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $32^\circ$ ,  $33^\circ$  etc.  $\sim 2\theta$  se tienen los picos de silicato cálcico ( $\text{CaSiO}_5$ ).

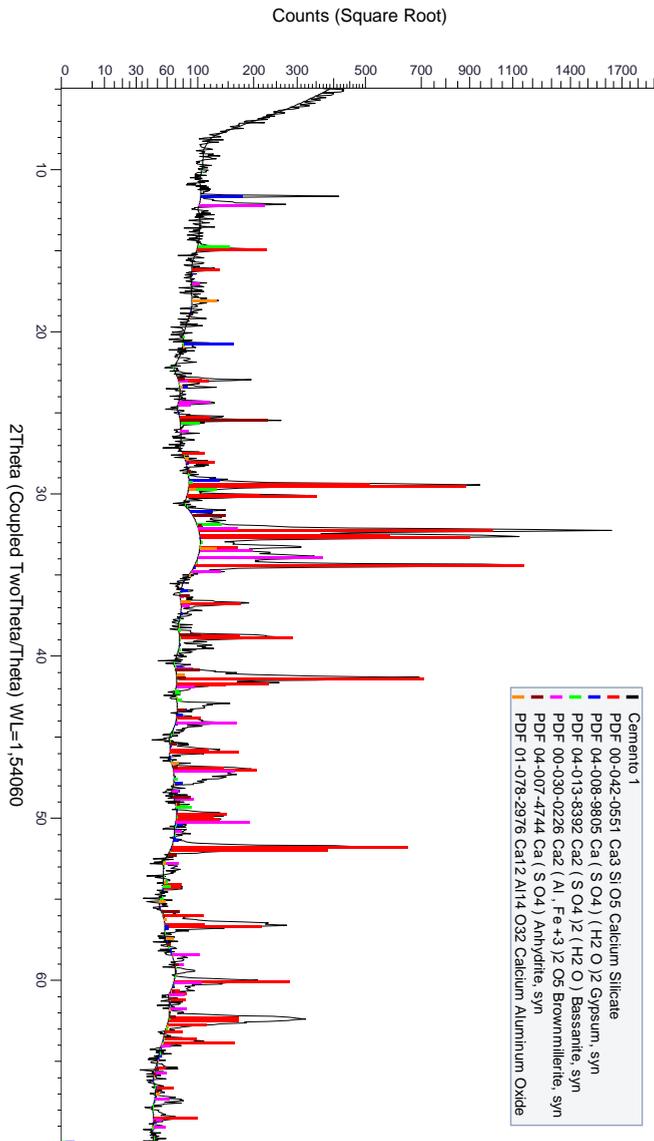


Figura 5.11 - Difractograma de rayos X del Cemento CEM I 52,5R

### Ceniza Volante

Se realizó el análisis de la ceniza volante, donde se aprecian las trazas de componentes cristalinos, como el Cuarzo  $\text{SiO}_2$  por el cual hay picos a 21 y

$26^\circ \sim 2\theta$  y la mullita  $\text{Al}_{2.14}\text{Si}_{0.86}\text{O}_{4.93}$  apreciable con el pico a  $26^\circ \sim 2\theta$ . La mullita se origina por la transformación térmica de los minerales arcillosos contenidos en el carbón. Se tiene el pico de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) a  $21$  y  $31^\circ \sim 2\theta$ , a  $32, 33, 39, 41, 52, 63^\circ \sim 2\theta$  se tienen los picos de silicato cálcico ( $\text{CaSiO}_5$ ), mientras a  $23, 29, 43, 47, 49^\circ \sim 2\theta$  se tienen los picos de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ).

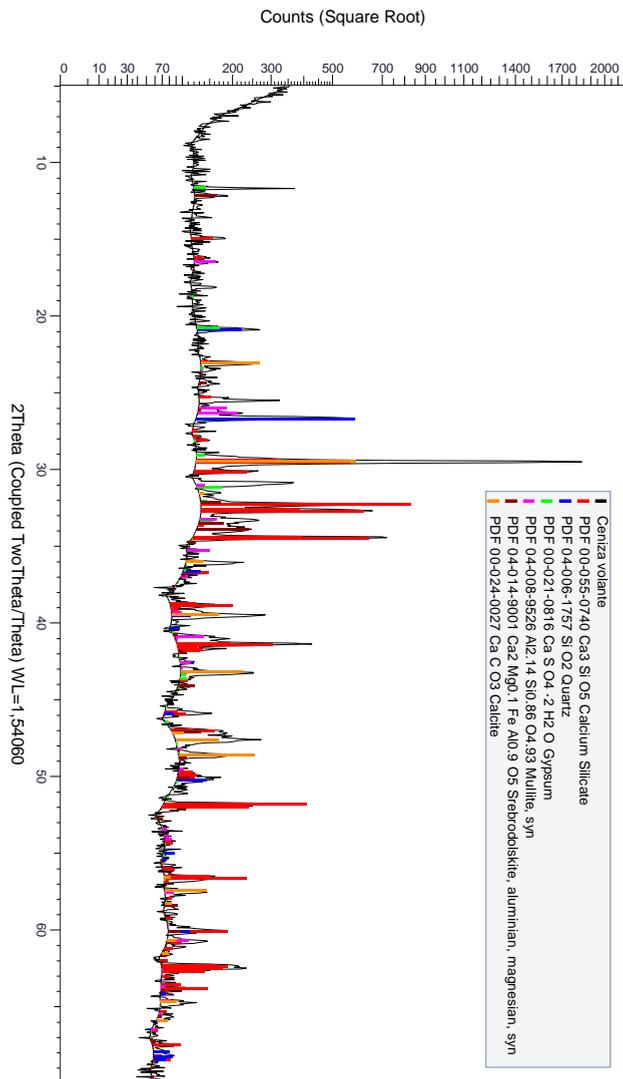


Figura 5.12 - Difractograma de rayos X de la ceniza volante

### Magnesia no calcinada

En el análisis de la magnesia no calcinada, los únicos picos presentes son de óxido de magnesio MgO a 37, 43 y 62°~2θ.

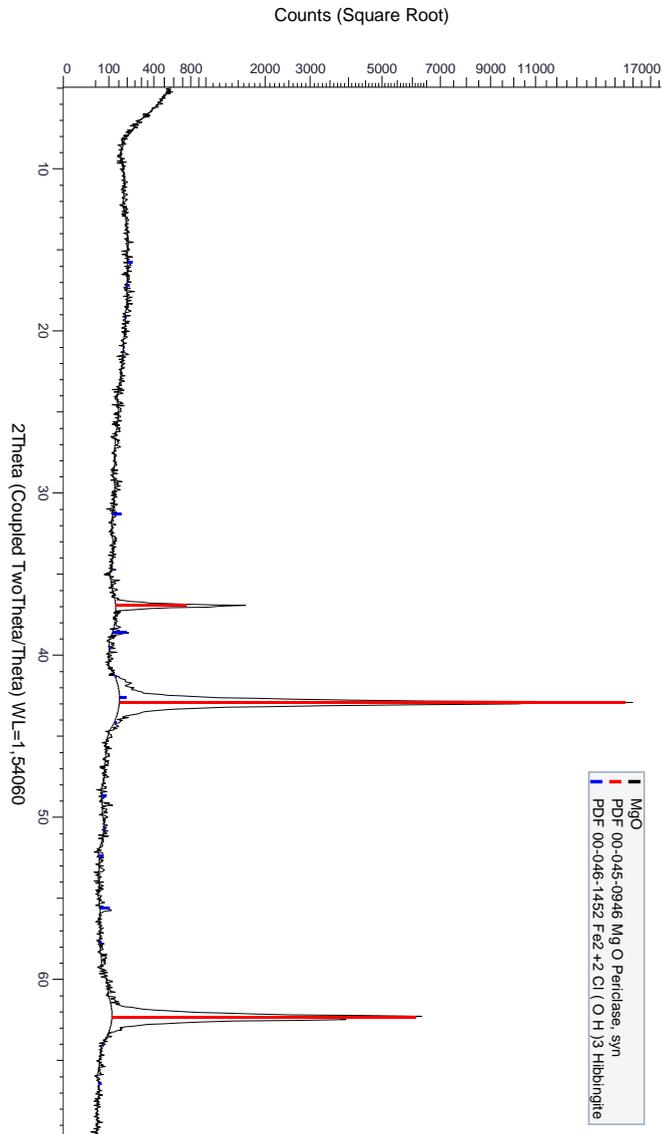


Figura 5.13 - Difractograma de rayos X de la magnesia no calcinada

### Magnesia calcinada

En el análisis de la magnesia calcinada, los únicos picos presentes son de óxido de magnesio MgO a  $37, 43$  y  $62^\circ \sim 2\theta$ , iguales a los de la magnesia no calcinada.

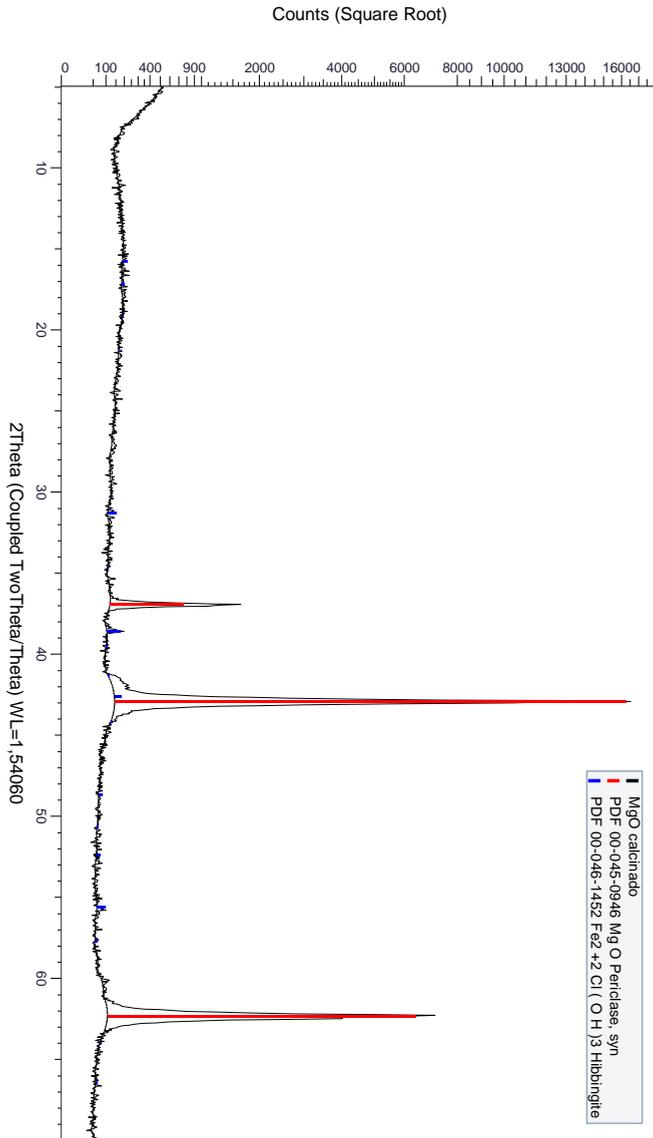


Figura 5.14 - Difractograma de rayos X de la magnesia calcinada

### Fosfato de potasio monobásico

En el análisis del fosfato de potasio monobásico son evidentes muchos picos de fosfato de potasio monobásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), aunque los más importantes son a  $24$ ,  $31$  y  $47$   $^\circ 2\theta$ . Hay un pico a  $21$   $^\circ 2\theta$  de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ).

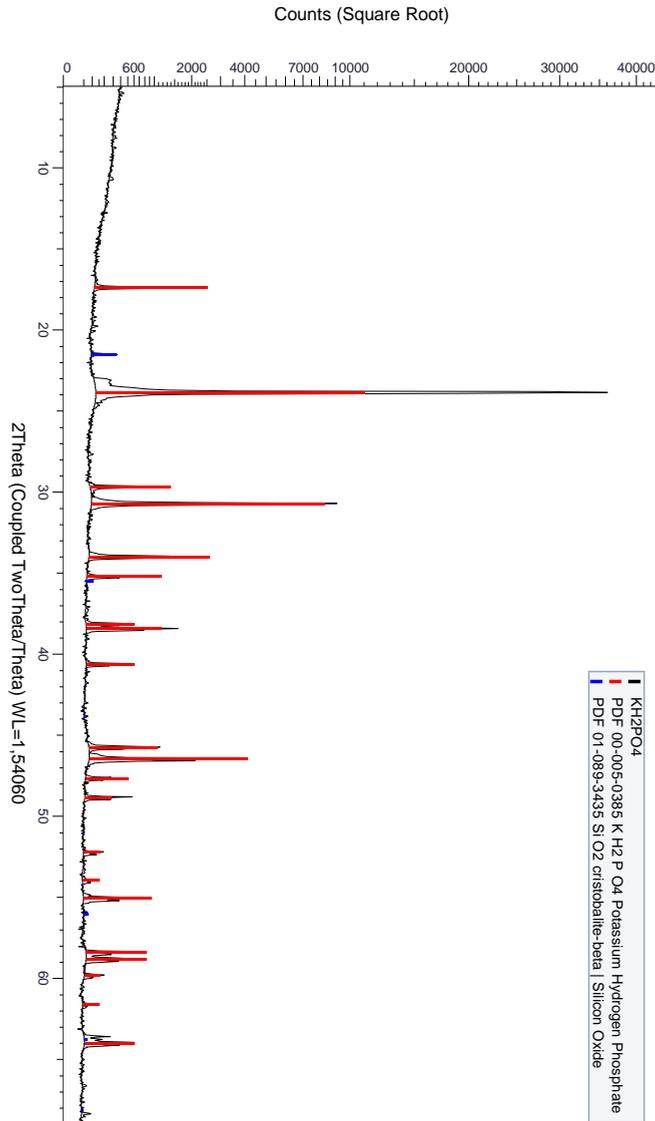


Figura 5.15 - Difractograma de rayos X del fosfato de potasio monobásico

## Ácido bórico

En el análisis del ácido son presentes muchos picos de sassolita ( $B(OH)_3$ ), aunque el más importante es a  $28^\circ \sim 2\theta$ . Son presentes trazas de óxido de boro ( $B_2O_3$ ).

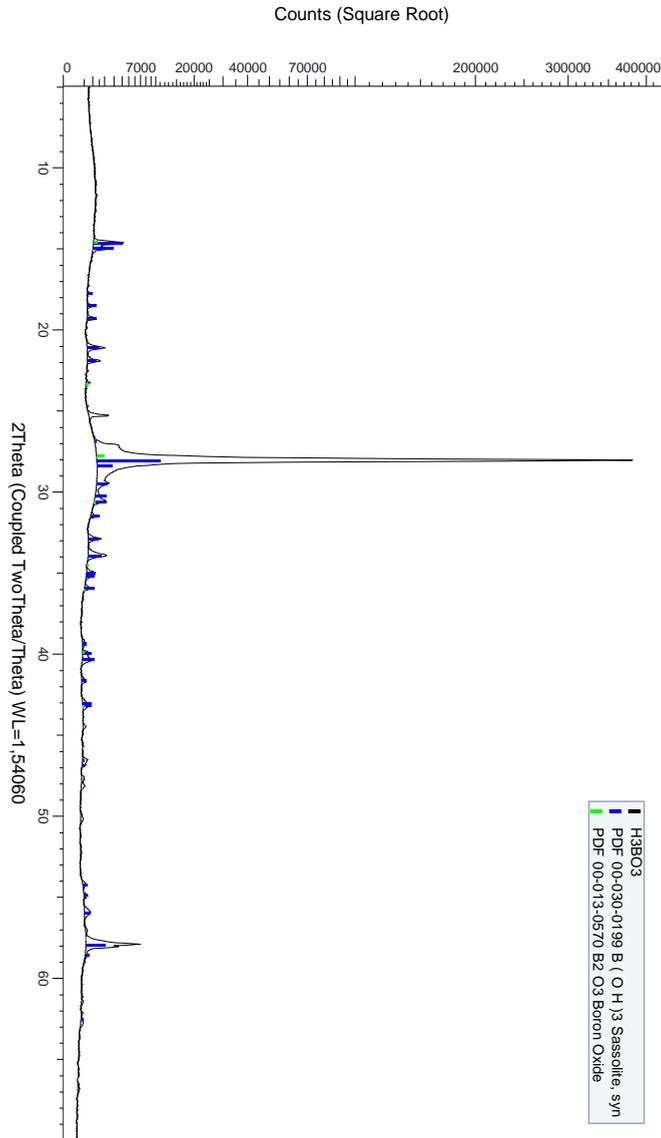


Figura 5.16 - Difractograma de rayos X de ácido bórico

### Bórax

En el análisis del ácido son presentes muchos picos de bórax sintético y no ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), aunque los más importantes son a 15, 18, 31 y  $48^\circ \sim 2\theta$ .

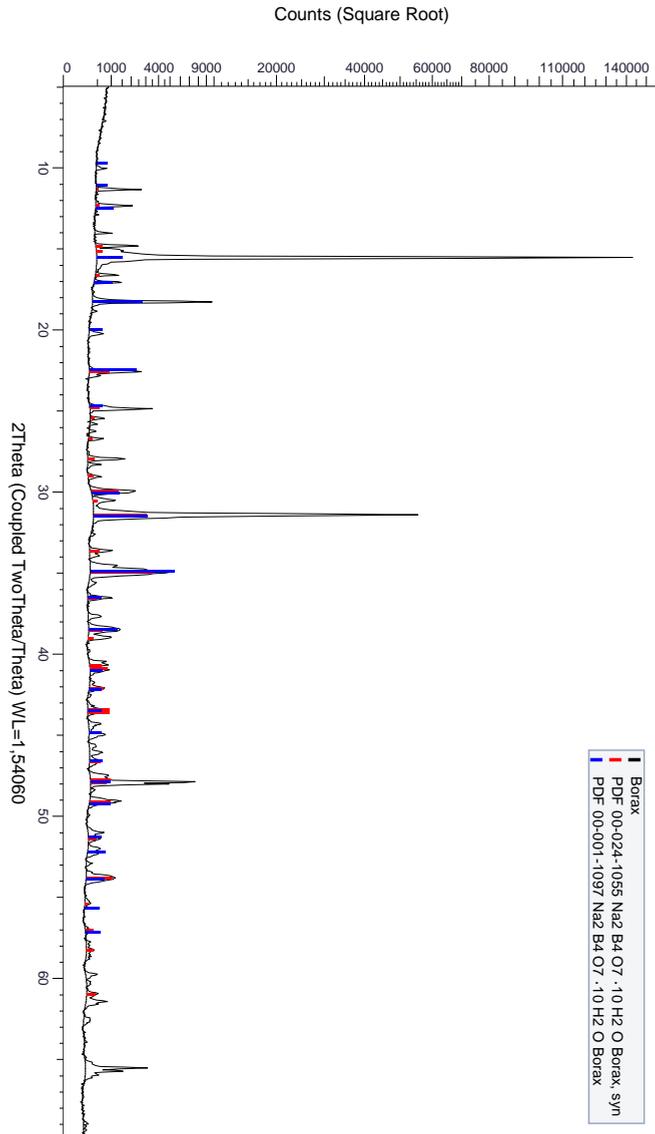


Figura 5.17 - Difractograma de rayos X del bórax

A continuación, se recoge el análisis estructura por difracción de rayos X de la parte cristalina, medido en % (S/Q).

**Tabla 5.2 - Análisis estructura de la parte cristalina**

| <b>Ácido bórico</b>                       |                                 |            |
|---|---------------------------------|------------|
| 87 % crystallinity                        |                                 |            |
| <b>Compound Name</b>                      | <b>Formula</b>                  | <b>S-Q</b> |
| Sassolite, syn                            | $B(OH)_3$                       | 88%        |
| Boron Oxide                               | $B_2O_3$                        | 12%        |
| <b>Bórax</b>                              |                                 |            |
| 93 % crystallinity                        |                                 |            |
| <b>Compound Name</b>                      | <b>Formula</b>                  | <b>S-Q</b> |
| Borax                                     | $Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O$      | 61%        |
| Borax, syn                                | $Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O$      | 39%        |
| <b>Cemento CEM I 52,5R</b>                |                                 |            |
| 82 % crystallinity                        |                                 |            |
| <b>Compound Name</b>                      | <b>Formula</b>                  | <b>S-Q</b> |
| Calcium Silicate                          | $Ca_3SiO_5$                     | 77%        |
| Brownmillerite, syn                       | $Ca_2(Al, Fe^{+3})_2O_5$        | 12%        |
| Anhydrite, syn                            | $Ca(SO_4)$                      | 5%         |
| Bassanite, syn                            | $Ca_2(SO_4)_2H_2O$              | 3%         |
| Gypsum, syn                               | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$            | 2%         |
| Calcium Aluminum Oxide                    | $Ca_{12} Al_{14} O_{32}$        | 1%         |
| <b>Cenizas volantes</b>                   |                                 |            |
| 70 % crystallinity                        |                                 |            |
| <b>Compound Name</b>                      | <b>Formula</b>                  | <b>S-Q</b> |
| Calcium Silicate                          | $Ca_3SiO_5$                     | 64%        |
| Quartz                                    | $SiO_2$                         | 11%        |
| Calcite                                   | $CaCO_3$                        | 11%        |
| Mullite, syn                              | $Al_{2.14} Si_{0.86} O_{4.93}$  | 7%         |
| Srebrodolskite, aluminian, magnesian, syn | $Ca_2 Mg_{0.1} Fe Al_{0.9} O_5$ | 4%         |
| Gypsum                                    | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$            | 2%         |

### 5.2.5 Composición química

La composición química de la materia prima utilizada (cemento, ceniza volante, magnesia calcinada y no calcinada, bórax, ácido bórico y fosfato de magnesio dihidrato) se obtuvo por fluorescencia de rayos X, cuyos resultados vienen recogidos en los siguientes subapartados.

#### Cemento CEM I 52,5R

El análisis de la composición química del CEM I 52,5R revela que el componente mayoritario es el óxido de calcio, seguido por el óxido de silicio, y en menor proporción los óxidos de aluminio, hierro y azufre. Los resultados más específicos están recogidos en la Tabla 5.3.

*Tabla 5.3 - Composición química de los componentes mayoritarios*

| ÓXIDOS                         | COMPOSICIÓN (%) |
|--------------------------------|-----------------|
| H <sub>2</sub> O               | 0.91            |
| CO <sub>2</sub>                | 1.71            |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.24            |
| MgO                            | 2.3             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.88            |
| SiO <sub>2</sub>               | 16.51           |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.152           |
| SO <sub>3</sub>                | 4.551           |
| Cl                             | 0.0928          |
| K <sub>2</sub> O               | 1.3             |
| CaO                            | 64.24           |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.283           |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.019           |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.015           |
| MnO                            | 0.0516          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.567           |
| CoO                            | 0.0029          |
| NiO                            | 0.0095          |
| CuO                            | 0.0132          |
| ZnO                            | 0.0414          |
| Rb <sub>2</sub> O              | 0.0041          |
| SrO                            | 0.071           |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0.0017          |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0.0166          |

### Ceniza Volante

El análisis de la ceniza volante revela que el contenido de CaO es el mayoritario, encontrándose por arriba del 40%. Es muy alto el contenido de SiO<sub>2</sub>, que supera el 20%, mientras con respecto al contenido en SO<sub>3</sub> y MgO estas no superan el 3% ni el 4%, como especifica UNE-EN 450-1:2013.

**Tabla 5.4 - Composición química de la ceniza volante**

| ÓXIDOS                         | COMPOSICIÓN (%) |
|--------------------------------|-----------------|
| H <sub>2</sub> O               | 0.69            |
| CO <sub>2</sub>                | 10.24           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.702           |
| MgO                            | 2.33            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.13           |
| SiO <sub>2</sub>               | 23.26           |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.224           |
| SO <sub>3</sub>                | 3.07            |
| Cl                             | 0.012           |
| K <sub>2</sub> O               | 1.12            |
| CaO                            | 42.52           |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.7             |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.03            |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.018           |
| MnO                            | 0.0464          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.588           |
| CoO                            | 0.0025          |
| NiO                            | 0.011           |
| CuO                            | 0.015           |
| ZnO                            | 0.0165          |
| Rb <sub>2</sub> O              | 0.00494         |
| SrO                            | 0.1058          |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0.00396         |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0.0254          |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0.0017          |
| MoO <sub>3</sub>               | 0.0018          |
| BaO                            | 0.1             |

Se ha comprobado que el tipo de componentes mineralógicos presentes en una ceniza volante depende de su contenido en cal. Por ejemplo, la mullita se suele encontrar en cenizas volantes con bajo contenido en cal. En las cenizas con contenidos menores del 5% de CaO, los componentes cristalinos

relativamente inertes (cuarzo, mullita y óxido de hierro) se encuentran embebidos en una fase vítrea de reacción lenta, rica en hierro y sílice; mientras que en las cenizas con contenidos de calcio por encima del 15%, los componentes cristalinos cementantes ( $\text{CaO}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ , anhidrita, etc.) se encuentran embebidos en una fase vítrea más reactiva y rica en calcio y aluminio.

### **Magnesia no calcinada**

Del análisis de la magnesia no calcinada, obviamente se releva que el componente más consistente es el  $\text{MgO}$ , que es casi el 95% del total.

*Tabla 5.5 - Composición química del fosfato de la magnesia no calcinada*

| ÓXIDOS                             | COMPOSICIÓN (%) |
|------------------------------------|-----------------|
| <b>H<sub>2</sub>O</b>              | 3.45            |
| <b>MgO</b>                         | 94.41           |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.073           |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 0.1             |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0.028           |
| <b>SO<sub>3</sub></b>              | 0.0689          |
| <b>Cl</b>                          | 0.435           |
| <b>CaO</b>                         | 0.882           |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0.0063          |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.004           |
| <b>MnO</b>                         | 0.11            |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.4905          |
| <b>CuO</b>                         | 0.00569         |
| <b>ZnO</b>                         | 0.00919         |
| <b>Br</b>                          | 0.0102          |
| <b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>  | 0.00306         |
| <b>MoO<sub>3</sub></b>             | 0.001           |

### **Magnesia calcinada**

Del análisis de la magnesia calcinada, como por la no calcinada, también se releva que el componente más consistente es el  $\text{MgO}$ , que en este caso es por arriba del 95% del total. A través de la calcinación baja el contenido en agua.

**Tabla 5.6 - Composición química del fosfato de la magnesia no calcinada**

| ÓXIDOS                         | COMPOSICIÓN (%) |
|--------------------------------|-----------------|
| H <sub>2</sub> O               | 2.01            |
| MgO                            | 95.85           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.063           |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.1             |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.029           |
| SO <sub>3</sub>                | 0.0715          |
| Cl                             | 0.365           |
| K <sub>2</sub> O               | 0.025           |
| CaO                            | 0.896           |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.0047          |
| MnO                            | 0.114           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.5073          |
| CuO                            | 0.00638         |
| ZnO                            | 0.00916         |
| Br                             | 0.0076          |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0.00269         |

#### Fosfato de potasio monobásico

Del análisis del fosfato de potasio monobásico, se releva que el componente más consistente es el P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> que es por arriba del 45%, pero también es muy alto el contenido de K<sub>2</sub>O que supera el 35% y de H<sub>2</sub>O que es del 14%.

**Tabla 5.7 - Composición química del fosfato de potasio monobásico**

| ÓXIDOS                         | COMPOSICIÓN (%) |
|--------------------------------|-----------------|
| H <sub>2</sub> O               | 14              |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.068           |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.045           |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 47.63           |
| SO <sub>3</sub>                | 0.485           |
| K <sub>2</sub> O               | 37.65           |
| CaO                            | 0.045           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.012           |
| CuO                            | 0.0078          |
| Rb <sub>2</sub> O              | 0.00492         |

### Ácido bórico

Del análisis del ácido bórico se releva que está compuesto casi totalmente de  $B_2O_3$  (55%) y de  $H_2O$  (44%).

**Tabla 5.8 - Composición química del ácido bórico**

| ÓXIDOS                             | COMPOSICIÓN (%) |
|------------------------------------|-----------------|
| <b>H<sub>2</sub>O</b>              | 44.25           |
| <b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>  | 55.63           |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0.04            |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.0083          |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 0.012           |
| <b>SO<sub>3</sub></b>              | 0.021           |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0.0021          |
| <b>CaO</b>                         | 0.0154          |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.0033          |
| <b>CuO</b>                         | 0.00207         |

### Bórax

Del análisis del ácido bórico se releva que está compuesto casi totalmente de  $Na_2B_4O_7$  (70%) y de  $H_2O$  (30%).

**Tabla 5.9 - Composición química del bórax**

| ÓXIDOS  | COMPOSICIÓN (%) |
|---|-----------------|
| <b>H<sub>2</sub>O</b>                           | 29.66           |
| <b>Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub></b> | 70.1            |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>                          | 0.022           |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>               | 0.041           |
| <b>SO<sub>3</sub></b>                           | 0.025           |
| <b>Cl</b>                                       | 0.0077          |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>                           | 0.0218          |
| <b>CaO</b>                                      | 0.0788          |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>              | 0.00624         |
| <b>CuO</b>                                      | 0.00323         |
| <b>SrO</b>                                      | 0.00732         |
| <b>ZrO<sub>2</sub></b>                          | 0.00022         |

#### 5.2.6 Componentes de traza de la composición

En las siguientes tablas, se muestran los valores correspondientes a los componentes de traza de cada muestra analizada.

**Tabla 5.10 - Componentes de traza de la composición de cemento y ceniza volante**

| Cemento   |        | Ceniza Volante |         |
|-----------|--------|----------------|---------|
| <b>H</b>  | 0.1018 | <b>H</b>       | 0.07722 |
| <b>C</b>  | 0.4667 | <b>C</b>       | 2.795   |
| <b>O</b>  | 36.23  | <b>O</b>       | 42.34   |
| <b>Na</b> | 0.18   | <b>Na</b>      | 0.521   |
| <b>Mg</b> | 1.39   | <b>Mg</b>      | 1.41    |
| <b>Al</b> | 2.05   | <b>Al</b>      | 5.36    |
| <b>Si</b> | 7.718  | <b>Si</b>      | 10.87   |
| <b>P</b>  | 0.0663 | <b>P</b>       | 0.098   |
| <b>S</b>  | 1.823  | <b>S</b>       | 1.23    |
| <b>Cl</b> | 0.0928 | <b>Cl</b>      | 0.012   |
| <b>K</b>  | 1.08   | <b>K</b>       | 0.933   |
| <b>Ca</b> | 45.91  | <b>Ca</b>      | 30.39   |
| <b>Ti</b> | 0.17   | <b>Ti</b>      | 0.42    |
| <b>V</b>  | 0.01   | <b>V</b>       | 0.017   |
| <b>Cr</b> | 0.011  | <b>Cr</b>      | 0.013   |
| <b>Mn</b> | 0.04   | <b>Mn</b>      | 0.0359  |
| <b>Fe</b> | 2.495  | <b>Fe</b>      | 3.209   |
| <b>Co</b> | 0.0023 | <b>Co</b>      | 0.002   |
| <b>Ni</b> | 0.0075 | <b>Ni</b>      | 0.0088  |
| <b>Cu</b> | 0.0106 | <b>Cu</b>      | 0.012   |
| <b>Zn</b> | 0.0333 | <b>Zn</b>      | 0.0132  |
| <b>Rb</b> | 0.0038 | <b>Rb</b>      | 0.00451 |
| <b>Sr</b> | 0.0601 | <b>Sr</b>      | 0.08945 |
| <b>Y</b>  | 0.0014 | <b>Y</b>       | 0.00312 |
| <b>Zr</b> | 0.0123 | <b>Zr</b>      | 0.0188  |
|           |        | <b>Nb</b>      | 0.0012  |
|           |        | <b>Mo</b>      | 0.0012  |
|           |        | <b>Ba</b>      | 0.094   |

**Tabla 5.11 - Componentes de traza de la composición de magnesia calcinada, magnesia no calcinada y fosfato de potasio monobásico**

| Magnesia no calcinada |         | Magnesia calcinada |         | Fosfato de potasio monobásico |        |
|-----------------------|---------|--------------------|---------|-------------------------------|--------|
| <b>H</b>              | 0.3861  | <b>H</b>           | 0.2249  | <b>H</b>                      | 1.567  |
| <b>O</b>              | 41.02   | <b>O</b>           | 40.34   | <b>O</b>                      | 46.03  |
| <b>Mg</b>             | 56.93   | <b>Mg</b>          | 57.8    | <b>Na</b>                     | 0.05   |
| <b>Al</b>             | 0.039   | <b>Al</b>          | 0.033   | <b>Si</b>                     | 0.021  |
| <b>Si</b>             | 0.047   | <b>Si</b>          | 0.047   | <b>P</b>                      | 20.79  |
| <b>P</b>              | 0.012   | <b>P</b>           | 0.013   | <b>S</b>                      | 0.194  |
| <b>S</b>              | 0.0276  | <b>S</b>           | 0.0286  | <b>K</b>                      | 31.26  |
| <b>Cl</b>             | 0.435   | <b>Cl</b>          | 0.365   | <b>Ca</b>                     | 0.032  |
| <b>Ca</b>             | 0.63    | <b>K</b>           | 0.021   | <b>Fe</b>                     | 0.0084 |
| <b>Ti</b>             | 0.0038  | <b>Ca</b>          | 0.64    | <b>Cu</b>                     | 0.0062 |
| <b>Cr</b>             | 0.0027  | <b>Cr</b>          | 0.0032  | <b>Rb</b>                     | 0.0045 |
| <b>Mn</b>             | 0.0849  | <b>Mn</b>          | 0.0881  |                               |        |
| <b>Fe</b>             | 0.343   | <b>Fe</b>          | 0.3549  |                               |        |
| <b>Cu</b>             | 0.00455 | <b>Cu</b>          | 0.0051  |                               |        |
| <b>Zn</b>             | 0.00739 | <b>Zn</b>          | 0.00736 |                               |        |
| <b>Br</b>             | 0.0102  | <b>Br</b>          | 0.0076  |                               |        |
| <b>Y</b>              | 0.00241 | <b>Y</b>           | 0.00212 |                               |        |
| <b>Mo</b>             | 0.00068 |                    |         |                               |        |

**Tabla 5.12 - Componentes de traza de la composición de bórax y ácido bórico**

| Bórax     |        | Ácido Bórico |        |
|-----------|--------|--------------|--------|
| <b>H</b>  | 3.319  | <b>H</b>     | 4.952  |
| <b>B</b>  | 15.07  | <b>B</b>     | 17.28  |
| <b>O</b>  | 65.44  | <b>O</b>     | 77.7   |
| <b>Na</b> | 16.02  | <b>Na</b>    | 0.03   |
| <b>Si</b> | 0.01   | <b>Al</b>    | 0.0044 |
| <b>P</b>  | 0.018  | <b>Si</b>    | 0.0056 |
| <b>S</b>  | 0.0099 | <b>S</b>     | 0.0085 |
| <b>Cl</b> | 0.0077 | <b>K</b>     | 0.0017 |

|           |         |           |         |
|-----------|---------|-----------|---------|
| <b>K</b>  | 0.0181  | <b>Ca</b> | 0.011   |
| <b>Ca</b> | 0.0563  | <b>Fe</b> | 0.0023  |
| <b>Fe</b> | 0.00436 | <b>Cu</b> | 0.00165 |
| <b>Cu</b> | 0.00258 |           |         |
| <b>Sr</b> | 0.00619 |           |         |
| <b>Zr</b> | 0.00016 |           |         |

### 5.2.7 Análisis termogravimétrico

El análisis térmico gravimétrico (TGA) permite comprobar la pérdida o ganancia de peso de una muestra en función de la temperatura. En los TGA dinámicos la muestra a estudiar se calienta en una atmósfera determinada con una rampa de evolución de la temperatura controlada y durante el proceso se van registrando las variaciones de masa en función de la temperatura. Las curvas obtenidas del calentamiento, empezando todas con un valor del 100% en el eje de ordenadas, representan el porcentaje de variación de masa frente a la temperatura, apreciando que todas las curvas son decrecientes, pues los materiales se degradan, es decir pierden masa, según aumenta la temperatura a la que se somete la muestra. Existe la correspondencia de pérdida de peso asociada a cada transformación. La curva muestra las distintas etapas en las que tienen lugar la descomposición térmica de las materias primas.

#### Cemento CEM I 52,5R

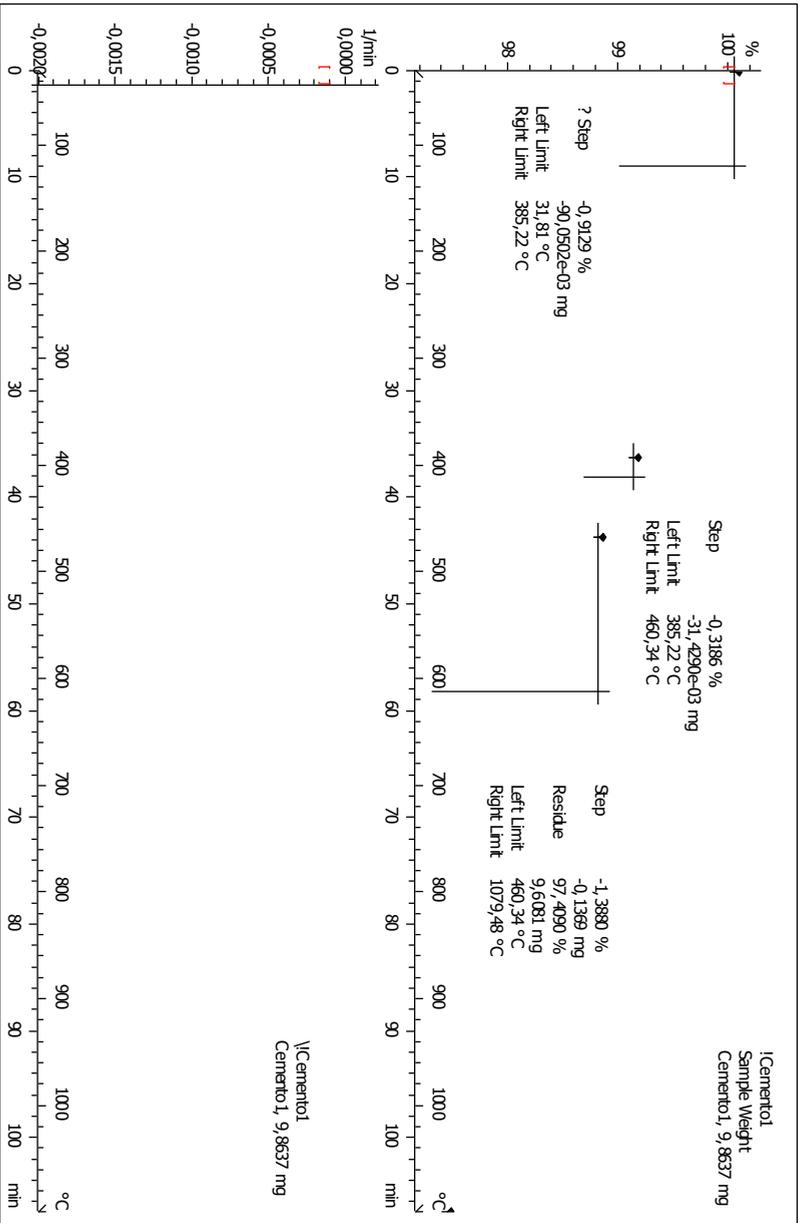
Al calentar muestras de cemento se producen dos descomposiciones identificables en las curvas del TGA. La primera de ellas, alrededor de 400°C, corresponde a la descomposición del  $\text{Ca(OH)}_2$  para dar agua y  $\text{CaO}$ . Calculando la pérdida de masa de agua se puede conocer la cantidad de portlandita que hay en la muestra. La segunda transformación ocurre alrededor de 600°C y corresponde a la descomposición del  $\text{CaCO}_3$  para dar  $\text{CO}_2$  y agua. En este caso determinando la masa de  $\text{CO}_2$  perdida se puede calcular la cantidad de carbonato cálcico que hay en la muestra.

Además de estas dos fases, es posible determinar la cantidad de agua combinada en el gel C-S-H y en las fases minoritarias de aluminatos y sulfoaluminatos AFm y AFt a partir del agua que se pierde entre 110°C aproximadamente y el comienzo de la descomposición de la portlandita. Puesto que el agua perdida en ese rango de temperaturas es debida principalmente a la descomposición del C-S-H, a partir de aquí se la denominará 'agua de gel C-S-H'. El agua perdida entre 20 y 110°C, que correspondería al agua evaporable, depende del ambiente en el que se encuentra la muestra.

exo

Cement o 1

18. 07. 2017 11: 51: 12

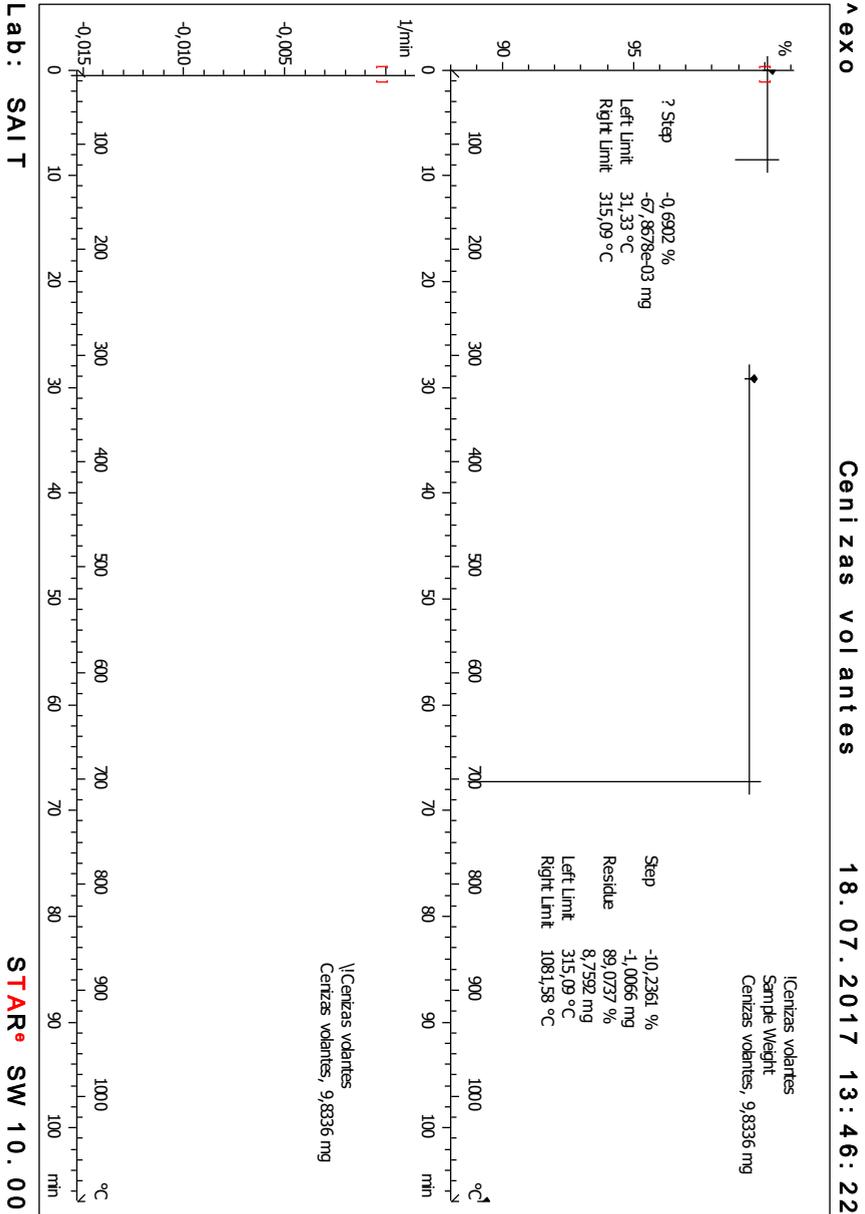


Lab: SAI T

STAR® SW 10.00

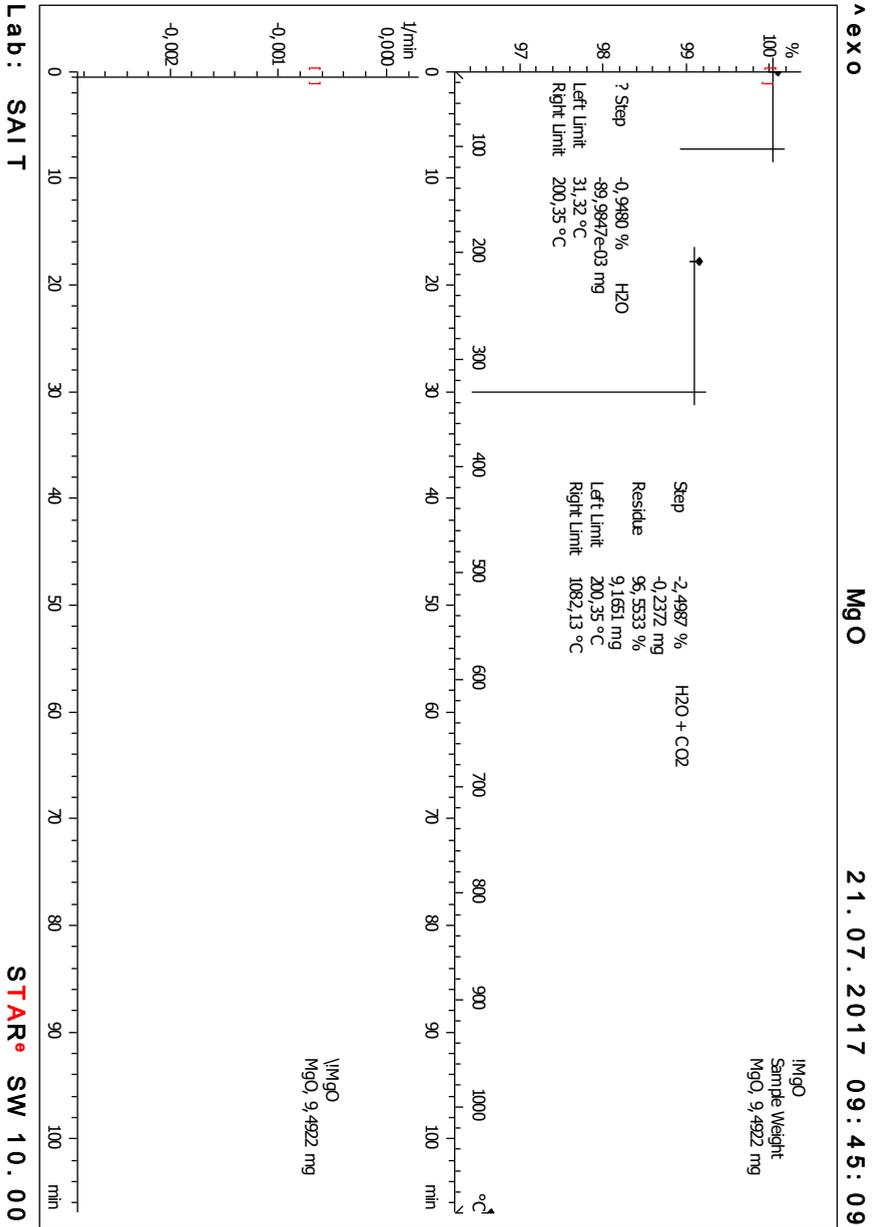
**Ceniza Volante**

De 110°C a 700°C hay una pérdida significativa de peso cercana al 10.2%, siendo este cambio drástico de pendiente en la curva posiblemente debido a la evolución de derivados del carbono.



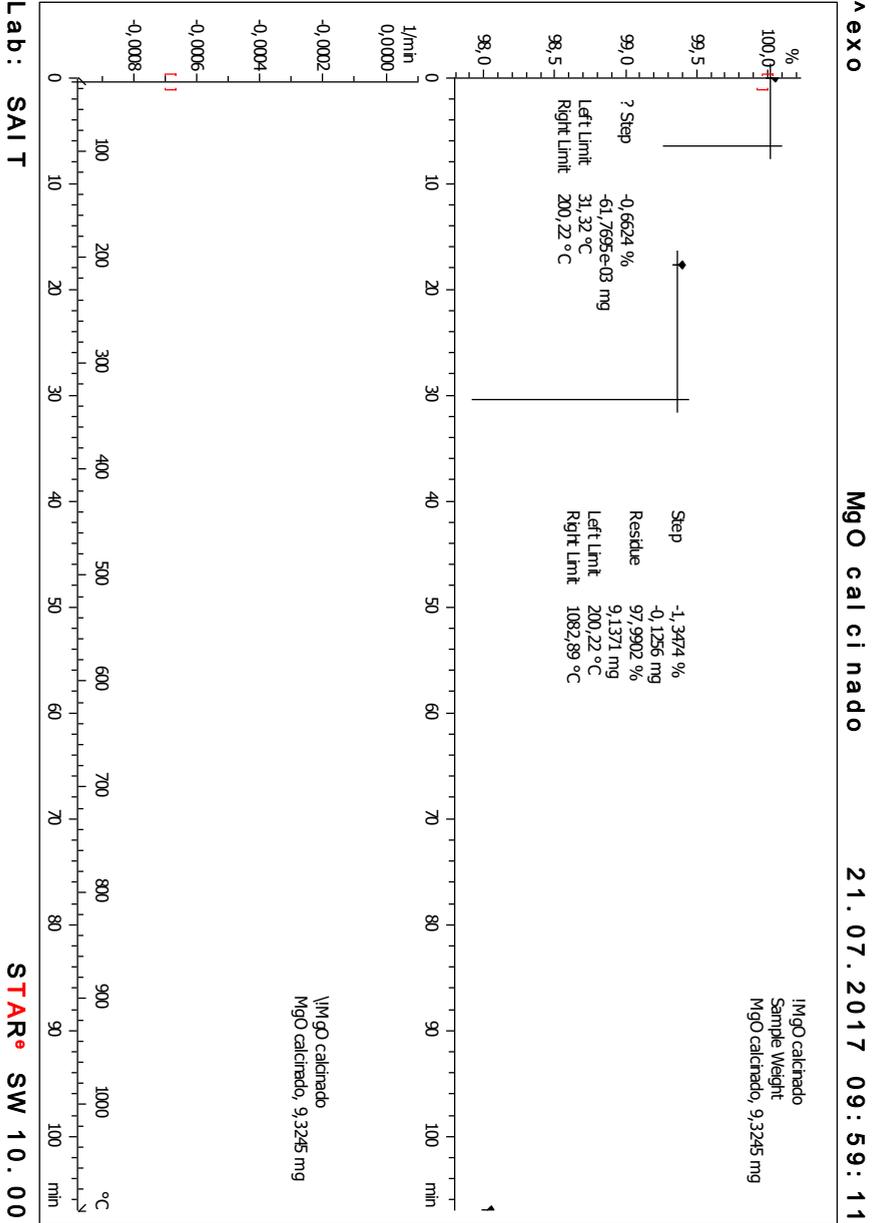
**Magnesia no calcinada**

De 100°C a 330°C hay una pérdida de peso cercana al 2.5% de agua y dióxido de carbono.



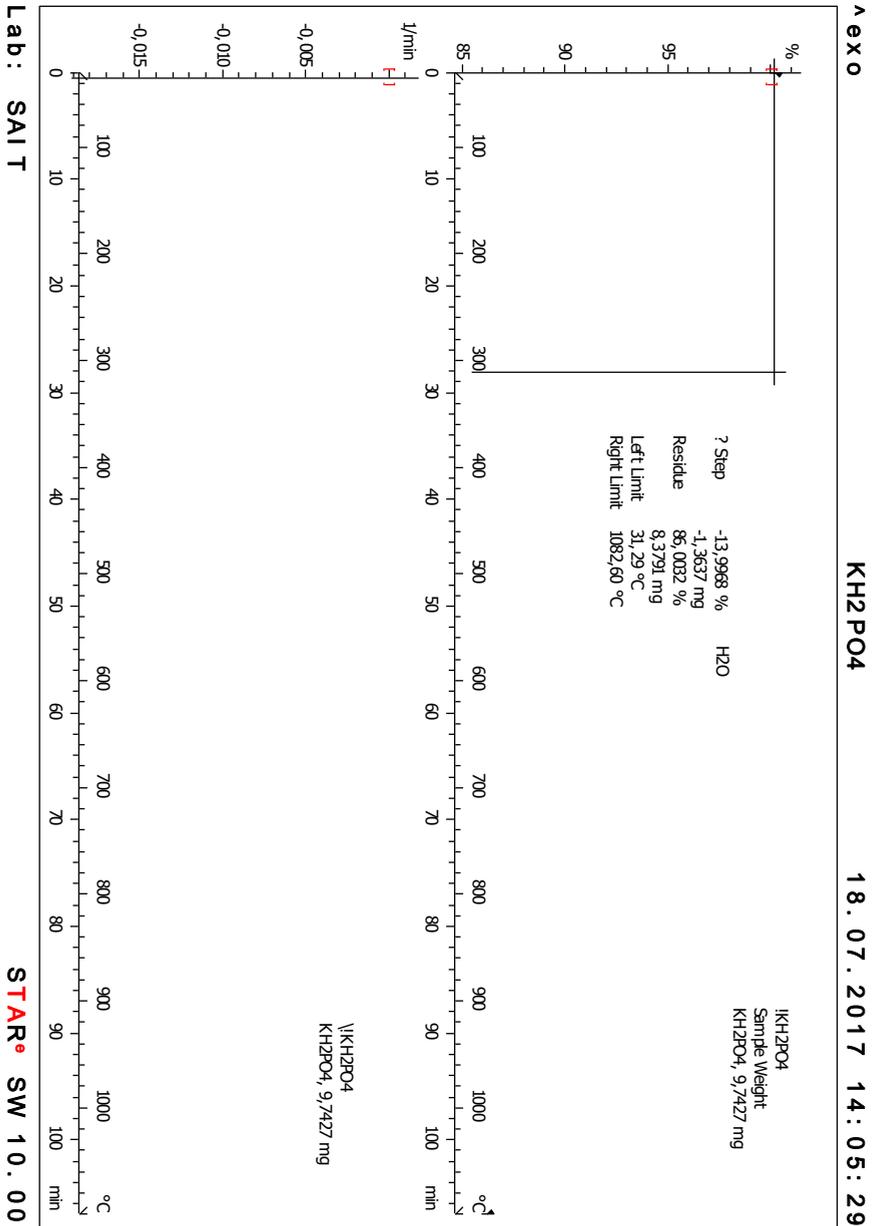
**Magnesia calcinada**

De 100°C a 320°C hay una pérdida de peso muy baja del 1.4%.



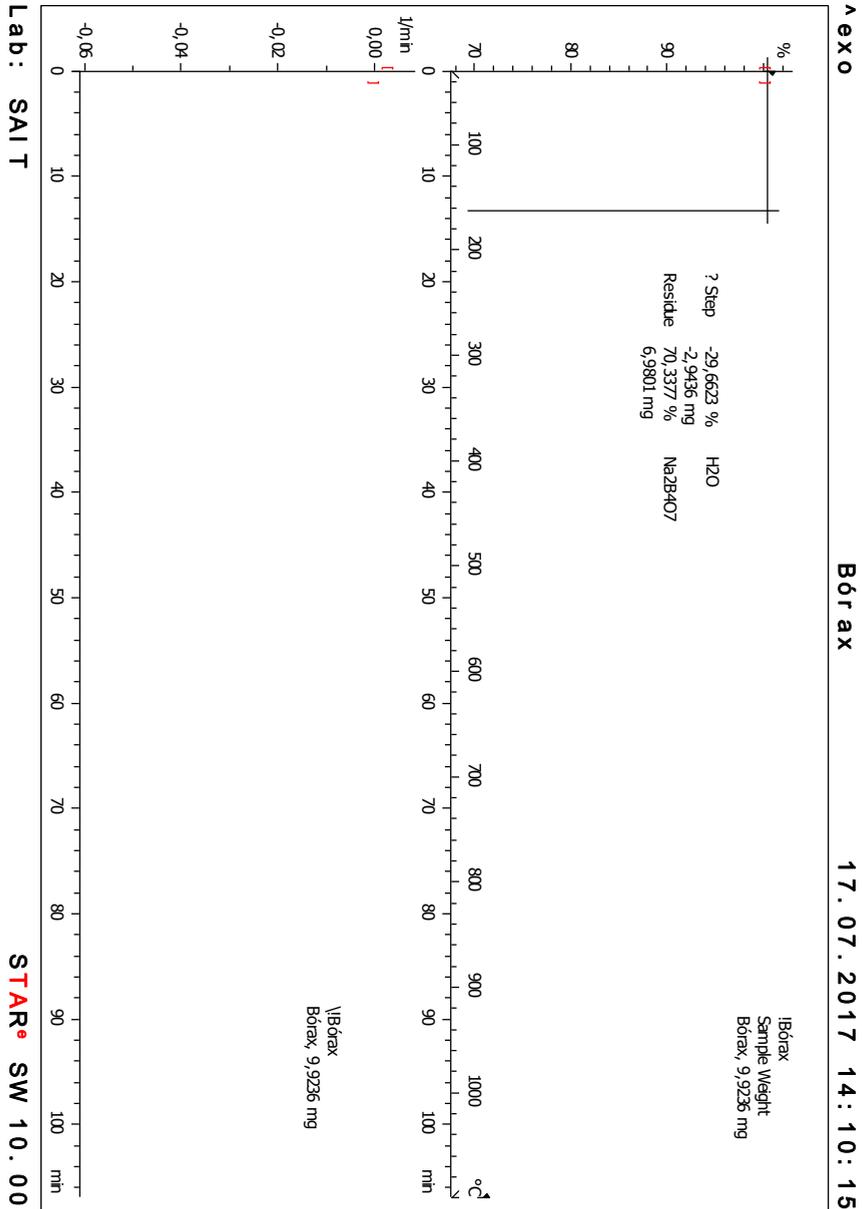
**Fosfato de potasio monobásico**

De 100°C a 330°C hay una pérdida de peso muy significativa cercana al 14%, debido a la evaporación de agua.



### Ácido bórico

Hasta 140°C hay una pérdida de peso importante, del 45% debido a la evaporación agua, después de la cual se queda solo óxido de boro.





### 5.2.8 Análisis del pH de la materia prima

Los componentes de pastas y morteros que se han realizado durante el trabajo han sido elegidos para los resultados que se obtienen en términos de pH. Por esta razón ha sido indispensable analizar el pH de ellos en la primera fase experimental del trabajo.

Para analizar el pH existe un número considerable de métodos. En este trabajo el método utilizado para conducir esta campaña de mediciones es descrito enseguida.

Ante todo, para obtener una cantidad apta para medir el pH, se realiza el ensayo poniendo dentro de un recipiente 6 g de la muestra de analizar y 25 g de agua.



**Figura 5.18 – Cantidades de agua y de muestra utilizadas para el ensayo de medición del pH**

Después se agita la suspensión obtenida por medio de un agitador magnético durante 5 minutos. El agitador magnético consiste en una placa

dotada de montaje de resistencias eléctricas encima de la cual se pone el recipiente con la suspensión realizada. El movimiento agitador tiene lugar a través de un imán de agitador magnético (o barra de agitación), que consiste en una pequeña barra magnética que se coloca dentro del recipiente. De hecho, el imán ubicado en la placa impulsa un movimiento circular de velocidad controlada de la barra de agitación y, por consecuencia, se realiza la agitación de la suspensión dentro del recipiente.



**Figura 5.19 - Mezcladora magnética**

Después que termine el procedimiento de agitación magnética, se mide el pH de la suspensión utilizando el pH-metro. Antes de realizar la medición, el pH-metro va calibrado sumergiendo el electrodo dentro de dos soluciones tampones, una alcalina (con pH igual a 9.18) y una ácida (con pH igual a 4.00) y, una vez calibrado, se sumerge el electrodo dentro de la solución de la cual medir el pH. Se espera hasta que no se estabilice la lectura. El pH será el visualizado en la pantalla digital del aparato.

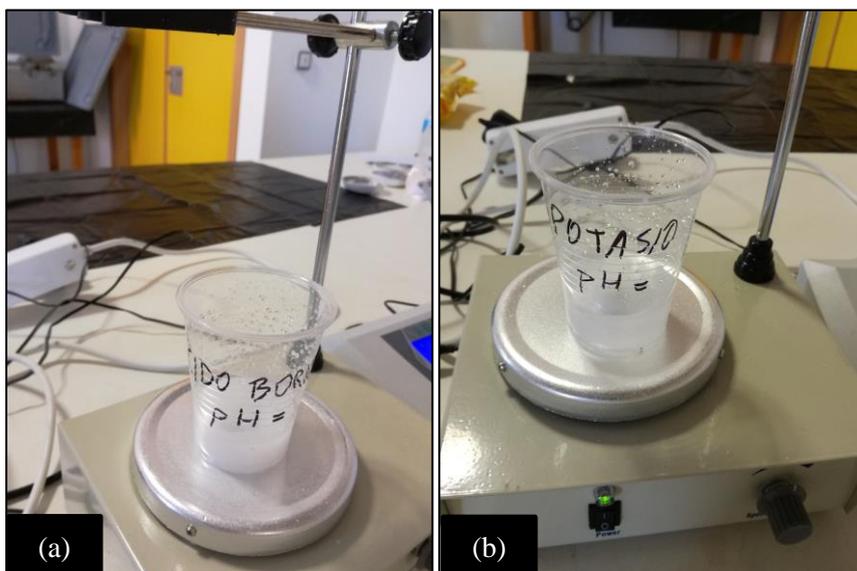


**Figura 5.20 - Calibración del pH-metro**

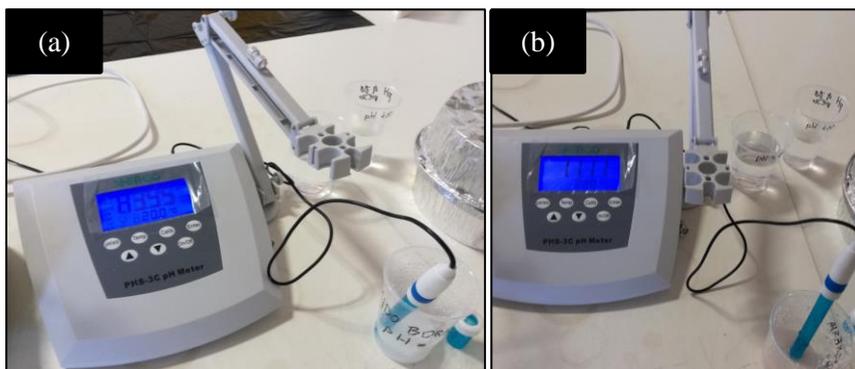
Los resultados obtenidos con esta metodología de medición luego han sido verificados y comparados con una metodología más sencilla, o sea el papel tornasol. Este es un método práctico y económico para medir el pH, aunque sin embargo no tiene la misma exactitud del pH-metro electrónico. Por esta razón, ha sido utilizado solo como método de verificación de los resultados.

El funcionamiento del papel de tornasol es el siguiente: el papel utilizado se presenta de color amarillo – tratándose del papel de tornasol neutro, utilizable para sustancias tanto ácidas como básicas – que va sumergido

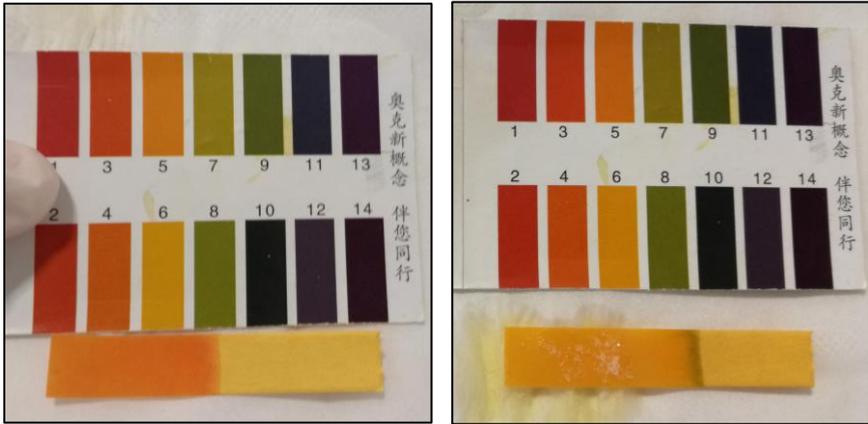
dentro de la solución querida durante unos segundos; en el momento en que se pone en contacto con la solución este papel cambia de color. El color depende del pH de la solución y, de hecho, constituye el indicador de pH. El papel neutro, inicialmente de color amarillo, cuando entra en contacto con soluciones ácidas se convierte en rojo, mientras en contacto con bases se convierte en azul. Los pasos sucesivos se muestran en la Figura 5.21 y en la Figura 5.22.



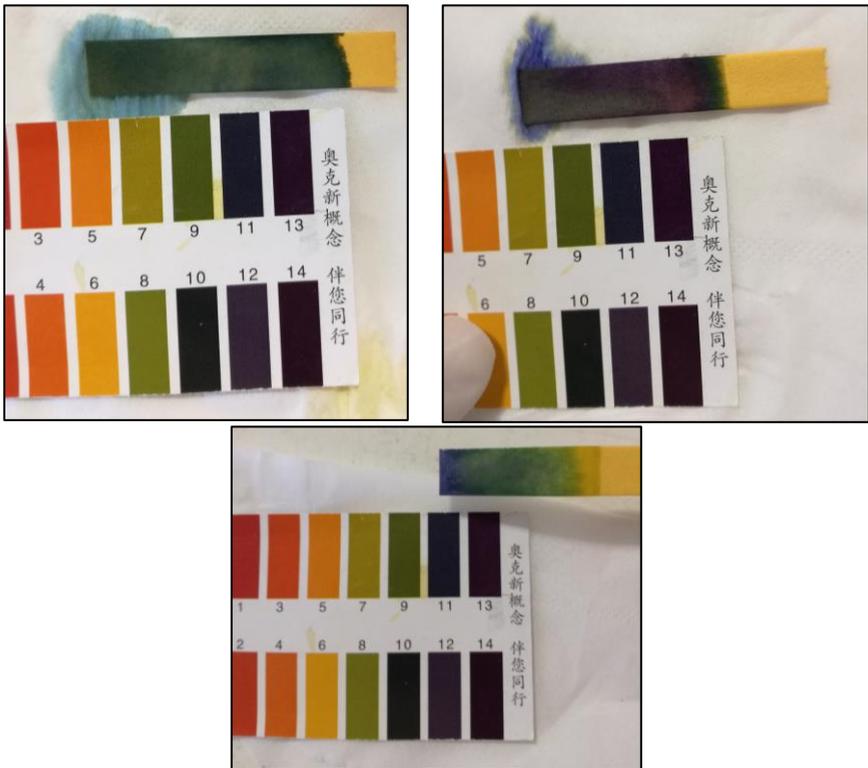
**Figura 5.21 – Mezcla magnética para ácido bórico (a) y fosfato de potasio (b)**



**Figura 5.22 - Mediciones del pH del ácido bórico (a) y de magnesia no calcinada (b)**



**Figura 5.23 - Resultados perceptibles por el papel de tornasol para fosfato dihidrógeno de potasio (izquierda) y ácido bórico (derecha)**



**Figura 5.24 - Resultados perceptibles por el papel de tornasol para bórax (izquierda), ceniza volante (derecha) y magnesia no calcinada (abajo)**

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5.13.

**Tabla 5.13 - pH de la materia prima utilizada**

| Componente   | pH    |
|--|-------|
| Fosfato de potasio monobásico (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) | 3,92  |
| Ácido Bórico (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )                   | 3,95  |
| Bórax  | 9,33  |
| Ceniza Volante   | 12,53 |
| Cemento CEM I 52,5R  | 12,65 |
| Magnesia calcinada (MgO)   | 11,12 |
| Magnesia no calcinada (MgO)                                      | 10,28 |
| Posos de café  | 7,05  |

### 5.3 DOSIFICACIONES DE LAS PASTAS Y DE LOS MORTEROS

Una vez caracterizados los productos, han sido realizadas pastas resultado de mezclas de dos o más productos entre ellos. La confección de las pastas es una etapa intermedia para permitir la evaluación de la forma de interactuar de los materiales de la Tabla 5.13 entre ellos con el fin último de crear morteros y, en trabajos futuros, hormigones con las características deseadas y aptas para acoger organismos.

Las pastas se pueden distinguir entre ellas por los productos constituyentes y por la relación entre ellos, como se puede observar en la Tabla 5.14.

**Tabla 5.14 - Dosificaciones de las pastas realizadas**

| Serie  | Número | Componente                            | Cantidades  | Cantidad (g)            |
|--|--------|---------------------------------------|---|-------------------------|
| Magnesia + Fosfato de potasio                  | 29-1   | Potasio<br>Magnesia                   | M/P=4 [mol/mol]   | 2.747<br>3.253          |
|  | 29-3   | Potasio<br>Magnesia                   | M/P=12 [mol/mol]  | 1.318<br>4.682          |
| Magnesia + Ceniza volante + Fosfato de potasio | 29-2   | Potasio<br>Magnesia<br>Ceniza volante | M/P=4 (se sustituye el 50% de magnesia con ceniza volante)  | 2.747<br>1.627<br>1.627 |
|  | 29-4   | Potasio<br>Magnesia<br>Ceniza volante | M/P=12 (se sustituye el 50% de magnesia con ceniza volante) | 1.318<br>2.341<br>2.341 |

|  |       |   |  |                                  |
|--|-------|---|--|----------------------------------|
| Magnesia +<br>Ceniza volante<br>+ Fosfato de<br>potasio +<br>Retardantes | 29-5  | Potasio<br>Magnesia<br>Ceniza volante<br>Ácido bórico | M/P=12 (se sustituye<br>el 50% de magnesia<br>con ceniza volante),<br>con ácido bórico | 1.267<br>2.251<br>2.251<br>0.231 |
|  | 29-6  | Potasio<br>Magnesia<br>Ceniza volante<br>Bórax        | M/P=12 (se sustituye<br>el 50% de magnesia<br>con ceniza volante),<br>con bórax        | 1.267<br>2.251<br>2.251<br>0.231 |
| Ceniza volante<br>+ posos de<br>café                                     | 29-7  | Ceniza volante<br>Café                                | Café:ceniza volante =<br>70:30 [g/g]   | 1.800<br>4.200                   |
| Ceniza volante<br>+ posos de<br>café                                     | 29-8  | Ceniza volante<br>Café                                | Café:ceniza volante =<br>50:50 [g/g]   | 3.000<br>3.000                   |
| Ceniza volante<br>+ posos de<br>café                                     | 29-9  | Ceniza volante<br>Café                                | Café:ceniza volante =<br>30:70 [g/g]   | 4.200<br>1.800                   |
| Magnesia +<br>posos de café  | 29-10 | Magnesia<br>Café                                      | Café:magnesia =<br>70:30 [g/g]   | 1.800<br>4.200                   |
| Magnesia +<br>posos de café  | 29-11 | Magnesia<br>Café                                      | Café:magnesia =<br>50:50 [g/g]   | 3.000<br>3.000                   |
| Magnesia +<br>posos de café  | 29-12 | Magnesia<br>Café                                      | Café:magnesia =<br>30:70 [g/g]   | 4.200<br>1.800                   |
| Magnesia +<br>Ceniza volante<br>+ Fosfato de<br>potasio + Café           | 29-13 | Potasio<br>Magnesia<br>Ceniza volante<br>Café         | M/P=12, con<br>café:(magnesia+ceniza<br>volante) = 30:70                               | 1.318<br>1.639<br>1.639<br>1.405 |
| Cemento +<br>Fosfato de<br>potasio                                       | 29-14 | Potasio<br>Cemento                                    | el cemento está en la<br>misma cantidad de<br>magnesia cuando<br>M/P=4                 | 2.747<br>3.253                   |
|  | 29-15 | Potasio<br>Cemento                                    | el cemento está en la<br>misma cantidad de<br>magnesia cuando<br>M/P=12                | 1.318<br>4.682                   |
| Ceniza volante<br>+ Fosfato de<br>potasio                                | 29-16 | Potasio<br>Ceniza volante                             | la ceniza volante está<br>en la misma cantidad<br>de magnesia cuando<br>M/P=4          | 2.747<br>3.253                   |
|  | 29-17 | Potasio<br>Ceniza volante                             | la ceniza volante está<br>en la misma cantidad<br>de magnesia cuando<br>M/P=12         | 1.318<br>4.682                   |

Ante todo han sido creadas las primeras pastas, o sea las que contienen magnesia y fosfato de potasio, que han sido tomadas como base para todas las otras mezclas. Para obtener las dosificaciones de estas primeras pastas, han sido tomadas en cuenta las relaciones utilizadas dentro de las investigaciones del estado del arte (cfr. apartado 4.2.1).

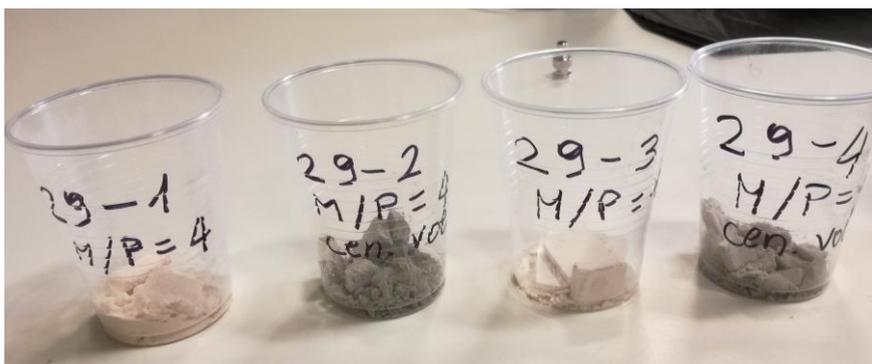
Las pastas han sido realizadas para evaluar el pH, entonces ha sido realizada para todas las mezclas una cantidad de 6 gramos (cfr. procedimiento para analizar el pH en el apartado 5.2.8). Dentro de las investigaciones, pero, las relaciones entre están expresadas en fracciones molares, entonces, conociendo los pesos molares de cada componente, para deducir las cantidades en gramos ha sido necesario hacer la conversión multiplicando la cantidad en moles por el peso molecular correspondiente y en fin se ha hecho una proporción de las cantidades obtenidas con el fin de llegar a obtener 6 gramos de pasta.

**Tabla 5.15 - Pesos moleculares de los componentes**

| Nombre componente                     | Fórmula química          | Peso molecular [g/mol] |
|---------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| <b>Fosfato de potasio dihidrógeno</b> | $\text{KH}_2\text{PO}_4$ | 136.09                 |
| <b>Óxido de magnesio</b>              | $\text{MgO}$             | 40.3                   |

A partir de esta base de magnesia y fosfato de potasio luego han sido insertados otros productos para estudiar su manera de influir sobre el pH dentro de estas mezclas. Parte de la magnesia ha sido sustituida con ceniza volante, dado que esta por un lado tiene un coste inferior comparada con la magnesia y por otro lado es un material de desecho desde el cual se podría obtener un hormigón más sostenible. Asimismo, dado que el problema de los morteros a base de magnesio es el tiempo de fraguado que se ha constatado en algunas investigaciones ser muy corto, se han realizado mezclas añadiendo retardantes – en el específico ácido bórico y bórax – para evaluar su influencia sobre el pH.

Sin embargo, ha sido evaluada asimismo la influencia del café sobre el pH, realizando mezclas de café con ceniza volante o magnesia. En este caso las dosificaciones encontradas en las investigaciones eran calculadas en gramos, entonces no ha sido necesario hacer ninguna conversión de unidad de medida para obtener las pastas. Las pastas obtenidas son muestreadas en la Figura 5.25y Figura 5.26.



**Figura 5.25 - Pastas 29-1, 29-2, 29-3, 29-4**



**Figura 5.26 - Pastas 29-5,6,7,8,9,10,11,12,13**

En cuanto a los morteros, han sido realizadas cinco diferentes mezclas para comparar sus propiedades con las de la mixtura de referencia. La mezcla de referencia ha sido realizada con los materiales y en las dosificaciones del mortero de cemento tradicional.

Para su fabricación de todos los morteros ha sido aplicado el procedimiento establecido por la norma UNE-EN 196-1:2005, que consta de los siguientes pasos: se vierten dentro de la amasadora agua y cemento (relación agua/cemento de 0,50) y se mezclan durante 30 segundos a una velocidad lenta (velocidad 3 para la amasadora empleada); durante el proceso de mezcla se pone la arena y se sigue mezclando. Después que haya pasado este tiempo se pone dentro de la mezcla el superfluidificante y se mezcla durante 75 segundos a la velocidad máxima de la amasadora. Se pone el mortero así obtenido dentro de un molde normalizado lo cual se coloca sobre una compactadora para cementos y morteros: se llena durante una primera fase medio molde y se le dejan dar 60 golpes por la compactadora y en la segunda fase va llenado todo el molde y se le dejan dar otros 60 golpes. Al final de todo, se quita el mortero que sobra del molde y se pone todo a fraguar en ambiente húmedo.



**Figura 5.27 - Proceso de mezcla dentro de la mezcladora**



**Figura 5.28 - Compactadora para cementos y morteros**



**Figura 5.29 - Mortero en el molde**

Todas las mezclas confeccionadas contienen una componente básica y una ácida. En todos los casos la componente ácida es representada del fosfato dihidrógeno de potasio, a parte en el mortero 8-78 en que la componente ácida es constituida del café. Así que los morteros se difieren entre ellos por la componente básica (cemento, ceniza volante o magnesita), que por cierto constituye la parte más consistente de la mezcla. De hecho, la dosificación del fosfato dihidrógeno de potasio (y de los posos de café para el mortero 8-78) ha sido obtenida considerando la inserción dentro de todas las mezclas del 1.50% del total de la fase en polvo. La cantidad de agua añadida a la mezcla es en todos los morteros la que da una relación agua/cemento de 0,50, no obstante durante el trabajo haya sido posible constatar la baja trabajabilidad del mortero a base de magnesita; por esto se ha añadido 50 g de agua a la mezcla 4-74, que contiene solo magnesita, y 25 g de agua a las mezclas 6-76 y 8-78, que contienen en la misma cantidad magnesita y ceniza volante. Para todos los morteros, en fin, ha sido añadida la misma proporción de arena caliza (la norma UNE-EN 196-1:2005 establece una relación arena/cemento de 3) y de superplastificante. Las dosificaciones de los morteros están facilitadas en la Tabla 5.16, mientras en la Figura 5.30 están los ensayos de los morteros realizados.

**Tabla 5.16 - Dosificaciones de los morteros realizados**

| Código      | Fosfato de potasio (g) | CEM I 52,5R (g) | CV (g) | MgO no calc. (g) | Café (g) | Arena caliza (g) | Superplast. (g) | Agua (g) |
|-------------|------------------------|-----------------|--------|------------------|----------|------------------|-----------------|----------|
| <b>1-62</b> | 0                      | 450             | 0      | 0                | 0        | 1350             | 2               | 225      |
| <b>7-68</b> | 6.75                   | 443.25          | 0      | 0                | 0        | 1350             | 2               | 225      |
| <b>2-72</b> | 6.75                   | 0               | 443.25 | 0                | 0        | 1350             | 2               | 225      |
| <b>4-74</b> | 6.75                   | 0               | 0      | 443.25           | 0        | 1350             | 2               | 275      |
| <b>6-76</b> | 6.75                   | 0               | 221.62 | 221.62           | 0        | 1350             | 2               | 250      |
| <b>8-78</b> | 0                      | 0               | 221.62 | 221.62           | 6.75     | 1350             | 2               | 250      |



**Figura 5.30 - Ensayos de los morteros realizados**

#### **5.4 ANÁLISIS DEL PH DE LAS PASTAS**

Realizadas las pastas, antes de confeccionar los morteros se ha analizado el pH en estado fresco y después de 7 días de las pastas.

Tanto en estado fresco como después de 7 días, como por los componentes ha sido tomada una cantidad de 6 gramos de pasta y ha sido mezclada con 25 gramos de agua. Las mezclas obtenidas se han sometido al mismo tratamiento de los componentes, descrito en el apartado 5.2.8. Los resultados obtenidos por este análisis están facilitados en la Tabla 5.17.

**Tabla 5.17 - Resultados del pH en estado fresco y a los 7 días**

| Serie  | Número | pH (estado fresco) | pH (7 días) |
|--|--------|--------------------|-------------|
| Magnesia + Fosfato de potasio                                | 29-1   | 6.82               | 10.55       |
|  | 29-3   | 11.88              | 10.60       |
| Magnesia + Ceniza volante + Fosfato de potasio               | 29-2   | 6.60               | 10.60       |
|  | 29-4   | 11.50              | 10.47       |
| Magnesia + Ceniza volante + Fosfato de potasio + Retardantes | 29-5   | 6.68               | 10.56       |
|  | 29-6   | 7.06               | 10.77       |
| Ceniza volante + posos de café                               | 29-7   | 11.08              | 9.72        |
| Ceniza volante + posos de café                               | 29-8   | 11.25              | 10.63       |
| Ceniza volante + posos de café                               | 29-9   | 11.61              | 10.88       |

|  |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|
| Magnesia + posos de café                                       | 29-10 | 9.70  | 10.17 |
| Magnesia + posos de café                                       | 29-11 | 9.83  | 9.98  |
| Magnesia + posos de café                                       | 29-12 | 10.09 | 10.05 |
| Magnesia + Ceniza volante + Fosfato de potasio + posos de café | 29-13 | 6.83  | 10.39 |
| Cemento + Fosfato de potasio                                   | 29-14 | 7.16  | 10.89 |
|  | 29-15 | 11.95 | 10.95 |
| Ceniza volante + Fosfato de potasio                            | 29-16 | 6.96  | 10.65 |
|  | 29-17 | 11.90 | 10.75 |

## 5.5 ENSAYOS DE LOS MORTEROS EN ESTADO FRESCO

### 5.5.1 Determinación del pH durante el fraguado

Actualmente no existe una normativa específica para la medición del pH en los materiales cementicios. En esta investigación el método utilizado para medirlo es el descrito para la medición del pH de la materia prima en el apartado 5.2.8. En este caso específico se han tomado los 6 gramos necesarios para hacer la medida de los morteros frescos.

### 5.5.2 Ensayo de consistencia (Slump-Flow)

El ensayo de consistencia consiste en la medición de la trabajabilidad del hormigón en estado fresco. El procedimiento para realizar la prueba es parecido a lo para hormigones que está descrito en el apartado 2.4.

El aparato utilizado para la prueba es un molde troncocónico de 100 mm de base inferior, de 50 mm de superior y de 150 mm de altura. Para pisar se ha utilizado una varilla de 10 mm de diámetro y de 300 mm de longitud y para medir se ha utilizado una regla de 1 mm de precisión.

Como descrito antes, se pone el mortero dentro del molde troncocónico que luego viene levantado. La consistencia se expresa por la disminución de altura del mortero respecto al molde.



**Figura 5.31 - Conos de Abrams para dos morteros**



**Figura 5.32 - Mediciones de la altura resultante de la prueba de resistencia**

## **5.6 ENSAYOS DE LOS MORTEROS EN ESTADO ENDURECIDO**

### **5.6.1 Ensayo de resistencia a compresión**

La resistencia mecánica a compresión es la carga necesaria para comprimir una probeta prismática de 160mm x 40mm x 40mm hasta su rotura. La metodología para determinar la resistencia a compresión está establecida en la norma UNE-EN 196-1:2005.

A la edad requerida, en el caso de esta investigación 7 y 28 días, las probetas se retiran de su medio de conservación en húmedo y se les aplica una carga dos veces, la primera vez a la probeta entera y la segunda a uno de los trozos derivados de la primera rotura.

Los trozos de las probetas se colocan con sus caras laterales hacia arriba y hacia abajo entre los dos platos de acero de la prensa de compresión, de forma que los lados de la probeta que estuvieron en contacto con las caras del molde estén en contacto con los platos de la prensa en una sección de 40mm x 40mm (Figura 5.33).



**Figura 5.33 - Prueba de resistencia a compresión de un mortero**

Debe calcularse el valor medio de los valores obtenidos y expresarse en  $\text{N}/\text{mm}^2$ . La carga de resistencia a compresión  $R_c$  viene dada por la fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Donde:

$R_c$  es la resistencia a compresión en  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$F_c$  es la máxima carga en la rotura en N;

$1600=40\text{mm} \times 40\text{mm}$  que es el área de la probeta en  $\text{mm}^2$ .

La prueba para determinar la resistencia a la compresión se realizó a edades distintas (7 y 28 días), para comprobar su comportamiento con el tiempo. Por cada edad, se tomaron dos testigos para cada muestra, obteniendo así un promedio para cada una de las resistencias a las diferentes edades, cuyos resultados son los que se muestran en el apartado 6.3.

### **5.6.2 Ensayo de retracción**

La retracción representa la disminución de volumen del mortero por evaporación de agua durante su fraguado. El ensayo tiene el objetivo de estudiar cómo se produce la contracción del concreto en el tiempo; esta evaluación es importante porque la retracción produce tensiones internas de tracción que pueden dar lugar a fisuras dentro del material. De hecho, durante el proceso de secado y endurecimiento, a originar la retracción es la pérdida de agua de mezclado por evaporación.

La retracción está influenciada por una multitud de parámetros. Naturalmente, dentro de las variables que afectan a ella está la composición y, de hecho, dentro del presente trabajo se ha evaluado como varía la retracción al variar de esta. Otros factores que ejercen su influencia sobre la retracción de una pieza son el contenido de agua, el tamaño de los agregados, los aditivos añadidos al mortero, la forma de realización del curado en términos de temperatura y humedad y, en fin, las dimensiones de la pieza misma.

Para ejecutar la prueba se ha hecho referencia a la metodología avanzada en la norma UNE 80112-2016. Como establecido por esta norma, los ensayos han sido realizados empleando moldes de  $285 \times 25 \times 25$  mm dotados en cada extremidad de pernos calibradores (Figura 5.34), que permiten realizar las medidas de longitud de las probetas en un

comparador de longitudes a lo largo del proceso de curado, una vez desmoldadas y sometidas a una atmósfera de secado.



**Figura 5.34 - Molde para ensayos de retracción**

Como establecido de la UNE 80122-2016, la variación de la longitud de cada probeta se calcula mediante la fórmula

$$V\% = 100 \frac{\Delta L}{L_0} = 100 \frac{L_{nd} - L_{1d}}{L_0}$$

Donde

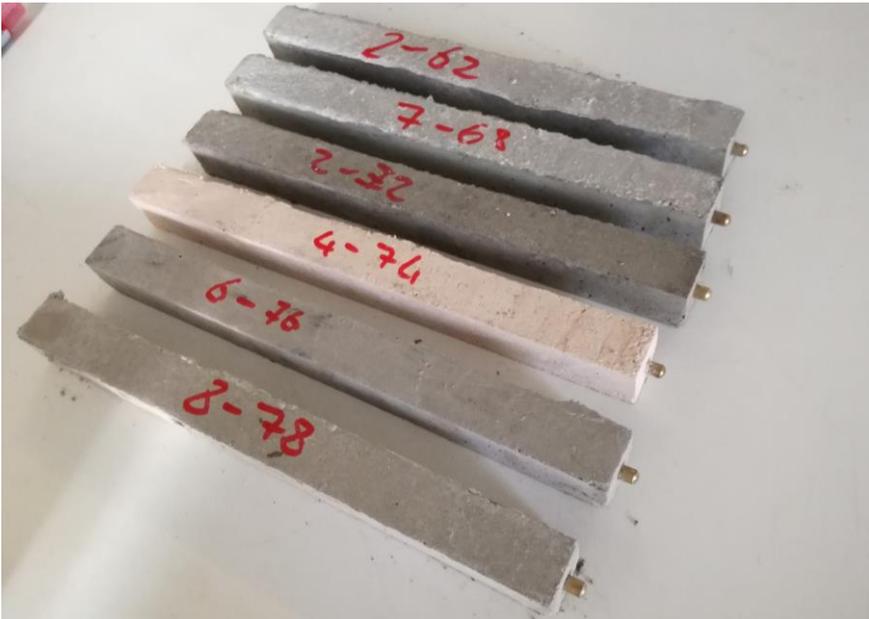
- $\Delta L$  es la variación de longitud de la probeta con relación a la longitud original;
- $L_0$  es la longitud de la base del molde, igual a 250 mm;
- $L_{nd}$  es la longitud de la probeta medida a n días.

Las mediciones se ejecutan por medio del comparador de longitudes (Figura 5.35): ante todo se mide la longitud de una galga patrón de dimensiones estándares y, luego, se mide la longitud de la probeta. De esta manera el comparador da la diferencia de longitud entre la probeta y la galga.



**Figura 5.35 - Galga patrón y comparador analógico del equipo**

Con este método se han realizado las mediciones todos los días y se ha calculado el  $\Delta V$  durante el tiempo para cada probeta. Como este tipo de hormigón deberá ser empleado para fachadas, pues para soportar las intemperies como el viento, la lluvia y el sol, los ensayos, después de ser desmoldeados, se han dejado secar al aire libre. Después que han sido desmoldeados se ha calculado con el método antes descrito la retracción de todos los morteros realizados (Figura 5.36 y Figura 5.37).



*Figura 5.36 - Probetas para ensayar a retracción*



*Figura 5.37 - Probetas sometidas a medición*

### **5.6.3 Determinación del pH en estado endurecido**

El pH de los morteros ha sido medido mediante el método descrito en el apartado 5.2.8. Los ensayos han sido sometidos a mediciones a los 7 y a los 28 días, tomando las muestras de las probetas utilizadas para hacer las pruebas a compresión. Las muestras se han preparado machacando una cantidad suficiente de mortero y pasando por un tamiz de 1mm el polvo obtenido para alcanzar una mezcla homogénea.

#### 5.6.4 Ensayo de absorción de agua

La absorción de agua ha sido evaluada midiendo de manera regular el peso de las probetas destinadas al estudio de la absorción de agua. Estas, tras ser desmoldadas, se han dejado en húmedo y cada día se realizó su pesaje con una balanza de 0.1 gramos de precisión. Una vez pesadas todas las probetas, la absorción de agua se ha calculado en porcentaje sobre el peso original de la probeta al comenzar el ensayo, mediante la fórmula:

$$A_{agua}(\%) = 100 \frac{(P_n - P_1)}{P_1}$$

Donde

- $P_n$  es el peso de la probeta en el día  $n$  después del desmoldeado;
- $P_1$  es el peso de la probeta en el primer día.

#### 5.6.5 Evaluación de la pérdida de peso

La pérdida de peso ha sido evaluada, como en el caso de la absorción de agua, midiendo de manera regular el peso de las probetas destinadas al estudio de la pérdida de peso por evaporación. Estas, tras ser desmoldadas, se han dejado en seco y cada día se realizó su pesaje con una balanza de 0.1 gramos de precisión. Una vez pesadas todas las probetas, las pérdidas de peso se han calculado en porcentaje sobre el peso original de la probeta al comenzar el ensayo, mediante la fórmula:

$$P_p(\%) = 100 \frac{(P_1 - P_n)}{P_1}$$

Donde

- $P_n$  es el peso de la probeta en el día  $n$  después del desmoldeado;
- $P_1$  es el peso de la probeta en el primer día.



## Capítulo 6. Resultados y discusión

En este capítulo se muestran y se discuten los resultados de los ensayos ejecutados sobre los morteros. Los morteros realizados tienen las composiciones facilitadas en la Tabla 6.1.

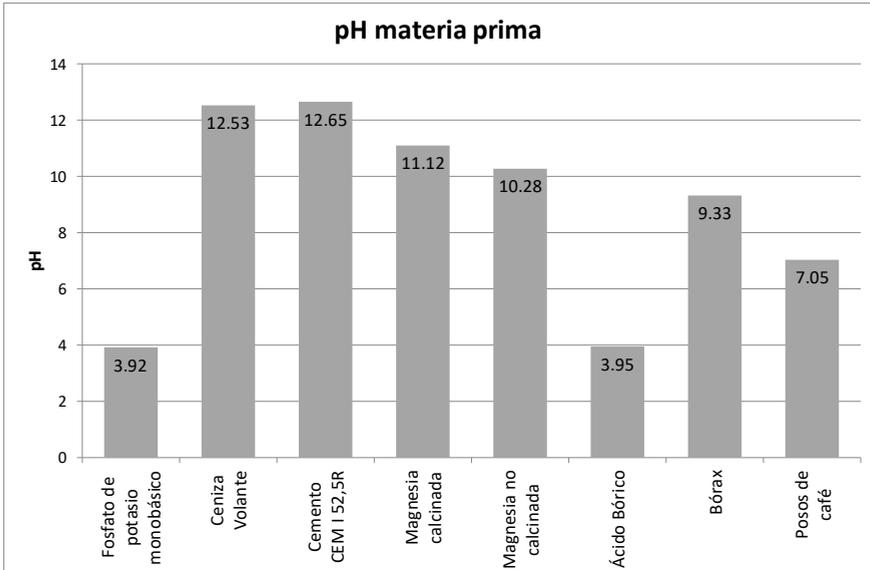
**Tabla 6.1 - Composición de los morteros**

| Código | Fosfato de potasio (g) | CEM I 52,5R (g) | CV (g) | MgO no calc. (g) | Café (g) | Arena caliza (g) | Super-plast. (g) | Agua (g) |
|--------|------------------------|-----------------|--------|------------------|----------|------------------|------------------|----------|
| 1-62   | 0                      | 450             | 0      | 0                | 0        | 1350             | 2                | 225      |
| 7-68   | 6.75                   | 443.25          | 0      | 0                | 0        | 1350             | 2                | 225      |
| 2-72   | 6.75                   | 0               | 443.25 | 0                | 0        | 1350             | 2                | 225      |
| 4-74   | 6.75                   | 0               | 0      | 443.25           | 0        | 1350             | 2                | 275      |
| 6-76   | 6.75                   | 0               | 221.62 | 221.62           | 0        | 1350             | 2                | 250      |
| 8-78   | 0                      | 0               | 221.62 | 221.62           | 6.75     | 1350             | 2                | 250      |

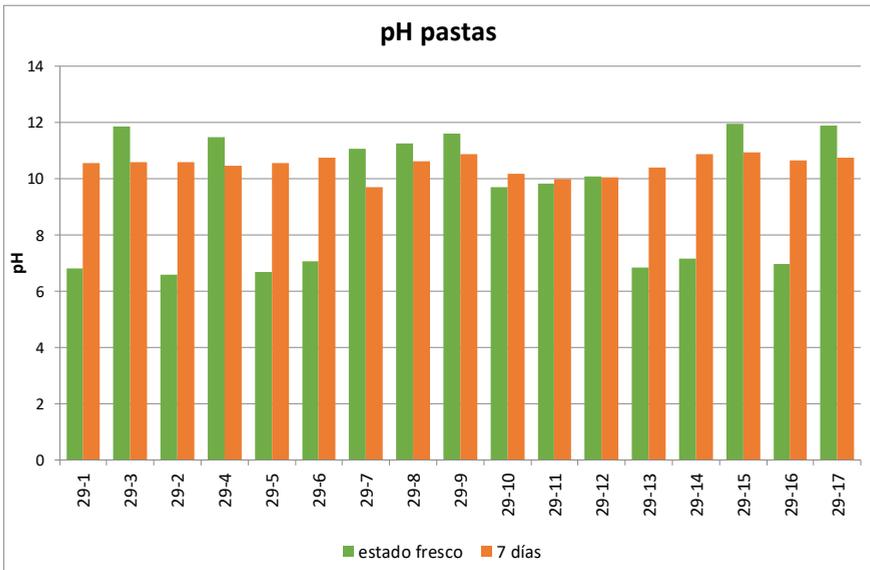
### 6.1 PH EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

Se ha hecho una evaluación del pH tanto de la materia prima empleada, como de las pastas y los morteros realizados.

Los valores de pH de la materia prima y las pastas medidos se han facilitado en las Tabla 5.13 y Tabla 5.17, respectivamente. Para tener en este capítulo un cuadro general de los resultados, se han sacado las representaciones gráficas de estas tablas (Gráfico 6.1 y Gráfico 6.2), que se facilitan en este apartado.



**Gráfico 6.1 - pH de la materia prima**



**Gráfico 6.2 - pH de las pastas**

En cuanto a la materia prima, se observa que los materiales que constituyen los componentes mayoritarios de los morteros realizados son todos básicos (cemento Portland, ceniza volante y magnesía). En cuanto a los retardantes, se aprecia una diferencia sustancial de pH entre ácido bórico y bórax y,

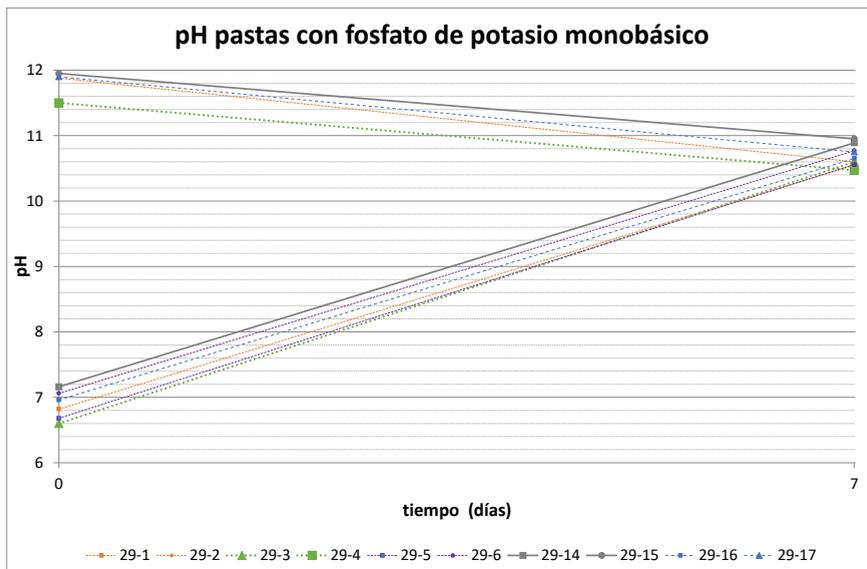
como se verá a continuación, esto influye (aunque no considerablemente) sobre el pH de las pastas realizadas insertando los dos retardantes.

Con respecto a las pastas, comparando las 29-1, 29-3, 29-14 y 29-16 que contienen la misma cantidad de potasio tal que  $Mg/P$  sea igual a 4 pero componente básico diferente, en estado fresco el valor de pH más bajo lo es alcanzado de la 29-3 que contiene ceniza volante mezclada con magnesia, mientras la pasta que restituye el valor de pH más elevado es la pasta 29-14 que contiene cemento Portland.

Además, en estado fresco se ha encontrado una notable diferencia de pH entre pastas con una relación  $Mg/P$  diferente (resultado obtenido en precedencia por Lee et al. (2017)), ya que en media en las pastas realizadas con  $Mg/P$  igual a 4 el pH resulta igual a 7 mientras si  $Mg/P$  es igual a 12 el pH resultante es alrededor de 11.80.

La adición de retardantes provoca, como había obtenido Yang et al. (2010) añadiendo ácido bórico a las mezclas, un aumento del pH (29-5, 29-6), sobre todo añadiendo bórax. Esto puede ser consecuencia del pH más alto del bórax comparado al ácido bórico.

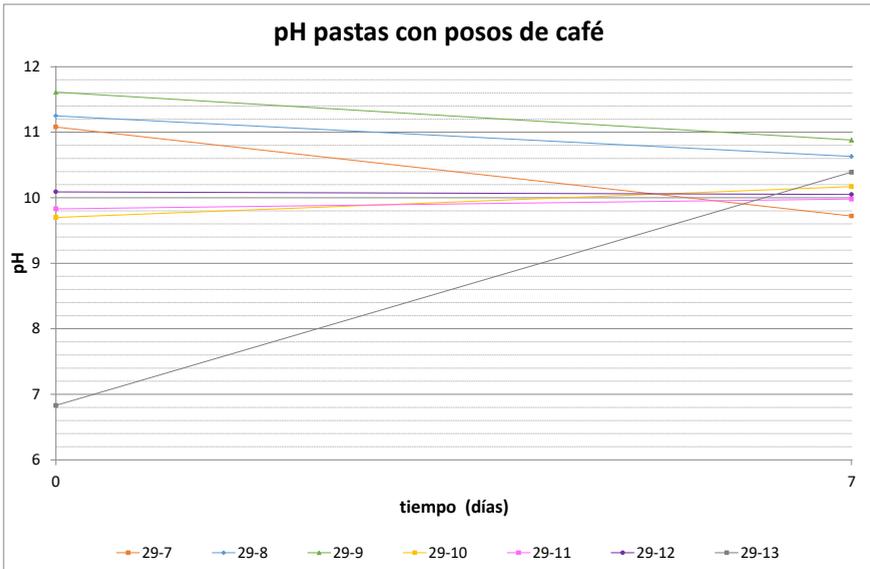
Resulta que a los 7 días, no obstante sus diferencias iniciales importantes, el pH de todas las pastas contenientes fosfato de potasio está entre 10.5 y 11 (Gráfico 6.3). Esto deriva de que las reacciones entre fosfato de potasio y componentes básicos (magnesia, ceniza volante, cemento Portland) en estado fresco todavía no hayan tenido lugar, entonces las mezclas se ven afectadas por la cantidad insertada de los componentes, mientras a los 7 días las reacciones de cristalización se han actuado, pues ya no hay iones sueltos. Los valores medidos, en cualquier caso, son más elevados comparados a los hallados por Lee et al. (2017).



**Gráfico 6.3 - pH de las pastas con fosfato de potasio monobásico**

Los resultados más interesantes en términos de pH de las pastas se han alcanzado para las pastas que contienen café, (desde 29-7 hasta 29-13). De hecho, aunque en estado fresco se obtienen valores altos de pH, salvo la 29-13 que contiene fosfato de potasio monobásico, sin embargo el pH no solo no aumenta de forma significativa como las pastas con fosfato de potasio monobásico, sino incluso el pH disminuye en el tiempo (Gráfico 6.4). Sin potasio, de hecho, no actúan las reacciones de cristalización antedichas, así que el compuesto es estable desde el primer momento. Por otra parte dado que el café es un material orgánico se ha observado que después de unos días crecieron microorganismos en su superficie (Figura 6.1, Figura 6.2 y Figura 6.3). Los resultados mejores resultan ser los de las mezclas que contienen en porcentaje el 70% de café (las cantidades de café han sido tomadas de la investigación de Teck-Ang Kua (2017)). No obstante, la magnesia no tiende a mezclarse con el café resultando que la capa exterior endurecida (la que está en contacto con la atmósfera) y compuesta casi totalmente de magnesia, mientras la parte interior se queda en polvo

(pastas 29-10, 29-11 y 29-12 en la Figura 6.2). Eso se debe a la falta de compatibilidad entre magnesia y café. Al contrario, la ceniza volante se mezcla perfectamente con el café, demostrando así su compatibilidad. Por esta misma razón, el pH de las pastas de café y ceniza a los 7 días resulta menor que las pastas con magnesia.



**Gráfico 6.4 - pH de las pastas con posos de café**

En conclusión, ya que los pH de las pastas a los 7 días son bastante parecidos entre ellos o, incluso, se han encontrado resultados mejores en las mezclas que contienen materiales de desecho, para evaluar las propiedades de estos materiales de desecho en comparación con los tradicionales se han realizado morteros que los contengan (morteros 6-76 y 8-78).



**Figura 6.1 - Crecimiento de los macroorganismos sobre las pastas**



**Figura 6.2 - Visualización estratos de las pastas contenientes café**

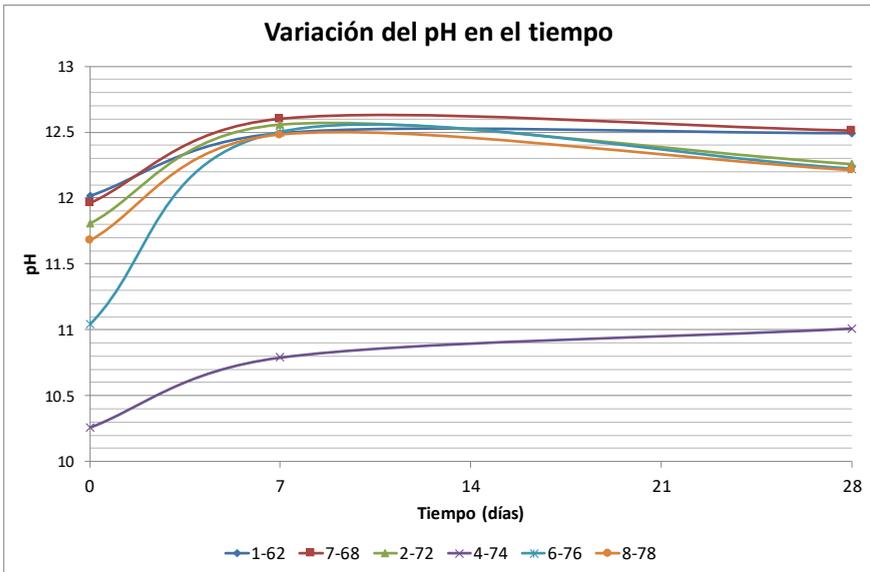


**Figura 6.3 - Pastas después de 7 días de su confección**

En cuanto a los morteros, se ha medido el pH tanto en estado fresco, como a lo endurecido, en específico a los 7 y a los 28 días. Los resultados comentados a través del Gráfico 6.5 se aclaran en la Tabla 6.2 que está aquí debajo.

**Tabla 6.2 - Resultados de medición del pH**

| <b>Código</b> | <b>Estado fresco</b> | <b>7 días</b> | <b>28 días</b> |
|---------------|----------------------|---------------|----------------|
| <b>1-62</b>   | 12.02                | 12.49         | 12.49          |
| <b>7-68</b>   | 11.96                | 12.60         | 12.51          |
| <b>2-72</b>   | 11.81                | 12.56         | 12.26          |
| <b>4-74</b>   | 10.26                | 10.79         | 11.01          |
| <b>6-76</b>   | 11.04                | 12.50         | 12.22          |
| <b>8-78</b>   | 11.68                | 12.48         | 12.21          |



**Gráfico 6.5 - Resultados de medición del pH**

Como se aprecia en el Gráfico 6.5, en estado fresco el pH es inferior que a los 7 días y, además, en estado fresco existe una sustancial diferencia entre los pH de los diferentes morteros, mientras en estado endurecido los valores se armonizan a valores cercanos a 12.5, excluido el mortero a base de magnesia, que en comparación a todos los demás se queda a un valor de pH mucho más bajo, entorno a 10.8.

Los valores de pH son más altos en los morteros a base de cemento. De hecho, como encontrado en el estudio de Hemalatha (2017) sobre los morteros de ceniza volante, esta tiene el efecto de disminuir el pH, aunque no de forma considerable porque si por un lado disminuye el contenido en hidróxido de carbono (que es altamente alcalino), las cenizas volantes liberan iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  que suben el pH.

Entre todos, el mortero que tiene el pH más bajo es el 4-74 a base de magnesia, aunque el valor obtenido es más elevado si comparado a los encontrados por Lee et al. (2017), dado que el mortero se ha

confeccionado con un ratio Mg/P elevado y, de acuerdo con los resultados de Lee et al. (2017) y de Xu (2017), aumentar el contenido de magnesio corresponde a un aumento de pH.

Cuando está mezclada con la magnesia, la ceniza volante influye negativamente sobre el pH, aumentándolo (morteros 6-76 y 8-78); de hecho, debido a su actividad puzolánica, se forma el C-S-H, o sea el silicato cálcico hidratado (producto de la cristalización del cemento Portland) que confiere al compuesto un pH altamente alcalino. No se releva una diferencia importante entre los valores hallados para estos dos morteros los cuales tienen valores parecidos de pH y la misma tendencia a aumentar el pH a edades tempranas subiendo luego una disminución.

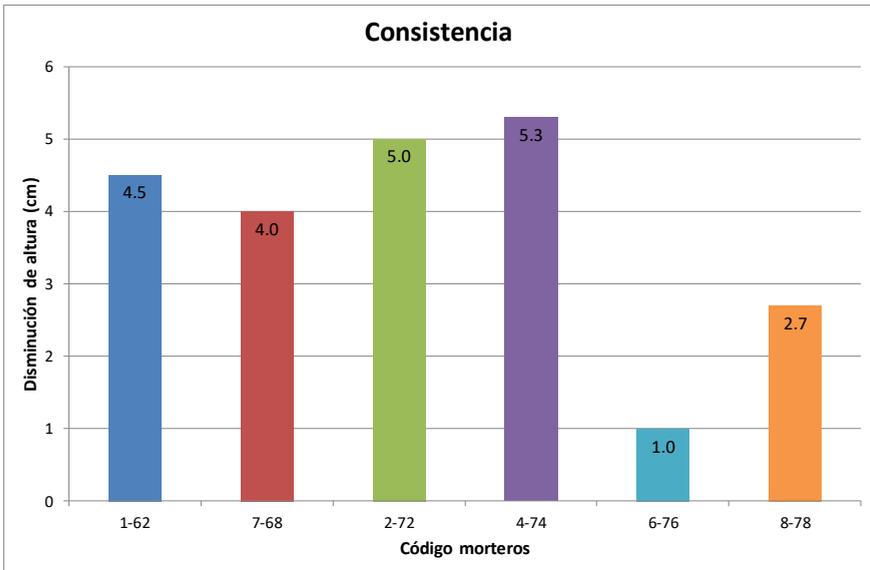
## 6.2 CONSISTENCIA

La consistencia de los morteros frescos se ha medido con el método del cono reducido descrito en el apartado 5.5.2. Los resultados están facilitados en la Tabla 6.3 en términos de diámetro del mortero y de diferencia de altura entre el mortero y el cono registrados después de ser desencofrados.

El parámetro característico para evaluar la consistencia de los morteros es la diferencia de altura para la cual, de hecho, se ha sacado el Gráfico 6.6.

**Tabla 6.3 - Resultados de los ensayos de consistencia**

| <b>Consistencia</b> |               |               |
|---------------------|---------------|---------------|
| <b>Código</b>       | <b>d (cm)</b> | <b>h (cm)</b> |
| <b>1-62</b>         | 11.5          | 4.5           |
| <b>7-68</b>         | 10.5          | 4             |
| <b>2-72</b>         | 12            | 5             |
| <b>4-74</b>         | 11            | 5.3           |
| <b>6-76</b>         | 11            | 1             |
| <b>8-78</b>         | 11.5          | 2.7           |



**Gráfico 6.6 - Consistencia de los morteros frescos**

Entre todos los morteros, el menos consistente es el 4-74, dado que se ha medido una disminución de la altura de 5.3 cm. En realidad, este resultado contradice a las investigaciones del estado del arte (cfr. Qiao et al. (2016)) ya que allí se evidenció que una propiedad de estos morteros es la rapidez de las reacciones de hidratación, pues los tiempos de fraguado muy cortos. Sin embargo, su baja consistencia puede ser atribuida al hecho que a este mortero, dadas las dificultades en mezclarlo dentro de la amasadora, se han puesto 50 gramos de agua más con respecto a los otros morteros, llegando a tener una relación agua/cemento igual a 0.60.

Al contrario, resultan muy consistentes los morteros de magnesia y ceniza volante. Se opina que la elevada consistencia de estos morteros no dependa de la cantidad de ceniza añadida sino es una comprobación de cuanto especificado para los morteros de fosfato de magnesio (hidratación y cristalización rápida), dado que los morteros 6-76 y 8-78 se han realizado poniendo dentro de la mezcla una cantidad de agua inferior a

la del ensayo 4-74, o sea  $w/c = 0.55$ . La diferencia de consistencia entre los dos puede provenir de la presencia de fosfato de potasio en la 6-76, que reacciona rápidamente con la magnesia.

Los morteros de cemento Portland tienen una consistencia intermedia, no obstante la adición del fosfato de potasio monobásico en el mortero 7-68 provoque un aumento de esta. La causa puede ser la creación de un ambiente ácido debido a la reacción entre agua y potasio que acelera la reacción de cristalización cuando el cemento (que contiene CaO que es un óxido básico) se disuelve en la solución acuosa.

El mortero de ceniza volante resulta tener una consistencia muy baja, pero esto es noto por las propiedades de las cenizas volantes las cuales tienen una capacidad de reaccionar inferior a la del cemento, dada la forma esférica de sus partículas.

### **6.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

Los ensayos de resistencia a compresión de los morteros conservados en húmedo han sido realizados a los 7 y 28 días con el método explicado en el apartado correspondiente (cfr. apartado 5.6.1). Aquí se presentan los resultados obtenidos en tablas y gráficos.

Ante todo, es necesario especificar que el objetivo de esta investigación no ha sido el desarrollo de un hormigón estructural, pues no es esperada una alta resistencia.

En cualquier caso, aunque el hormigón sobre el cual se ha investigado dentro de este trabajo no es un hormigón que podrá ser utilizado como estructural, sino será empleado como elemento prefabricado para fachadas de edificios, las pruebas de resistencia a compresión son fundamentales para caracterizar el material investigado.

La máquina empleada para determinar la resistencia a compresión da resultados expresados en kN, pues cuando se ha evaluado la resistencia, se han medido las dimensiones de las probetas por medio de una regla electrónica y se ha dividido la resistencia en kN por la superficie resistente (haciendo obviamente las debidas conversiones de unidades de medida), obteniendo la resistencia expresada en MPa.

Asimismo, en el momento en que se ha evaluado la resistencia, las probetas han sido pesadas y se ha calculado su volumen, para que se hiciera una comparación entre la resistencia de cada ensayo y su densidad.

**Tabla 6.4 - Características dimensionales probetas a los 7 días**

| <b>Código</b> | <b>Área resistente [mm]</b> | <b>Volumen [mm<sup>3</sup>]</b> | <b>Peso [g]</b> | <b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b> |
|---------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| <b>1-62</b>   | 1599.84                     | 255974.4                        | 566.7           | 2213.89                            |
| <b>7-68</b>   | 1656.13                     | 264980.8                        | 613.7           | 2316.01                            |
| <b>2-72</b>   | 1575.84                     | 252134.4                        | 561.2           | 2225.79                            |
| <b>4-74</b>   | 1872.00                     | 299520.0                        | 662.3           | 2211.20                            |
| <b>6-76</b>   | 1612.02                     | 257923.2                        | 601.6           | 2332.47                            |
| <b>8-78</b>   | 1720.81                     | 275329.6                        | 617.7           | 2243.49                            |

**Tabla 6.5 - Resistencia a compresión de las probetas a los 7 días**

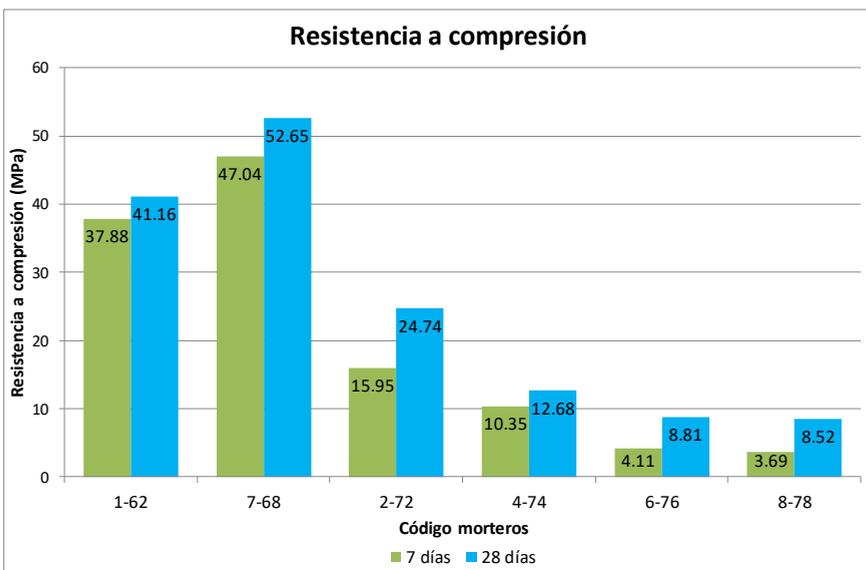
| <b>Código</b> | <b>Resistencia (a) [kN]</b> | <b>Resistencia (b) [kN]</b> | <b>Resistencia media [kN]</b> | <b>Resistencia [MPa]</b> |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>1-62</b>   | 59.93                       | 61.27                       | 60.6                          | 37.87                    |
| <b>7-68</b>   | 75.52                       | 75.02                       | 75.27                         | 45.45                    |
| <b>2-72</b>   | 24.17                       | 26.88                       | 25.525                        | 16.20                    |
| <b>4-74</b>   | 15.67                       | 17.46                       | 16.565                        | 8.85                     |
| <b>6-76</b>   | 6.47                        | 6.67                        | 6.57                          | 4.08                     |
| <b>8-78</b>   | 5.74                        | 6.06                        | 5.9                           | 3.43                     |

**Tabla 6.6 - Características dimensionales probetas a los 28 días**

| Código | Área resistente [mm] | Volumen [mm <sup>3</sup> ] | Peso [g] | Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] |
|--------|----------------------|----------------------------|----------|-------------------------------|
| 1-62   | 1640.00              | 262400                     | 608.7    | 2319.7                        |
| 7-68   | 1660.00              | 265600                     | 631.3    | 2376.9                        |
| 2-72   | 1580.00              | 252800                     | 586.1    | 2318.4                        |
| 4-74   | 1716.00              | 274560                     | 659.5    | 2402.0                        |
| 6-76   | 1580.00              | 252800                     | 582.9    | 2305.8                        |
| 8-78   | 1639.30              | 262280                     | 562.5    | 2144.7                        |

**Tabla 6.7 - Resistencia a compresión de las probetas a los 28 días**

| Código | Resistencia (a) [kN] | Resistencia (b) [kN] | Resistencia media [kN] | Resistencia [MPa] |
|--------|----------------------|----------------------|------------------------|-------------------|
| 1-62   | 64.36                | 67.35                | 65.86                  | 41.16             |
| 7-68   | 85.57                | 82.91                | 84.24                  | 52.65             |
| 2-72   | 38.90                | 40.26                | 39.58                  | 24.74             |
| 4-74   | 18.30                | 22.26                | 20.28                  | 12.68             |
| 6-76   | 14.22                | 13.97                | 14.10                  | 8.81              |
| 8-78   | 13.44                | 13.83                | 13.64                  | 8.52              |

**Gráfico 6.7 - Resistencia a compresión a los 7 y 28 días**

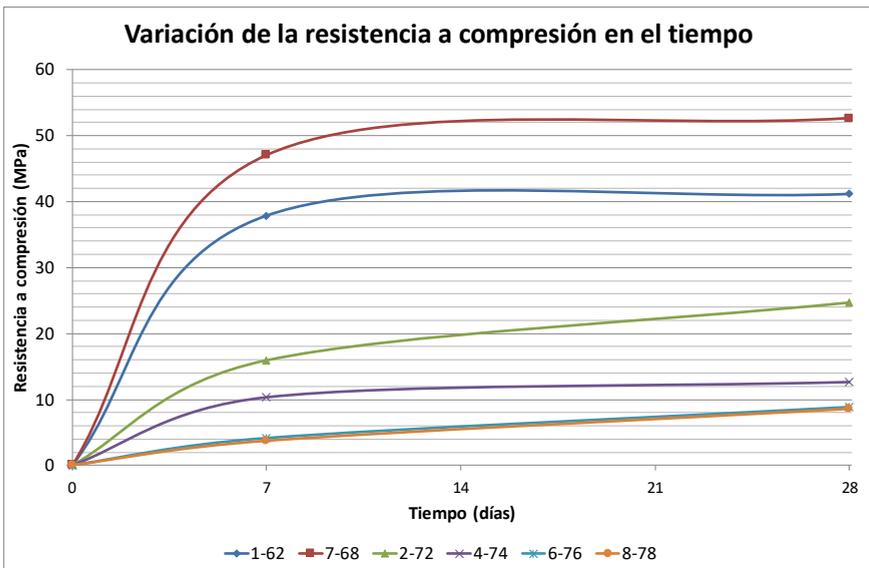
A los 7 días, se puede constatar en el Gráfico 6.7 que los morteros que tienen la resistencia más alta son los con base de cemento portland. En

particular, el mortero más resistente es el 7-68, o sea lo que presenta en su composición cemento y una pequeña cantidad de fosfato de potasio monobásico. Esto puede ser debido a la acidez del ambiente de reacción, que es más alta cuando el ambiente acuoso es compuesto de agua y potasio (que reaccionan entre ellos liberando iones  $H^+$ , pues bajando el pH): cuanto más ácido es el ambiente de reacción cuanto más alta es la capacidad de reaccionar del  $CaO$ .

La resistencia baja significativamente en los morteros 2-72 y, sobre todo, 4-74, o sea los morteros en que el cemento es sustituido por ceniza volante y por magnesita no calcinada, respectivamente. En efecto, el estudio conducido por M. Ossa y H. Jorquera (1984) evidencia la influencia negativa de la ceniza volante en las prestaciones mecánicas de los morteros. Igualmente, haciendo referencia al mortero a base de magnesita, es evidenciado en las investigaciones del apartado 4.2.1 que una relación alta entre magnesita y potasio, como la empleada en este trabajo, comporta una reducción notable de la resistencia a compresión.

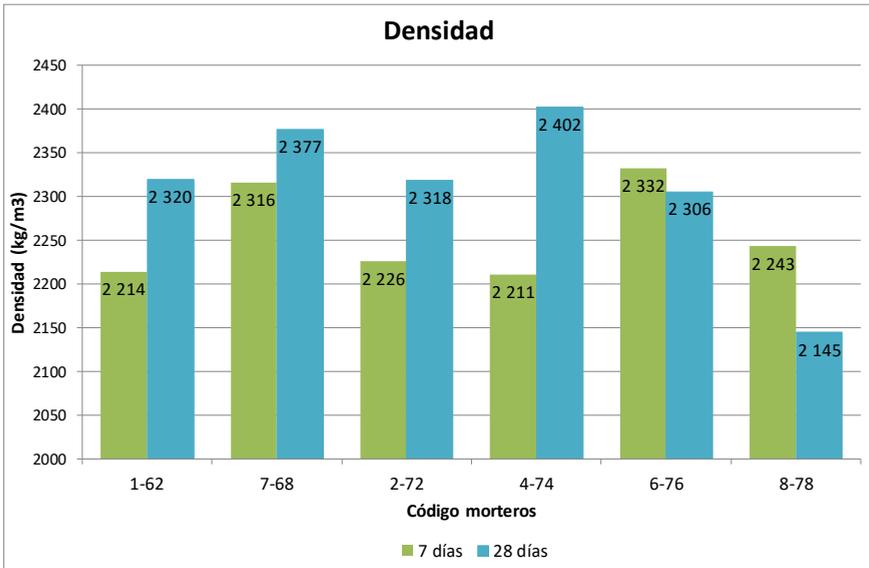
Por último, la resistencia cae desmesuradamente en los cementos en que magnesita y ceniza volante son mezcladas entre ellas, sobre todo en la 8-78, en que como parte ácida no se ha empleado el fosfato de potasio monobásico, sino los posos de café. Esto confirma los resultados obtenidos por Z. Ding et al. (2014), según el cual la resistencia de los cementos a base de magnesita tiene una tendencia a bajar al aumentar del contenido de ceniza volante. La resistencia de la 8-78 es más baja comparada a la 6-76 por dos hipótesis: la primera hipótesis es que la disminución de resistencia puede ser debida a una incompatibilidad del café con la magnesita, aunque los posos de café son presentes en cantidades muy bajas; la segunda hipótesis es el grado de acidez más alto del ambiente acuoso de la 6-76, debido a la alta solubilidad del potasio en agua en comparación con la del café.

A los 28 días la resistencia aumenta en todos los ensayos, aunque es posible observar en el Gráfico 6.7 que en porcentaje la resistencia aumenta poco en los morteros a base de cemento portland y de magnesia (del 10% y del 22% respectivamente), mientras aumenta notablemente en los morteros que contienen ceniza volante, respectivamente del 55% el 2-72, 115% el 6-76 y 131% el 8-78, aunque esa se sigue manteniéndose por debajo de la resistencia de los morteros contenientes cemento portland. Efectivamente, en numerosas investigaciones se ha comprobado que su resistencia hasta los 28 días es menor en comparación con los morteros a base de cemento, porque las cenizas volantes reaccionan lentamente, sobre todo en los primeros estados de hidratación, debido a la presencia de más fases cristalinas, pero en edades posteriores puede igualar o incluso superar la del cemento; es decir el empleo de la ceniza produce un retardo en las prestaciones iniciales pero iguala o aumenta las resistencias a edades posteriores debido a su comportamiento puzolánico.



**Gráfico 6.8 - Variación de la resistencia a compresión en el tiempo**

En el Gráfico 6.8 se observa que la tendencia de la resistencia a compresión es parabólica en todos los morteros elaborados. Esta tendencia es nota para los morteros a base de cemento portland, mientras para los cementos a base de magnesia esta tendencia es igual a la de la investigación de Lee et al. (2017).



**Gráfico 6.9 - Densidad a los 7 y 28 días**

En fase experimental se ha hecho también una comparación entre las densidades de los morteros. Resulta que estas son muy parecidas (Gráfico 6.9), entonces si se debe comparar la densidad con la resistencia a compresión resulta que desde este punto de vista son mucho más eficientes los morteros a base de cemento, ya que tienen una resistencia notablemente más elevada. Se aprecia, además, que la densidad de los morteros medida a los 7 y 28 días aumenta con el tiempo, a excepción de los morteros 6-76 y 8-78 que contienen magnesia y ceniza volante, donde la tendencia es invertida, o sea se observa una disminución de la densidad con el tiempo.

## 6.4 RETRACCIÓN

Como se ha observado en las investigaciones que constituyen en el estado del arte de este trabajo, los morteros a base de fosfato de magnesio y potasio son caracterizados por fraguar durante un tiempo muy corto, pues pueden sufrir grandes contracciones y deformaciones en tiempos cortos. En consecuencia, esto podría provocar fisuraciones del mortero durante su fraguado y endurecimiento. Por esta razón ha sido imprescindible comprobar la retracción a que están sujetos los materiales examinados.

A continuación se incluyen las tablas de los resultados sacados en laboratorio para cada día de medición. En concreto, la Tabla 6.8 muestra las longitudes de la galga patrón y de las muestras, mientras la Tabla 6.9 la variación de volumen en porcentaje a la cual están sujetos los morteros.

**Tabla 6.8 - Longitudes medidas en laboratorio**

| <b>Retracción (mm)</b> |            |          |          |          |
|------------------------|------------|----------|----------|----------|
| <b>Código</b>          | <b>Día</b> |          |          |          |
|                        | <b>1</b>   | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| <b>1-62</b>            | 368-331    | 363-314  | 363-310  | 363-308  |
| <b>7-68</b>            | 371-421    | 362-410  | 363-401  | 362-397  |
| <b>2-72</b>            | 373-309    | 364-297  | 368-300  | 363-294  |
| <b>4-74</b>            | 365-418    | 363-421  | 364-421  | 363-421  |
| <b>6-76</b>            | 364-321    | 363-313  | 363-302  | 361-300  |
| <b>8-78</b>            | 362-243    | 363-229  | 364-226  | 362-224  |

| <b>Retracción (mm)</b> |            |          |           |           |
|------------------------|------------|----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>          | <b>Día</b> |          |           |           |
|                        | <b>7</b>   | <b>8</b> | <b>11</b> | <b>12</b> |
| <b>1-62</b>            | 363-307    | 362-304  | 360-302   | 359-301   |
| <b>7-68</b>            | 363-397    | 360-392  | 361-393   | 359-391   |
| <b>2-72</b>            | 363-294    | 361-290  | 364-293   | 363-292   |
| <b>4-74</b>            | 363-421    | 361-419  | 360-418   | 360-418   |
| <b>6-76</b>            | 361-304    | 362-300  | 362-301   | 362-300   |
| <b>8-78</b>            | 362-224    | 361-218  | 362-221   | 362-220   |

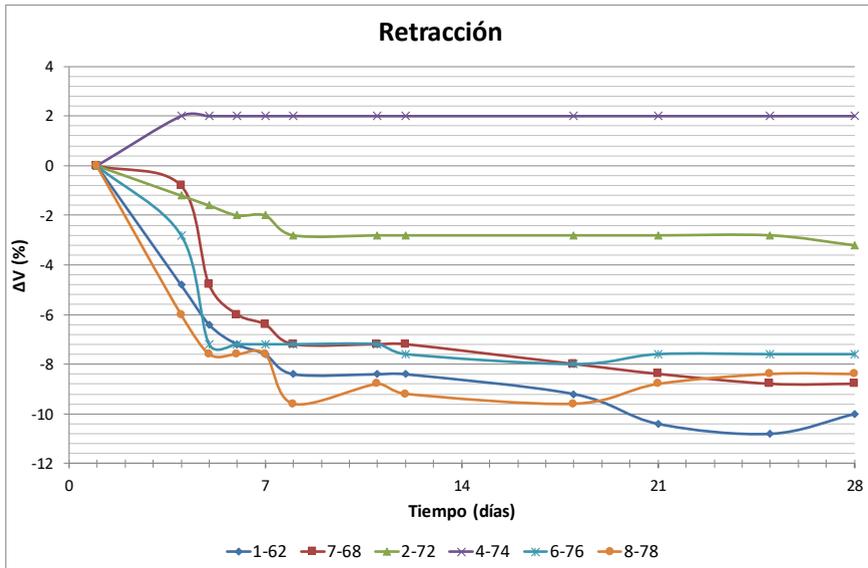
| <b>Retracción (mm)</b> |            |           |           |           |
|------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>          | <b>Día</b> |           |           |           |
|                        | <b>18</b>  | <b>21</b> | <b>25</b> | <b>28</b> |
| <b>1-62</b>            | 363-303    | 363-300   | 362-298   | 363-301   |
| <b>7-68</b>            | 363-393    | 363-392   | 363-391   | 363-391   |
| <b>2-72</b>            | 364-292    | 363-292   | 363-292   | 364-292   |
| <b>4-74</b>            | 364-422    | 363-421   | 363-421   | 363-421   |
| <b>6-76</b>            | 364-301    | 364-302   | 363-301   | 364-302   |
| <b>8-78</b>            | 363-220    | 364-223   | 363-223   | 361-221   |

**Tabla 6.9 - Variación de volumen en porcentaje**

| <b>Retracción (%)</b> |            |          |          |          |
|-----------------------|------------|----------|----------|----------|
| <b>Código</b>         | <b>Día</b> |          |          |          |
|                       | <b>1</b>   | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| <b>1-62</b>           | 0          | -4.8     | -6.4     | -7.2     |
| <b>7-68</b>           | 0          | -0.8     | -4.8     | -6       |
| <b>2-72</b>           | 0          | -1.2     | -1.6     | -2       |
| <b>4-74</b>           | 0          | 2        | 2        | 2        |
| <b>6-76</b>           | 0          | -2.8     | -7.2     | -7.2     |
| <b>8-78</b>           | 0          | -6       | -7.6     | -7.6     |

| <b>Retracción (%)</b> |            |          |           |           |
|-----------------------|------------|----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>         | <b>Día</b> |          |           |           |
|                       | <b>7</b>   | <b>8</b> | <b>11</b> | <b>12</b> |
| <b>1-62</b>           | -7.6       | -8.4     | -8.4      | -8.4      |
| <b>7-68</b>           | -6.4       | -7.2     | -7.2      | -7.2      |
| <b>2-72</b>           | -2         | -2.8     | -2.8      | -2.8      |
| <b>4-74</b>           | 2          | 2        | 2         | 2         |
| <b>6-76</b>           | -7.2       | -7.2     | -7.2      | -7.6      |
| <b>8-78</b>           | -7.6       | -9.6     | -8.8      | -9.2      |

| <b>Retracción (%)</b> |            |           |           |           |
|-----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>         | <b>Día</b> |           |           |           |
|                       | <b>18</b>  | <b>21</b> | <b>25</b> | <b>28</b> |
| <b>1-62</b>           | -9.2       | -10.4     | -10.8     | -10       |
| <b>7-68</b>           | -8         | -8.4      | -8.8      | -8.8      |
| <b>2-72</b>           | -2.8       | -2.8      | -2.8      | -3.2      |
| <b>4-74</b>           | 2          | 2         | 2         | 2         |
| <b>6-76</b>           | -8         | -7.6      | -7.6      | -7.6      |
| <b>8-78</b>           | -9.6       | -8.8      | -8.4      | -8.4      |



**Gráfico 6.10 - Retracción de los morteros**

Como se comprueba en el Gráfico 6.10, la inserción dentro de los morteros de materia prima diferente provoca un cambio significativo en sus variaciones de volumen. Así que, los morteros que contienen cemento portland (1-62 y 7-68) tienen la misma tendencia y son sujetos a mayores variaciones de longitud, pues de volumen durante el tiempo, aunque la inserción del potasio retarda el proceso de disminución de volumen y también reduce la entidad de eso.

Los morteros obtenidos mezclando ceniza volante y magnesia (ensayos 6-76 y 8-78) tienen un comportamiento parecido a los morteros de cemento portland, no obstante el comportamiento no sea constante, ya que se han medido irregulares aumentos y disminuciones de volumen (de pequeña entidad). Esto puede ser debido a cuanto constatado por Xu (2017), es decir que las partículas de ceniza volante están entremezcladas con los cristales de K-estruvita y, tratándose de un material altamente impuro, tienen diferentes niveles de reactividad locales: por lo tanto, el comportamiento es muy inestable en el tiempo. Entre los dos ensayos se

graba una diferencia en la entidad de las variaciones, aunque la tendencia sea la misma. El fosfato de potasio, también en este caso, juega un papel en retardar y disminuir la contracción.

En el gráfico se observa que en el mortero 2-72, compuesto de ceniza volante y potasio, el volumen disminuye hasta llegar a un valor máximo de un 2% (que es irrisorio si comparado a los otros morteros) tras 14 días. Después de llegar a esta disminución máxima, el volumen no disminuye durante todo el tiempo hasta los 28 días. La estabilidad de volumen constatada, efectivamente, es confirmada de los resultados de muchas investigaciones en que se ha evidenciado la eficaz de las cenizas volantes en la reducción de la expansión de la mezcla ya que se reduce la cantidad de iones álcali disponibles en la solución que reaccionan con los agregados reactivos.

La inserción de magnesia, al contrario, provoca un aumento de volumen en los primeros días (ensayo 4-74). Esto puede indicar que los cristales de K-estruvita que se generan durante la hidratación provocan una expansión inmediata del compuesto. No obstante, después de los 4 días el volumen se mantiene constante durante todo el tiempo en el cual se ha medido la retracción. Esto es debido a la rapidez de las reacciones de hidratación dentro de los cementos de fosfato de magnesia.

## **6.5 ABSORCIÓN DE AGUA**

La absorción de agua de los ensayos ha sido evaluada regularmente con el método descrito en el apartado 5.6.4, obteniendo los resultados visibles en el Gráfico 6.11. A continuación se incluyen las tablas de los resultados sacados en laboratorio. En particular, la Tabla 6.10 muestra el peso de los ensayos en cada día, mientras la Tabla 6.11 muestra la variación de peso en porcentaje respecto al día 1 a la cual son sujetos los morteros cada día de medición.

Tabla 6.10 – Pesos medidos en laboratorio

| <b>Absorción de agua (g)</b> |            |          |          |          |
|------------------------------|------------|----------|----------|----------|
| <b>Código</b>                | <b>Día</b> |          |          |          |
|                              | <b>1</b>   | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| <b>1-62</b>                  | 595.0      | 604.8    | 605.7    | 606.2    |
| <b>7-68</b>                  | 618.2      | 626.1    | 627.5    | 629.2    |
| <b>2-72</b>                  | 576.7      | 581.7    | 582.8    | 584.3    |
| <b>4-74</b>                  | 638.7      | 652.1    | 652.9    | 655.1    |
| <b>6-76</b>                  | 571.8      | 576.4    | 577.7    | 578.8    |
| <b>8-78</b>                  | 551.2      | 557.5    | 558.0    | 559.2    |

| <b>Absorción de agua (g)</b> |            |          |           |           |
|------------------------------|------------|----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>                | <b>Día</b> |          |           |           |
|                              | <b>7</b>   | <b>8</b> | <b>11</b> | <b>12</b> |
| <b>1-62</b>                  | 606.3      | 606.4    | 607.2     | 607.4     |
| <b>7-68</b>                  | 629.3      | 629.3    | 630       | 630.2     |
| <b>2-72</b>                  | 584.3      | 584.3    | 584.4     | 584.7     |
| <b>4-74</b>                  | 655.4      | 655.8    | 656.6     | 656.9     |
| <b>6-76</b>                  | 578.9      | 579.3    | 580.2     | 580.7     |
| <b>8-78</b>                  | 559.5      | 559.7    | 560.4     | 560.8     |

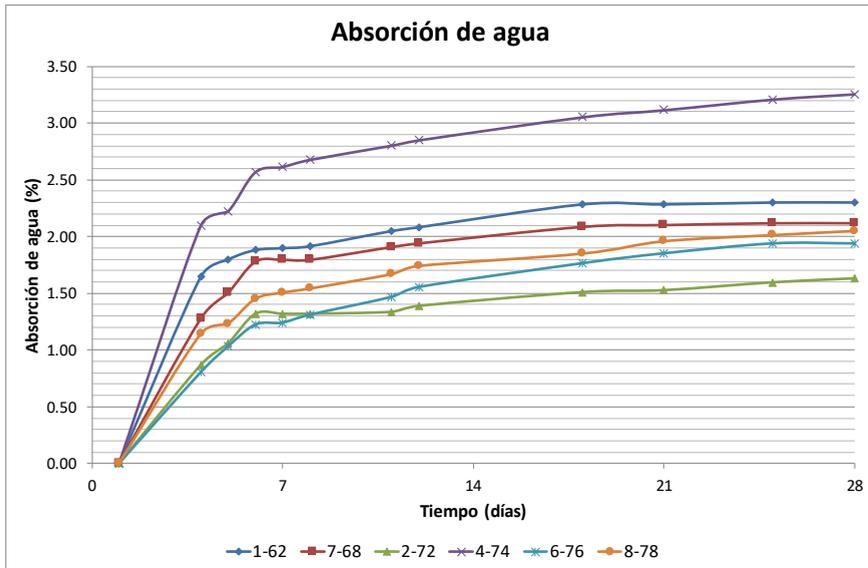
| <b>Absorción de agua (g)</b> |            |           |           |           |
|------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>                | <b>Día</b> |           |           |           |
|                              | <b>18</b>  | <b>21</b> | <b>25</b> | <b>28</b> |
| <b>1-62</b>                  | 608.6      | 608.6     | 608.7     | 608.7     |
| <b>7-68</b>                  | 631.1      | 631.2     | 631.3     | 631.3     |
| <b>2-72</b>                  | 585.4      | 585.5     | 585.9     | 586.1     |
| <b>4-74</b>                  | 658.2      | 658.6     | 659.2     | 659.5     |
| <b>6-76</b>                  | 581.9      | 582.4     | 582.9     | 582.9     |
| <b>8-78</b>                  | 561.4      | 562.0     | 562.3     | 562.5     |

**Tabla 6.11 - Variación de peso en porcentaje**

| Absorción de agua (%) |      |      |      |      |
|-----------------------|------|------|------|------|
| Código                | Día  |      |      |      |
|                       | 1    | 4    | 5    | 6    |
| 1-62                  | 0.00 | 1.65 | 1.80 | 1.88 |
| 7-68                  | 0.00 | 1.28 | 1.50 | 1.78 |
| 2-72                  | 0.00 | 0.87 | 1.06 | 1.32 |
| 4-74                  | 0.00 | 2.10 | 2.22 | 2.57 |
| 6-76                  | 0.00 | 0.80 | 1.03 | 1.22 |
| 8-78                  | 0.00 | 1.14 | 1.23 | 1.45 |

| Absorción de agua (%) |      |      |      |      |
|-----------------------|------|------|------|------|
| Código                | Día  |      |      |      |
|                       | 7    | 8    | 11   | 12   |
| 1-62                  | 1.90 | 1.92 | 2.05 | 2.08 |
| 7-68                  | 1.80 | 1.80 | 1.91 | 1.94 |
| 2-72                  | 1.32 | 1.32 | 1.34 | 1.39 |
| 4-74                  | 2.61 | 2.68 | 2.80 | 2.85 |
| 6-76                  | 1.24 | 1.31 | 1.47 | 1.56 |
| 8-78                  | 1.51 | 1.54 | 1.67 | 1.74 |

| Absorción de agua (%) |      |      |      |      |
|-----------------------|------|------|------|------|
| Código                | Día  |      |      |      |
|                       | 18   | 21   | 25   | 28   |
| 1-62                  | 2.29 | 2.29 | 2.30 | 2.30 |
| 7-68                  | 2.09 | 2.10 | 2.12 | 2.12 |
| 2-72                  | 1.51 | 1.53 | 1.60 | 1.63 |
| 4-74                  | 3.05 | 3.12 | 3.21 | 3.26 |
| 6-76                  | 1.77 | 1.85 | 1.94 | 1.94 |
| 8-78                  | 1.85 | 1.96 | 2.01 | 2.05 |



**Gráfico 6.11 - Absorción de agua de los morteros**

Se puede observar que la tendencia en absorber agua, evaluada pesando los morteros y comparando el peso en el día interesado con el peso del día 1, es igual en todos los morteros. La tendencia que se aprecia es que todos los morteros analizados durante los primeros días absorben mucha agua, cambiando su peso de manera importante (la primera parte de las curvas tiempo-absorción tiene una inclinación notable), estabilizándose en peso cada día más.

No obstante, aunque el comportamiento de los morteros sea parecido, el compuesto a base de magnesia (4-74) absorbe a edades tempranas mucha más agua que los otros, manteniendo luego la misma tendencia que tienen las otras probetas. Esta tendencia confirma la rapidez de las reacciones de hidratación.

La ceniza volante confiere al mortero, respecto a la magnesia y al cemento portland, una menor capacidad de absorber agua (ensayo 2-72). Esto es debido a cuanto escrito por Hemalatha (2017), o sea que la dimensión

pequeña de las partículas de las cenizas volantes reduce la distancia entre ellas reduciendo la dimensión de los poros y, consecuentemente, impidiendo la absorción de agua.

## 6.6 PÉRDIDA DE PESO

En cuanto a la pérdida de peso de los morteros, esta ha sido evaluada con el método descrito en el apartado 5.6.5; los resultados logrados se recogen en las Tabla 6.12, Tabla 6.13 y en el Gráfico 6.12, donde en particular se capta la tendencia de pérdida de peso de cada mortero cuando dejado en condiciones secas. En particular, la Tabla 6.12 muestra el peso de los ensayos en cada día, mientras la Tabla 6.13 muestra la variación de peso en porcentaje respecto al día 1 a la cual son sujetos los morteros cada día de medición.

**Tabla 6.12 – Pesos medidos en laboratorio**

| <b>Pérdida de peso (g)</b> |            |          |          |          |
|----------------------------|------------|----------|----------|----------|
| <b>Código</b>              | <b>Día</b> |          |          |          |
|                            | <b>1</b>   | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| <b>1-62</b>                | 602.3      | 593.8    | 592.0    | 590.6    |
| <b>7-68</b>                | 604.6      | 598.2    | 596.2    | 594.3    |
| <b>2-72</b>                | 581.5      | 558.9    | 553.8    | 550.1    |
| <b>4-74</b>                | 597.2      | 570.0    | 568.2    | 566.4    |
| <b>6-76</b>                | 591.0      | 566.2    | 560.1    | 555.9    |
| <b>8-78</b>                | 581.6      | 547.0    | 541.7    | 538.8    |

| <b>Pérdida de peso (g)</b> |            |          |           |           |
|----------------------------|------------|----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>              | <b>Día</b> |          |           |           |
|                            | <b>7</b>   | <b>8</b> | <b>11</b> | <b>12</b> |
| <b>1-62</b>                | 589.5      | 588.8    | 587.1     | 586.5     |
| <b>7-68</b>                | 593.0      | 592.1    | 590.2     | 589.6     |
| <b>2-72</b>                | 547.9      | 546.6    | 543.6     | 542.9     |
| <b>4-74</b>                | 565.7      | 565.6    | 565.6     | 565.5     |
| <b>6-76</b>                | 553.6      | 552.3    | 550.4     | 550.1     |
| <b>8-78</b>                | 537.6      | 536.8    | 536.3     | 536.3     |

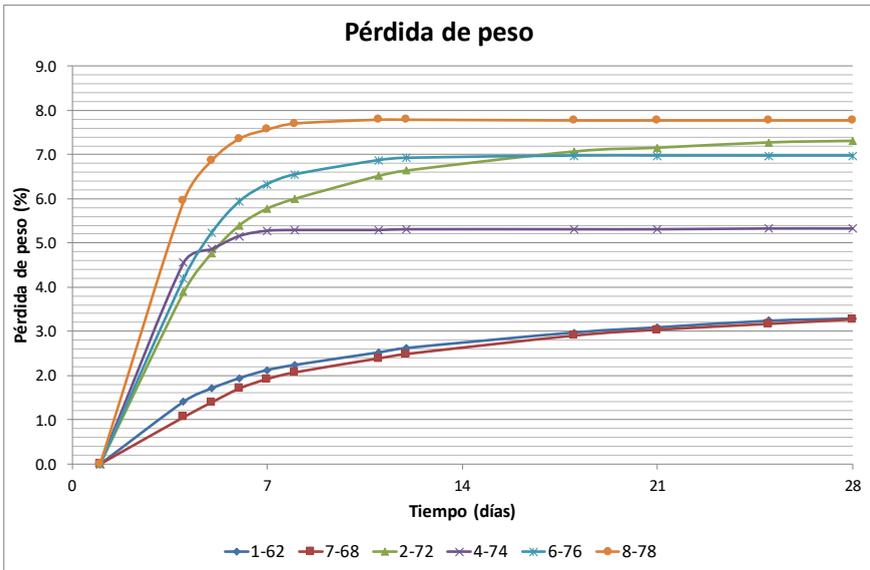
| <b>Pérdida de peso (g)</b> |            |           |           |           |
|----------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>              | <b>Día</b> |           |           |           |
|                            | <b>18</b>  | <b>21</b> | <b>25</b> | <b>28</b> |
| <b>1-62</b>                | 584.4      | 583.7     | 582.8     | 582.5     |
| <b>7-68</b>                | 587.1      | 586.3     | 585.5     | 584.9     |
| <b>2-72</b>                | 540.4      | 539.9     | 539.2     | 539.0     |
| <b>4-74</b>                | 565.5      | 565.5     | 565.4     | 565.4     |
| <b>6-76</b>                | 549.8      | 549.8     | 549.8     | 549.8     |
| <b>8-78</b>                | 536.4      | 536.4     | 536.4     | 536.4     |

**Tabla 6.13 - Variación de peso en porcentaje**

| <b>Pérdida de peso (%)</b> |            |          |          |          |
|----------------------------|------------|----------|----------|----------|
| <b>Código</b>              | <b>Día</b> |          |          |          |
|                            | <b>1</b>   | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| <b>1-62</b>                | 0.0        | 1.4      | 1.7      | 1.9      |
| <b>7-68</b>                | 0.0        | 1.1      | 1.4      | 1.7      |
| <b>2-72</b>                | 0.0        | 3.9      | 4.8      | 5.4      |
| <b>4-74</b>                | 0.0        | 4.6      | 4.9      | 5.2      |
| <b>6-76</b>                | 0.0        | 4.2      | 5.2      | 5.9      |
| <b>8-78</b>                | 0.0        | 5.9      | 6.9      | 7.4      |

| <b>Pérdida de peso (%)</b> |            |          |           |           |
|----------------------------|------------|----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>              | <b>Día</b> |          |           |           |
|                            | <b>7</b>   | <b>8</b> | <b>11</b> | <b>12</b> |
| <b>1-62</b>                | 2.1        | 2.2      | 2.5       | 2.6       |
| <b>7-68</b>                | 1.9        | 2.1      | 2.4       | 2.5       |
| <b>2-72</b>                | 5.8        | 6.0      | 6.5       | 6.6       |
| <b>4-74</b>                | 5.3        | 5.3      | 5.3       | 5.3       |
| <b>6-76</b>                | 6.3        | 6.5      | 6.9       | 6.9       |
| <b>8-78</b>                | 7.6        | 7.7      | 7.8       | 7.8       |

| <b>Pérdida de peso (%)</b> |            |           |           |           |
|----------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Código</b>              | <b>Día</b> |           |           |           |
|                            | <b>18</b>  | <b>21</b> | <b>25</b> | <b>28</b> |
| <b>1-62</b>                | 3.0        | 3.1       | 3.2       | 3.3       |
| <b>7-68</b>                | 2.9        | 3.0       | 3.2       | 3.3       |
| <b>2-72</b>                | 7.1        | 7.2       | 7.3       | 7.3       |
| <b>4-74</b>                | 5.3        | 5.3       | 5.3       | 5.3       |
| <b>6-76</b>                | 7.0        | 7.0       | 7.0       | 7.0       |
| <b>8-78</b>                | 7.8        | 7.8       | 7.8       | 7.8       |



**Gráfico 6.12 - Pérdida de peso de los morteros**

Se distinguen dos tipos de tendencia de pérdida de peso: los morteros a base de cemento portland (1-62 y 7-68) y de ceniza volante (2-72) tienden a perder gradualmente peso durante todo el período considerado, con evolución parabólica; en cambio, los morteros contenidos magnesia (4-74, 6-76 y 8-78) pierden peso a edades tempranas estabilizándose luego sin perder peso hasta los 28 días. Esta diferencia de tendencia es debida a la reacción hidratación rápida, característica de los cementos de fosfato de magnesio, que hace más estable la estructura del mortero. Sin embargo, el mortero 2-72 pierde una cantidad de peso más importante que los morteros de cemento; si estos dos, de hecho, pierden un total del 3% de su peso inicial, el compuesto 2-72 llega a pérdidas del orden del 7%. Los morteros a base de ceniza volante y magnesia (6-76 y 8-78) presentan una pérdida casi igual en el tiempo, no obstante la presencia de potasio provoque una pérdida más alta. Contrariamente al resultado encontrado de Xu (2017), el mortero 4-74 que no contiene ceniza volante pierde menos peso y estabiliza su peso en un período más corto.



# Capítulo 7. Conclusiones

## 7.1 INTRODUCCIÓN

En este último capítulo del proyecto final de máster se presentan las conclusiones generales extraídas de las pruebas realizadas.

Las conclusiones se centran en la evaluación en términos de resistencia mecánica y de características químico-físicas de los morteros desarrollados en este proyecto, comparando la influencia de la inserción de distintos aditivos dentro de la mezcla.

En el último apartado, se presentan las líneas futuras de investigación esenciales para seguir y acabar este proyecto.

## 7.2 CONCLUSIONES

Se han cumplido los objetivos de este proyecto que eran los siguientes:

- se han estudiado los beneficios que proporciona el empleo de este material para fachadas de los edificios;
- se ha conducido un estudio sobre las investigaciones relativas a las características que deberían tener los hormigones para permitir el crecimiento de los organismos, construyendo un estado del arte de la cuestión;
- se ha caracterizado la materia prima empleada sobre la base de análisis de las investigaciones constituyentes el estado del arte;
- se han realizado pastas y morteros, sobre los cuales se han hecho pruebas con el objetivo de caracterizarlos.

Conforme a los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. en cuanto las pastas, el pH está influenciado por la relación Mg/P solo en estado fresco, mientras en estado endurecido esta

propiedad no se ve afectada por la relación Mg/P. La inserción de retardantes como bórax o ácido bórico aumenta el pH de la pasta. El café, sobre todo en altas cantidades, disminuye considerablemente el pH pero no resulta compatible con la magnesia;

2. basándose en el hecho que un pH no excesivamente alcalino sea un requisito fundamental para permitir el crecimiento de microorganismos, entre los cementos estudiados y caracterizados los cementos a base de fosfato de magnesio producen los resultados mejores; evidentemente, la inserción de cemento Portland o de ceniza volante provoca un aumento del pH;
3. en términos de consistencia, con la magnesia se consigue realizar un mortero muy consistente debido a la rapidez con la cual se realizan las reacciones de hidratación y cristalización. Al contrario, la ceniza volante logra una consistencia muy baja del mortero, debido a su escasa capacidad de reaccionar;
4. los morteros que alcanzan mayor resistencia son de cemento Portland, en particular la inserción de una pequeña cantidad de fosfato de potasio monobásico permite aumentarla. La ceniza volante y la magnesia influyen negativamente sobre la resistencia, sobre todo su mezcla comporta una disminución importante de la resistencia, así como a adición de posos de café baja la resistencia. La variación de resistencia tiene una tendencia parabólica para todos los morteros, aunque la presencia de ceniza volante induzca su mayor incremento en el tiempo;
5. el material utilizado para confeccionar los morteros no influye sustancialmente sobre su densidad;
6. en cuanto a la retracción, la ceniza volante comporta disminuciones en volumen pequeñas concentradas durante los primeros días después de la realización. El cemento de fosfato de magnesio

alcanza un incremento de pequeña entidad de volumen únicamente en edades tempranas. Cuando ceniza volante y magnesia están mezclados, su comportamiento en términos de retracción es asimilable a lo del cemento Portland, con disminuciones más significativas e irregulares de volumen;

7. todos los morteros dejados en húmedo absorben una gran cantidad de agua a edades tempranas, evidenciando que, entre todos los componentes empleados, la magnesia absorbe más agua mientras la ceniza volante menos;
8. en ambiente seco la tendencia a perder peso cambia en función del material constituyente el mortero: el cemento Portland y la ceniza volante pierden peso gradualmente (la ceniza volante provoque una disminución de peso más alta), mientras la magnesia pierde peso únicamente durante a edades tempranas.

Finalmente, se puede concluir que los cementos más aptos para confeccionar hormigones biológicos son los cementos a base de magnesia, aunque para que desarrollen bien sus propiedades debería ponerse una cantidad superior de fosfato de potasio monobásico. Esto podría por un lado disminuir aún más el pH y por otro lado aumentar las propiedades mecánicas del mortero.

### **7.3 TRABAJOS FUTUROS**

En base a la investigación realizada se abren diversas vías para explorar el tema, que aúnan la construcción, la sostenibilidad, la botánica y la bioclimática.

Dado que en este trabajo se han fabricado solo pastas y morteros con pequeñas cantidades de aditivos, será positivo profundizar en la influencia de los aditivos dentro de las mezclas realizando morteros con porcentajes

más altas de fosfato de potasio, para estudiar el comportamiento de los morteros cuando Mg/P es inferior a lo estudiado, y de aditivos retardantes, tales ácido bórico y bórax, para comparar su influencia sobre las propiedades de los compuestos.

En segundo lugar, sería positivo proceder con la preparación y caracterización física y química de hormigones que tengan características favorables con el crecimiento de las plantas. Para fabricar hormigones cuanto más sostenibles, se emplearán materiales de desecho, como el corcho y otros, para sustituir los áridos.

Paralelamente la investigación deberá enfocarse sobre las especies de organismos que por un lado sean compatibles con los materiales de construcción y por otro proporcionen los beneficios de los cuales se ha comentado en el presente proyecto.

Por último, se realizarán elementos constructivos de hormigón biológico y sobre estos se realizarán pruebas para evaluar su eficiencia energética y acústica, sus capacidades de evaluación de la calidad del aire, como absorbedores de contaminantes, así como la durabilidad del material resultante.

## Bibliografía

1. Aurelio Ghersi, *Il Cemento Armato* (Flaccovio, 2010).
2. I. Susorova, '5 – Green Facades and Living Walls: Vertical Vegetation as a Construction Material to Reduce Building Cooling Loads', in *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs*, 2015, pp. 127–53.
3. Nyuk Hien Wong and others, 'Thermal Evaluation of Vertical Greenery Systems for Building Walls', *Building and Environment*, 45.3 (2010), 663–72.
4. Azkorra, Z., G. Pérez, J. Coma, L. F. Cabeza, S. Bures, J. E. Álvaro, and others, 'Evaluation of Green Walls as a Passive Acoustic Insulation System for Buildings', *Applied Acoustics*, 89 (2015), 46–56.
5. Bargagli, Roberto (Università di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente), 'I Bioindicatori Della Qualità Ambientale', in *Pianeta Galileo 2012*, 2012, pp. 111–18.
6. Calatayud Lorente, Vicent., Mari□a Jose□. Sanz Sa□nchez, Gerardo. Sa□nchez Pen□a, and Spain. Direccio□n General de Conservacio□n de la Naturaleza., *Gui□a de Li□quenes Epi□fitos : En Las Parcelas Del Sistema Pan-Europeo Para El Seguimiento Intensivo Y Continuo de Los Sistemas Forestales (Red CE de Nivel II) En Espan□a* (Madrid: Organismo Aut□nomo Parques Nacionales, 2000).
7. Fan, Shijian, and Bing Chen, 'Experimental Study of Phosphate Salts Influencing Properties of Magnesium Phosphate Cement', *Construction and Building Materials*, 65 (2014), 480–86
8. Guillitte, O., 'Bioreceptivity: A New Concept for Building Ecology Studies', *The Science of the Total Environment*, 167 (1995), 215–20

9. Lee, Kyung-Ho, Hyun-Sub Yoon, and Keun-Hyeok Yang, 'Tests on Magnesium Potassium Phosphate Composite Mortars with Different Water-to-Binder Ratios and Molar Ratios of Magnesium-to-Phosphate', *Construction and Building Materials*, 146 (2017), 303–11.
10. Ma, Hongyan, Biwan Xu, and Zongjin Li, 'Magnesium Potassium Phosphate Cement Paste: Degree of Reaction, Porosity and Pore Structure', *Cement and Concrete Research*, 65 (2014), 96–104.
11. Ma, Hongyan, Biwan Xu, Jun Liu, Huafu Pei, and Zongjin Li, 'Effects of Water Content, Magnesia-to-Phosphate Molar Ratio and Age on Pore Structure, Strength and Permeability of Magnesium Potassium Phosphate Cement Paste', *Materials and Design*, 64 (2014), 497–502.
12. Manso Blanco, Sandra, 'Bioreceptivity Optimisation of Concrete Substratum to Stimulate Biological Colonisation', *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*, 2014.
13. Omrany, Hossein, Ali GhaffarianHoseini, Amirhosein GhaffarianHoseini, Kaamran Raahemifar, and John Tookey, 'Application of Passive Wall Systems for Improving the Energy Efficiency in Buildings: A Comprehensive Review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62 (2016), 1252–69.
14. Qiao, Fei, C. K. Chau, and Zongjin Li, 'Property Evaluation of Magnesium Phosphate Cement Mortar as Patch Repair Material', *Construction and Building Materials*, 24 (2010), 695–700.
15. Consejo de la Construcción Ecológica de los Estados Unidos, *Guía de Estudio de LEED Green Associate Del USGBC (USGBC LEED Green Associate Study Guide)*, U.S. Green Building Council, 2009.
16. Xu, Biwan, Hongyan Ma, and Zongjin Li, 'Influence of Magnesia-to-Phosphate Molar Ratio on Microstructures, Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Magnesium Potassium Phosphate Cement Paste with Large Water-to-Solid Ratio', *Cement and Concrete Research*, 68 (2015), 1–9.

17. Yang, Jianming, and Chunxiang Qian, 'Effect of Borax on Hydration and Hardening Properties of Magnesium and Potassium Phosphate Cement Pastes', *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25 (2010), 613–18.
18. Biwan Xu and others, 'Influence of Fly Ash on Compressive Strength and Micro-Characteristics of Magnesium Potassium Phosphate Cement Mortars', *Cement and Concrete Research*, 99.May (2017), 86–94.
19. Anusavice, K.J., 1991. Phillips' Science of Dental Materials, 10th edition W.B. Saunders, Philadelphia, PA.
20. Smith, D.C., 1971. A review of the zinc polycarboxylate cements. *J. Can. Dent. Assoc.* 37, 22–29.
21. Pameijer, C.H., Stanley, H.R., 1988. Biocompatibility of a glass ionomer luting agent in primates. Part I. *Am. J. Dent.* 1, 71–76.
22. Löf, J., Svahn, F., Jarmar, T., Engqvist, H., Pameijer, C.H., 2008. A comparative study of the bioactivity of three materials for dental applications. *Dent. Mat.* 24, 653–659.
23. Solange I Mussatto and others, 'Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues', *Food and Bioprocess Technology*, 4.5 (2011), 661.
24. Arul Arulrajah and others, 'Spent Coffee Grounds as a Non-Structural Embankment Fill Material: Engineering and Environmental Considerations', *Journal of Cleaner Production*, 72 (2014), 181–86.
25. Teck-Ang Kua, Arul Arulrajah, Suksun Horpibulsuk, and others, 'Strength Assessment of Spent Coffee Grounds-Geopolymer Cement Utilizing Slag and Fly Ash Precursors', *Construction and Building Materials*, 115 (2016), 565–75.
26. Teck-Ang Kua, Arul Arulrajah, Alireza Mohammadinia, and others, 'Stiffness and Deformation Properties of Spent Coffee Grounds Based

- Geopolymers', *Construction and Building Materials*, 138 (2017), 79–87.
27. Johansson, S. (2006). Biological growth on mineral façades Division of Building Materials, LTH, Lund University.
28. O. Guillitte, 'Bioreceptivity: A New Concept for Building Ecology Studies', *Science of The Total Environment*, 167.1–3 (1995), 215–20.
29. A.Z. Miller and others, 'Bioreceptivity of Building Stones: A Review', *Science of The Total Environment*, 426 (2012), 1–12.
30. Thu Hien Tran and others, 'Influence of the Intrinsic Characteristics of Mortars on Biofouling by *Klebsormidium Flaccidum*', *International Biodeterioration & Biodegradation*, 70 (2012), 31–39.
31. P.J. Blanc A. Dubosc, G. Escadeillas, 'Characterization of Biological Stains on External Concrete Walls and Influence of Concrete as Underlying Material - ScienceDirect', *Cement and Concrete Research*, 31.11 (2001), 1613–1317.
32. NORMA UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.
33. NORMA UNE 80112:2016. Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la retracción de secado y del hinchamiento en agua.
34. T. Hemalatha, Ananth Ramaswamy, 'A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volumen utilization in developing sustainable concrete', *Journal of Cleaner Production*, 147 (2017), 546-559.
35. Mauricio Ossa M., Hector Jorquera S. 'Cementos con cenizas volantes', *Materiales de construcción*, Vol. 34. n." 193 (1984), 3-17.