

Universidad Pública de Navarra

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

*Nafarroako Unibertsitate Publikoa*

*NEKAZARITZAKO INGENIARIEN  
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA*

# LADRILLO ECOLÓGICO COMO MATERIAL SOSTENIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN

presentado por

**María Cabo Laguna** *(k)*

*aurkeztua*

**INGENIERO TÉCNICO AGRÍCOLA EN EXPLOTACIONES AGROPECUARIAS  
NEKAZARITZAKO INGENIARI TEKNIKOA NEKAZARITZA ETA ABELTZAINZA  
USTIAPENAK BEREZITASUNA**

**DEPARTAMENTO DE PROYECTOS E INGENIERÍA RURAL**

**upna**  
Universidad  
Pública de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**Junio, 2011 / 2011, Ekaina**

# AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural de la Universidad Pública de Navarra por poner a mi disposición los medios necesarios para el desarrollo de este trabajo final de carrera.

A mis directores de trabajo, Francisco Ramírez y Andrés Seco, por apoyarme y darme la oportunidad de realizar este ambicioso proyecto. Quiero agradecer muy cariñosamente al profesor Eduardo Prieto por su incansable predisposición para con los alumnos y por enseñarme que en los pequeños detalles está la perfección.

A mis compañeros de laboratorio y al becario Rubén Leunda por arrimar el hombro siempre que ha sido necesario. Especialmente y con todo mi cariño, a Luis Miqueleiz y a Pablo Urmeneta, gracias por enseñarme, por el afecto y por el buen hacer del día a día. Por crear un excelente clima de trabajo. Indudablemente, cada uno en vuestro papel, sois indispensables para este laboratorio.

Sobre todo gracias a toda mi familia, el mejor equipo que puedo desear, desde mis pequeños a mis mayores. Y por supuesto y en primerísimo lugar a vosotros: Aita y Ama, y a mis hermanas Amaia e Itziar y nuestro pequeño Oker, por darme siempre la fuerza, el ánimo y el cariño para seguir para adelante. Sin vosotros esto no hubiera sido posible.

Y a ti Jose, gracias por todo, por haber recorrido este camino tan largo conmigo. Para ti reservo el mejor ecoladrillo para que algún día lo pongamos juntos en nuestra casa.

Familia esto va por vosotros.

# RESUMEN

Se propone la realización de un nuevo material constructivo, denominado *ecoladrillo* (foto 1), inspirado en el tradicional adobe y que sustituya al ladrillo convencional cocido. Para ello se emplea un suelo marginal no empleado hasta el momento para la fabricación de ladrillos. Como aditivos comerciales se emplean el cemento para la realización de las combinaciones de referencia y, la menos usual pero igual de eficiente cal hidráulica. Como aditivo resistente se utilizan las cenizas de cáscaras de arroz y como aditivo estructurante las cascarillas también de arroz. La adición de estos dos últimos aditivos residuales suponen la reducción de un gran impacto medio ambiental ya que las cenizas procedentes de la biomasa generada por la combustión de los restos de la cosecha del arroz, permanecen por millones de toneladas en vertederos de todo el mundo.



**Foto 1. Ecoladrillo**

Hasta la definición de este producto se han realizado 4 fases experimentales según se ha ido añadiendo un nuevo aditivo a la muestra. Para la caracterización de cada combinación propuesta en cada fase, se han ejecutado el ensayo de resistencia a compresión simple, el ensayo de absorción y el ensayo de heladicidad. Además, se ha realizado un seguimiento de las pérdidas de peso que se producen durante el tiempo de curado y las pérdidas de resistencia que se ocasionan tras inmersión y tras los ciclos de hielo/deshielo.

Todas las combinaciones estudiadas se han realizado a tres niveles de compactación relativamente bajos (1, 5 y 10 MPa). No obstante, se descarta la realización de estos ladrillos a 1 MPa, sobre todo, porque la estructura de los mismos es excesivamente abierta. Posteriormente, en

la penúltima fase se han descartado las combinaciones a 5 MPa ya que, al contrario de lo que se observa a 10 MPa, no se producen mejoras significativas.

Los resultados obtenidos son totalmente satisfactorios. La cal hidráulica natural es un aditivo sostenible y con capacidad de desarrollar resistencia. Además, combinando la cal con el resto de aditivos las diferencias con la combinación de referencia, realizada con cemento, son mínimas. Las cenizas de cáscara de arroz suponen un gran aditivo que potencia a más del doble la resistencia de la muestra con cenizas que sin ellas, demostrando así que favorecen notablemente el desarrollo de las reacciones puzolánicas. Las cascarillas de arroz disminuyen en más de un 10% la densidad de la combinación con únicamente aditivo comercial.

El *ecoladrillo* además de una buena apariencia responde a criterios ecológicos y sostenibles ya que requiere un bajo nivel de energía para su fabricación y se elimina la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al ser ladrillos que no requieren de cocción.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	3
1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO.	4
1.2. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN.	5
1.3. OBJETO DEL TRABAJO	7
1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO	8
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	11
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b> .....	13
<b>4. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL</b> .....	19
4.1. MATERIALES	20
4.1.1. Suelo: marga gris	21
4.1.2. Aditivos	25
4.1.2.1. Cemento (PC)	26
4.1.2.2. Cal hidráulica (NHL·5)	27
4.1.2.3. Cenizas de cáscara de arroz (RHA)	28
4.1.2.4. Cascarillas de arroz (RH)	30
4.2. METODOLOGÍA	32
4.2.1. Composición de las mezclas	33
4.2.2. Determinación de la humedad óptima y densidad máxima de compactación	36
4.2.3. Preparación de las muestra	37

4.2.4. Ensayo de resistencia a compresión simple	39
4.2.5. Ensayo de absorción	40
4.2.6. Ensayo de heladicidad	41
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>43</b>
5.1. FASE I	44
5.2. FASE II	61
5.3. FASE III	77
5.4. FASE IV	91
5.5. RELACIONES DE DENSIDAD	100
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>101</b>
<b>7. VALORACIÓN PERSONAL</b>	<b>107</b>
<b>8. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>109</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>111</b>
<b>10. ANEXOS</b>	

#### ANEXO 1: NORMAS UNE

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

En primer lugar a la autora le gustaría hacer partícipe a los lectores de este trabajo final de carrera los motivos por los que se han invertido tanto trabajo como ilusión y ganas en el desarrollo de estos ladrillos ecológicos que se proponen.

Este proyecto pretende concienciar que el desarrollo de una ingeniería más sostenible es posible. La bioconstrucción es un campo amplio en el que se debe trabajar de forma constante para obtener nuevos logros. Esta tecnología es muy ambiciosa por su eficiencia energética y económica. Este concepto de ingeniería es el que se propone con el desarrollo en este trabajo de ladrillos puzolánicos sin cocción, con el resultado de un material de construcción sostenible con un gran potencial y capacidad de cubrir las necesidades actuales y futuras de la sociedad.

Se desarrolla una nueva pieza constructiva que elimina la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, y utiliza niveles de compactación mínimos que incluso se pueden obtener por medio de estrujadoras manuales de ladrillos mediante un simple mecanismo hidráulico que no requiere de grandes avances tecnológicos. Además, se trabaja con residuos procedentes del cultivo del arroz que suponen millones de toneladas al año en todo el mundo, lo que implicaría la reducción de un gran impacto ambiental ya que, al no tener ninguna salida comercial hasta el momento, se almacenan en vertederos.

Con este trabajo se pretende crear un nuevo concepto de autoconstrucción para las regiones más pobres. Pueblos que además de tener su propio cultivo para la alimentación básica, aprovecharían los restos de la cosecha, en este caso de la trilla del arroz, para obtener energía con la quema de los mismos. De las cenizas procedentes de esa combustión elaborar, con arcillas y con la cal hidráulica natural, un aditivo sostenible que se extiende por todo el mundo y es muy poco usado, ladrillos ecológicos para crear sus propias construcciones.

El precio final que puede alcanzar este tipo de materiales se pretende, aunque sería necesario realizar un estudio de viabilidad económica previo, que sea relativamente bajo



debido principalmente al uso de residuos y al mínimo gasto energético. Además, el coste medio ambiental se minimiza y se consolida un mercado más sostenible y ecológico.

## **1.2. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN**

La apuesta por nuevas propuestas de investigación sobre alternativas sostenibles debe implicar a todos los sectores de la sociedad para dar un nuevo enfoque a las soluciones planteadas hasta el momento.

Fruto de la concienciación del gran impacto ambiental producido por el hombre desde el comienzo de la Revolución Industrial, tomamos conciencia del agotamiento de la tierra y de los recursos. Consecuencia de ello, se comienza a vislumbrar una conciencia más sostenible y ecológica. El derroche energético y los desmesurados objetivos de mercado y modelos de vida, llevan a una reflexión global y al planteamiento de metas diferentes.

En España y en otros países con recursos, muchos de los edificios de nueva construcción están diseñados bajo la conciencia del cambio climático, con sistemas de ahorro de energía y por lo tanto bajas emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Esta situación comienza a ser indispensable en cualquier modelo productivo. En los países económicamente más desfavorecidos esta problemática pasa a un segundo plano por la carencia de recursos. La autoconstrucción con arcilla ha demostrado ser la respuesta más apropiada en varios países de Asia, África y América Latina, y quizás la solución que mejor aúna ambos dilemas.

Los ladrillos de arcilla cocida son algunos de los materiales de construcción más importantes de todos los tiempos. Hoy, sin embargo, a la mayoría de productores les resulta cada vez más difícil competir con los productos a base de cemento. Este es considerado un producto estrella de la construcción que genera un gran impacto medio ambiental, que implica en su elaboración altos niveles de energía y una gran dependencia del petróleo. El incremento del precio del crudo desde 2008, la deforestación, las nuevas normativas y regulaciones en materia medio ambiental y el aumento del coste de

producción, demandan la búsqueda de alternativas para las empresas de ladrillos cocidos tradicionales.

Todos estos factores negativos y la necesidad de crear productos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, han llevado a la realización de este trabajo de investigación siguiendo recientes propuestas en la elaboración de ladrillos puzolánicos que mejoren el perfil medio ambiental de la construcción (Boardman, 2004, Kjarstad y Jonson, 2007, Rajgor, 2007 y Carter, 2008).

La elaboración de ladrillos ecológicos responde a las necesidades de disminuir el gasto energético y el impacto ambiental provocado por subproductos provenientes de cultivos agrícolas e industriales, y a la necesidad de aumentar la calidad medio ambiental. En este trabajo se propone la elaboración de ladrillos puzolánicos sin cocción y con materiales ecológicamente aceptables. Además, como puzolanas artificiales se utilizan subproductos residuales del cultivo del arroz, de esta forma se elimina colateralmente el impacto ambiental que éstos producen.



**Foto 2. Cascarillas de arroz: restos del trillado.**

La principal ventaja del uso de los *ecoladrillos* es la eliminación de la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al eliminar la cocción del proceso de elaboración de los mismos. Por otro lado, el hecho de que los aditivos residuales que se van a utilizar en este trabajo (tanto cáscaras como cenizas) procedan del cultivo del arroz tiene gran relevancia ya que se trata del cultivo de cereal que mayor extensión de superficie ocupa en el mundo (FAO,

2008). Los restos de la cosecha del arroz ya se utilizan para crear energía limpia en forma de biomasa, el problema reside en que en el proceso de combustión de estos residuos, se generan unas cenizas que producen un enorme impacto ambiental. A nivel mundial, se producen cada año aproximadamente 480 Mt de grano de arroz, que generan 120 Mt de cáscaras de arroz. Teniendo en cuenta que la relación ceniza/cáscara de arroz es del 18%, la producción mundial de RHA (cenizas de cáscaras de arroz) podría ser de hasta 21 Mt/año (Andreola, 2005).

Con este material innovador se pretende disminuir el impacto ambiental generado por los residuos procedentes de la biomasa alimentada por los restos de cosecha del arroz, disminuir el gasto energético que se produce en la fabricación de los ladrillos convencionales y minimizar el coste de producción de estos ladrillos puzolánicos que se espera que sea más bajo que otros materiales de construcción.

### 1.3. OBJETO DEL TRABAJO

El principal objeto es el desarrollo de ladrillos puzolánicos sin cocción y compactados a tres niveles relativamente bajos de presión, como material ecológico y sostenible de construcción y alternativa a los ladrillos tradicionales cocidos. Para ello, se utilizará la cal hidráulica natural, el cemento Portland como aditivo de referencia, y residuos como las cascarillas de arroz procedentes de la cosecha del arroz y las cenizas de cáscara de arroz subproducto de la generación de biomasa. La base de este ladrillo es un tipo de arcilla, la marga gris, un suelo considerado marginal. Para ello se han seguido los siguientes pasos::

- Estudio del estado del arte de la técnica de ladrillos puzolánicos sin cocción.
- Realización de las pruebas necesarias en laboratorio para poder determinar las combinaciones de aditivos óptimas y procedimientos de ejecución adecuados.

- Establecimiento y especificación del comportamiento óptimo de los ladrillos mediante la realización de diversos ensayos que prueben, sobre todo, la durabilidad y resistencia de la nueva pieza constructiva.
- Plantear un nuevo concepto de autoconstrucción a partir del propio cultivo de aquellas regiones más desfavorecidas.
- Concienciar a la sociedad que la bioconstrucción es una alternativa viable y sostenible.

## 1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El trabajo experimental de este proyecto se ha desarrollado principalmente en el laboratorio de Mecánica de Suelos (UPNA). Se han llevado a cabo la determinación de las combinaciones óptimas para finalmente elaborar el *ecoladrillo*, y los ensayos realizados para la determinación de la resistencia y durabilidad de la pieza en situación de servicio.

A continuación se describe la organización de los diferentes apartados que conforman este trabajo final de carrera:

En el capítulo “**1. Introducción**” se realiza la introducción general. Se han expresado los motivos que han llevado a la autora a formar parte en esta novedosa investigación, se ha desarrollado el contexto actual y se ha fundamentado el trabajo realizado. Este primer punto, explica la necesidad de crear una alternativa para el mercado de la mampostería tradicional obteniendo un producto novedoso que sea sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Además se exponen los objetivos generales de la realización de este proyecto y la contribución que se hace al conocimiento en materia de bioconstrucción.

En el capítulo “**2. Objetivos**” se expone el principal objetivo del trabajo y se detallan los objetivos más específicos.

En el capítulo **“3. Estado del arte”** se presenta la revisión bibliográfica realizada para establecer el nivel de conocimiento actual del arte. También, en este capítulo, se realiza un resumen de toda la información utilizada sobre ladrillos cocidos tradicionales y ladrillos puzolánicos sin cocción, así como de los materiales utilizados en este trabajo.

En el capítulo **“4. Investigación experimental”**, en primer lugar se detallan los materiales empleados, describiendo las características del suelo empleado y de los diferentes aditivos ensayados. Y, en segundo lugar, se describe la metodología seguida a lo largo de la campaña propuesta. En este punto, también se refiere al proceso de elaboración de las piezas y a los ensayos llevados a cabo.

En el capítulo **“5. Resultados y discusión”** se muestran los resultados obtenidos en cada etapa de la campaña: fase I, fase II, fase III y fase IV. En cada fase, se analizan los resultados y al final de cada una se valora en conjunto cada fase y su evolución respecto a las anteriores.

En el capítulo **“6. Conclusiones”** se exponen las conclusiones extraídas de la investigación experimental realizada.

En el capítulo **“7. Valoración personal”** se realiza una reflexión de lo que ha supuesto la creación de un nuevo material constructivo.

En el capítulo **“8. Nuevas líneas de investigación”** se proponen nuevas ideas con el fin de encontrar más alternativas y formas de construir más sostenibles y respetuosas con medio ambiente y sus recursos naturales.

Por último, en los dos últimos capítulos de este trabajo, 9 y 10, se indica la bibliografía empleada y se adjunta el anexo que recoge la normativa referente a los ensayos realizados en este trabajo.



## 2. OBJETIVOS

El principal objetivo del trabajo es el desarrollo de **ladrillos ecológicos de carácter puzolánico** mediante la incorporación de residuos procedentes del cultivo del arroz, y con bajo coste energético y económico. Se pretende que sea un proyecto sostenible y posible de llevar a cabo también en poblaciones con menos recursos económicos y tecnológicos. Asimismo, este objetivo general se puede desglosar en los siguientes objetivos específicos:

- Aprovechar los residuos procedentes del cultivo del arroz.
- Eliminar el impacto medio ambiental que provocan las cenizas de cáscara de arroz procedentes de la industria de la biomasa.
- Minimizar el gasto energético en el proceso de elaboración de los ladrillos: disminuyendo la energía utilizada de compactación y eliminando la cocción.
- Aprovechar una arcilla de bajo valor económico como es la marga gris de la cuenca de Pamplona.



## **3. ESTADO DEL ARTE**

Los ladrillos tradicionales cocidos como material de construcción datan de hace más de 5000 años (Brick Development Association, 2009a). Éstos han permitido la construcción de edificios duraderos y confortables. Los Romanos, grandes innovadores de la arquitectura, ya utilizaban en sus construcciones los ladrillos cocidos y antes de estos los adobes tradicionales ya que eran buenos conocedores de sus buenas propiedades haciendo gran uso de este tipo de materiales durante toda su historia. A finales del siglo XX, los ladrillos cocidos fueron usados generalmente en estructuras de media y baja altura, como revestimiento en muros de hormigón, pilares de acero y en tabiquería interna no portante.

España tiene una larga historia en la fabricación y utilización de piezas cerámicas y en particular de ladrillos cocidos. El sector cerámico español es el mayor productor europeo de este material para la construcción, con más de 30 millones de toneladas anuales. En la actualidad, existen más de 200 empresas que se dedican a la producción de materiales cerámicos. La variabilidad de ladrillos cocidos que existe hoy en día en nuestro mercado es inmensa, existiendo ladrillos para cualquier tipo de aplicación (Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida).

La industria ladrillera tiene un gran consumo de energía, aproximadamente 4,06 billones kWh equivalentes de gas natural al año (CERAM, 2009). Los hornos cerámicos utilizados en este tipo de industria consumen una gran cantidad de combustibles fósiles, lo cual origina un enorme gasto energético y la liberación a la atmósfera de gases de efecto invernadero. Durante el proceso de cocción muchos gases nocivos (incluyendo gases carbónicos, hidrogenados y fluorados) y diferentes partículas son liberadas desde los hornos cerámicos (US EPA, 2003). Estas emisiones son desde hace varios años una de las mayores preocupaciones ambientales del sector.

Con el fin de realizar mejoras significativas en el proceso de producción y reducir el gran aporte de energía necesario para la fabricación de ladrillos puzolánicos, numerosos estudios están desarrollando la incorporación de diferentes residuos en los ladrillos con el fin de disminuir el aporte de arcilla y la posibilidad de reducir las temperaturas de cocción (Boardman, 2004, Kjarstad y Johnsson, 2007, Rajgor, 2007 y Carter, 2008).

La reciente aparición de nuevos sistemas de generación eléctrica como las centrales térmicas alimentadas por biomasa, lleva consigo la aparición de nuevos residuos procedentes de su actividad. La biomasa, tras su calcinación en el horno, produce cenizas y escorias con unas características químicas diferentes a las cenizas de carbón. Sin embargo, algunas de las cenizas producidas en centrales alimentadas por biomasa, entre su variada composición química tiene un alto contenido en sílice amorfa. Este mineral es conocido por ser uno de los minerales que interviene en las reacciones de cementación y por lo tanto son susceptibles de desarrollar actividad puzolánica si se combinan con el aditivo alcalino activador adecuado (Behak y Pérez, 2008).

Respecto al tipo de suelo empleado para la elaboración de los ladrillos ecológicos, la marga gris, presenta propiedades físicas poco adecuadas para su utilización en ingeniería civil como alta plasticidad, mala trabajabilidad, baja permeabilidad, inestabilidad volumétrica así como bajas propiedades mecánicas (Guney et al., 2007; Lin et al., 2007; Göktepe et al., 2008). La estructura de las arcillas se compone básicamente de láminas con carga superficial negativa. La adición a este tipo de suelos de cal produce la floculación de las láminas de arcilla. Esto produce una estructura interna abierta entre las mismas por repulsión electrostática. Con la adición de cal se produce la fijación de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ , de forma que se equilibran las cargas electrostáticas de las capas de arcilla y se reducen las fuerzas electroquímicas de repulsión entre las mismas. Esto produce la adhesión de las partículas de arcilla en flóculos (las láminas de arcilla se ven enlazadas ahora por los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ), dando lugar a un suelo con propiedades ingenieriles mejoradas: una estructura más granular, menor plasticidad y mayor permeabilidad (Kinuthia et al., 1999; Lin et al., 2007).

Además, la presencia de los iones  $\text{OH}^-$ , provenientes de la hidratación de los óxidos de la cal, aumentan el pH hasta valores aproximados de 12,4. En estas condiciones se producen las reacciones puzolánicas, consistentes en que el Si y el Al que forman parte de la matriz arcillosa se solubilizan y se combinan con el  $\text{Ca}^{2+}$  disponible, dando lugar a compuestos cementantes denominados Hidróxidos de Calcio-Silicatos (CSH) e Hidróxidos de Calcio-Aluminatos (CAH) (Nalbantoglu, 2004; Guney et al., 2007; Yong y Ouhadi, 2007; Chen y Lin, 2009). Estos compuestos son los responsables de la mejora de

las propiedades mecánicas del suelo, que van aumentando en el tiempo a medida que las reacciones puzolánicas se van desarrollando, incluso durante varios años según algunos autores (Wild et al., 1998).

En aquellos suelos en los que no se encuentran disponibles suficientes cantidades de Si y Al para producirse las reacciones puzolánicas, estos iones deben ser incorporados con el aditivo. La mejora de las capacidades mecánicas conseguidas en cada caso dependerán de la cantidad y riqueza del aditivo, la mineralogía del suelo, el tamaño y la forma de las partículas y las condiciones de curado (Misra et al., 2005; Yarbasi et al., 2007; Göktepe et al., 2008).

El empleo de residuos con capacidad puzolánica procedentes de la combustión de materiales, como las cenizas de combustión de residuos vegetales (Behak y Pérez, 2008), y su aplicación en la fabricación de ladrillos puzolánicos ecológicos, así como la propia elaboración de los mismos, no se encuentran recogidas dentro de normativa española, aunque la bibliografía citada permite suponer que su empleo permitirá alcanzar los parámetros resistentes mínimos exigidos en la normativa actual vigente sobre piezas para fábrica de albañilería. (Oti et al, 2008a., Oti et al, 2008b., Oti et al, 2008c.; UNE EN 772-1; UNE 67028 EX).

Por otro lado, también se está considerando el empleo de aditivos en forma de fibras vegetales o animales en el proceso de elaboración de los ladrillos puzolánicos. Cabe destacar que la adición de fibras vegetales, garantizan la disminución de las grietas, limitan la contracción de la pieza, aligeran los ladrillos y disminuyen el tiempo de curado (Galín-Marín, 2010; Bouhicha et al, 2005)

Además de todo lo anteriormente comentado, merece la pena mencionar el impacto medioambiental que no se generaría elaborando ladrillos puzolánicos ecológicos en frío. Algunas fuentes independientes (Oti et al 2009), indican que la fabricación tradicional de ladrillos cocidos tiene un coste energético de 4186,8 MJ por cada tonelada de ladrillos producidos con una temperatura de cocción entre 900 y 1200°C. Además, el proceso de

cocción libera a la atmósfera alrededor de 202 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada (BDA, 2008). Por otro lado, los sistemas tradicionales de elaboración de adobes con secado al sol, empleados en regiones muy secas como los países musulmanes, tienen un coste energético de 525,6 MJ/Tm y unas emisiones de CO<sub>2</sub> de 25,1 kg/Tm (Morton, 2008). Este reducido coste energético se debe principalmente a una elaboración muy tradicional, localizada en las zonas más pobres de dichas regiones y con gran cantidad de mano de obra barata. La elaboración de este tipo de ladrillos necesita una maquinaria con muy poco gasto energético, con lo que diversos estudios han promulgado que el coste energético de la fabricación de ladrillos puzolánicos en frío se sitúa en 657,1 Mj/Tm y unas emisiones totales de 40,95 kg/Tm de CO<sub>2</sub>. Estas cifras, hacen que este nuevo producto sea 7 veces más ecológico y respetuoso con el medioambiente que los ladrillos tradicionales cocidos y además, la incorporación en el proceso de fabricación de residuos como los utilizados en este trabajo, aumentan de manera exponencial su sostenibilidad y contribuyen enormemente a la lucha contra el calentamiento global de la tierra.



# 4. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

*En este capítulo del trabajo se describen los materiales empleados para la realización de este estudio y se describe la metodología llevada a cabo durante todo el proceso.*

*En la primera parte se describen las características y propiedades más interesantes de los materiales empleados. Se describe el suelo utilizado como componente fundamental para los ladrillos propuestos, se detallan los aditivos empleados, tanto los aditivos comerciales seleccionados, el cemento Portland como referencia y la cal hidráulica natural, como los residuales, las cenizas y las cáscaras de arroz.*

*En la segunda parte de este capítulo se explican los métodos llevados a cabo en todos los procedimientos y ensayos que se realizan a lo largo de todo el proceso. Este apartado al que se hace referencia, “4.2. Metodología”, refiere una gran importancia ya que a la hora de llevar a cabo este proyecto en otra zona geográfica distinta, estos son los pasos que se han de seguir para elaborar los ladrillos ecológicos que se proponen.*

## **4.1. MATERIALES**

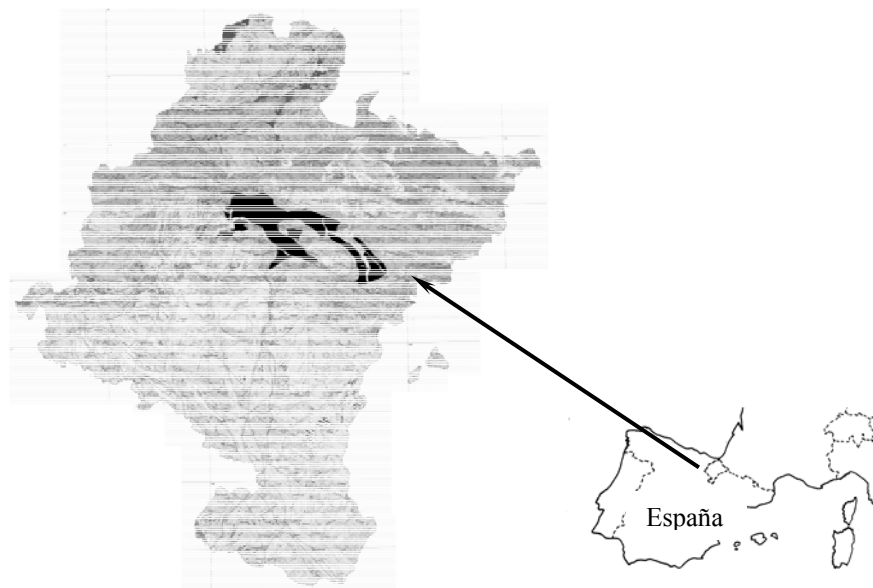
Para la realización de este trabajo experimental se ha utilizado un suelo arcilloso: la marga gris, dos aditivos comerciales: el cemento Portland (PC) convencional y la cal hidráulica natural (NHL-5), y dos residuos procedentes del cultivo del arroz: cenizas de cáscara de arroz (RHA) como aditivo puzolánico y cascarillas de arroz (RH) como aditivo estructurante.

Cada uno de los aditivos ha sido caracterizado física y químicamente. En el caso de los aditivos comerciales, se han empleado las fichas que el productor proporciona de cada aditivo; mientras que en el caso del suelo y las cenizas de cáscara de arroz, se han realizado los oportunos ensayos físico-químicos para su correcta caracterización.



### 4.1.1. SUELO: MARGA GRIS

El suelo empleado es una muestra de la marga gris de la comarca de Pamplona (Navarra). Como se puede observar (figura 1) aparece especialmente en la denominada “Cuenca de Pamplona”. Este tipo de margas se ha considerado representativo del conjunto de suelos margosos de España, con lo que la metodología de este trabajo podría ser extrapolables.



**Fig. 1. Distribución de la marga gris en Navarra.**  
**Fuente: Mapa Geológico de Navarra a escala 1:200.000**

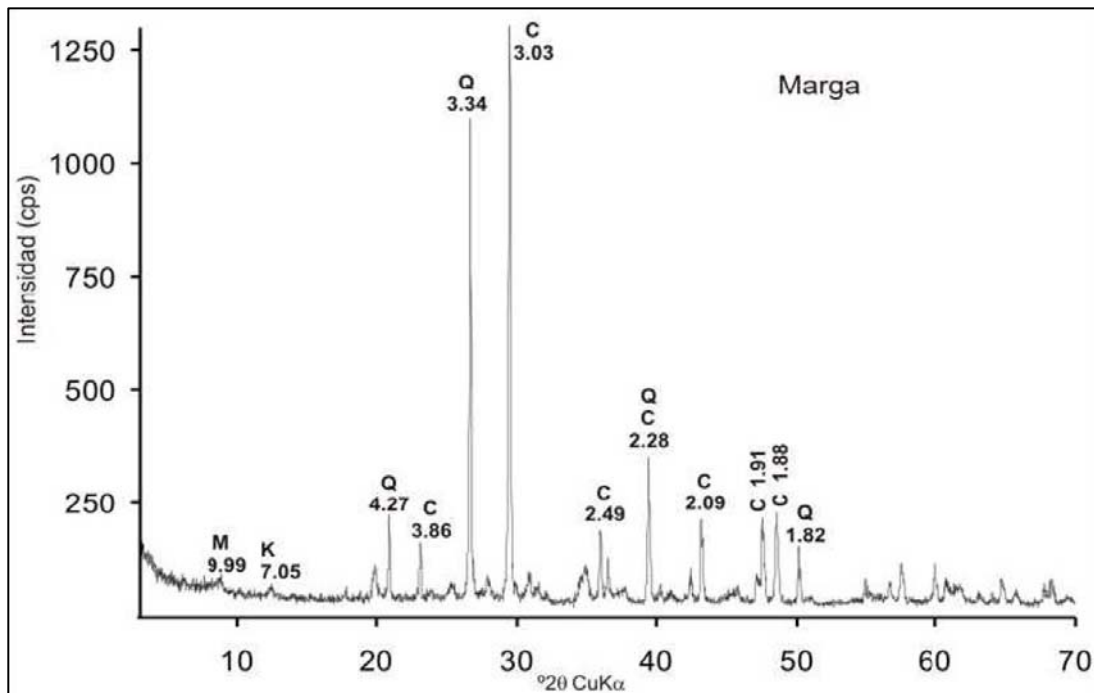
Este material procede de las excavaciones realizadas en dos obras en Pamplona: la realización de un parking subterráneo en la calle Esquiroz y la construcción del polideportivo del Club Atlético Osasuna en la calle Sadar. Se almacenó en la finca de prácticas de la ETSIA (UPNA) en “big-bags” de un metro cúbico de capacidad, en el año 2010 (foto 3).



**Foto 3. Marga gris almacenada en la finca de prácticas.**

Se trata de una roca blanda grisácea sin estratificación definida. Es un material que se meteoriza rápidamente en contacto con el medio ambiente, lo que limita en gran medida su uso en ingeniería civil. Este tipo de suelos se caracteriza por poseer una elevada plasticidad y una capacidad portante muy baja además de una degradación muy alta en contacto con el agua. Las margas se consideran habitualmente un suelo marginal ya que su uso no está destinado a la fabricación de ladrillos puesto que normalmente su destino final en construcción es el vertedero.

Su composición mineralógica se ha determinado mediante Difractometría de Rayos X (DRX). Este ensayo se realizó en el Centro de Ciencias Medioambientales del Instituto de Ciencias Agrarias perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de Madrid. Para la identificación de las especies cristalinas presentes en las muestras, se utilizó la base de datos Power Diffraction File (PDF) del International Centre for Diffraction Data (ICDD). Además, utilizando los valores RIR (Chung, 1974) se determinó la composición de los componentes de las muestras. La DRX (figura 2) y el estudio químico de la muestra dio como resultado un suelo formado por un 51% de calcita, 20% de illita, 15% de cuarzo, 5% de caolinita, 5% de attapulgita y 4% de ankerita.



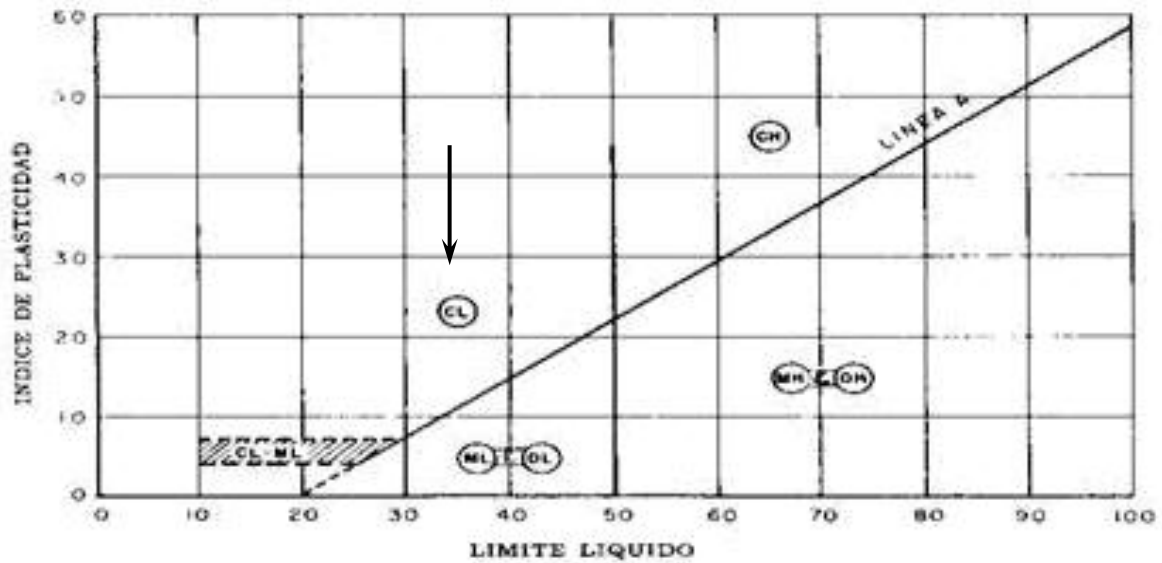
**Fig. 2. Diffractograma del suelo margoso.**

Las propiedades físicas se han determinado según los actuales estándares de clasificación.

La densidad aparente, dato obtenido mediante ensayos realizados en la UPNA siguiendo lo estipulado en la norma UNE 103 302, resultó  $1,3 \text{ Tn/m}^3$ .

El hinchamiento libre en edómetro, ensayo realizado según la norma UNE 103601, es del 0% por lo que según los criterios de clasificación del PG-3, este suelo pertenece a la categoría de suelo tolerable.

Los límites de Atterberg se determinaron bajo las normas UNE 103103 y UNE 103104, obteniéndose como resultados un límite plástico (LP) de 18,05% y un límite líquido (LL) de 25,72%. Así pues, el índice de plasticidad (IP) es 7,67%. Con lo que según el sistema de clasificación de Casagrande Modificado (figura 3), este suelo corresponde a la clase CL. Se trata pues de un suelo con baja capacidad portante y plasticidad.



**Fig. 3. Clasificación de suelos según el sistema de Casagrande Modificado.**

El suelo se disgregó siguiendo el ensayo de Los Ángeles (foto 4) y posteriormente se tamizó a 1 mm. La elección de dicha granulometría se debe a dos motivos principales: uno, garantizar una mezcla más homogénea y dos, una mayor superficie específica, con lo que al favorecer las reacciones puzolánicas se prevén mejores resultados.



**Foto 4. Máquina Los Ángeles**

De ese modo se prepararon 120 kilos iniciales de margas al comienzo de este trabajo (septiembre 2010), aunque luego fue necesario la preparación de más material para completar la campaña diseñada. El suelo ya tamizado se almacenó en el laboratorio en bidones de aproximadamente 150 litros de capacidad a los que se les controló, a tres niveles de altura, el contenido de humedad que tenía el suelo ya que la humedad dentro del cubo seguía una distribución lineal ascendente, siendo ésta mayor en las capas más profundas.

La elección de la marga gris para llevar a cabo este proyecto está basada en dos propiedades fundamentales que tiene esta arcilla: su carácter estable y su poca expansibilidad ya que no tiene hinchamiento. Con todo, se pretende un mejor desarrollo de las reacciones puzolánicas, permitiendo así mismo la obtención de mejores resultados en estos ladrillos. Además, la Universidad de Gales (Reino Unido) ha desarrollado unos ladrillos puzolánicos sin cocción con un suelo similar a la marga gris empleada en este trabajo, que aunque con otros aditivos, obtuvieron unos resultados muy satisfactorios.

#### **4.1.2.ADITIVOS**

Como aditivos primarios se utilizan el cemento, como referencia para todas las combinaciones que se realizan y ensayan, y la cal hidráulica natural como base a todas las combinaciones. La elección de la cal hidráulica frente a otro tipo de cales más usuales (cal aérea, cal viva) se debe únicamente a razones medio ambientales ya que se trata del tipo de cal más respetuosa con el medio ambiente. La cal hidráulica es la única ecológicamente aceptada por su procedencia natural y mínimo impacto ambiental, es considerada un material ecológico para su uso en bioconstrucción (Red Verde).

Además como aditivos secundarios se emplearán dos residuos: las cenizas y cáscaras de arroz que son aditivos residuales. Esto es así ya que las cáscaras proceden del proceso de obtención de arroz para alimentación, y las cenizas de la combustión de estas cáscaras para la obtención de energía. Con lo que se consigue eliminar el impacto ambiental de estos residuos. Por ello resulta muy interesante y novedoso la utilización de las cenizas de cáscaras de arroz para mejorar las propiedades mecánicas del suelo con la

cal hidráulica natural, es decir, aumentar la resistencia del ladrillo inicial, y las cascarillas de arroz para mejorar las propiedades estructurantes.

A continuación, en la tabla 1, se presentan las propiedades físicas más interesantes de los aditivos comerciales empleados, el cemento Portland y la cal hidráulica natural, y la caracterización física de las cenizas de cáscaras de arroz.

<b>Propiedades de los materiales</b>	<b>Cemento (PC)*</b>	<b>Cal hidráulica (NHL·5)*</b>	<b>Cenizas (RHA)**</b>
<b>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	1100	950	350
<b>Índice de hidraulicidad (i)</b>	0,47	0,35	-
<b>Finura Blaine (m<sup>2</sup>/Kg)</b>	360	650	> 1000
<b>Residuo insoluble (%)</b>	0	2	-

**Tabla 1. Propiedades físicas de los aditivos empleados.**

\* Datos obtenidos de catálogo (fabricante Dicon)

\*\* Datos obtenidos mediante ensayos realizados en la UPNA

#### 4.1.2.1. CEMENTO PORTLAND (PC)

El cemento empleado para realizar las muestras de referencia es el Cemento Portland TIPO II B-M (V-L) 32,5 N según la norma UNE-EN 197-1. Las propiedades físicas del PC y su contenido más importante en óxidos se encuentran recogidos en la tabla 2 y en la tabla 3 respectivamente.

El cemento Portland es un conglomerante hidráulico que se obtiene por molturación conjunta de su clínker, de adiciones activas, en su caso, y de la cantidad adecuada de un regulador de fraguado, normalmente piedra de yeso natural. El clínker es el producto que se obtiene al calcinar mezclas de calizas y arcillas preparadas adecuadamente hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes. Los principales

componentes del clínker son el silicato tricálcico (SC3), el silicato bicálcico (SC2), el aluminato tricálcico (AC3) y el ferritoaluminato tetracálcico (C4AF), a los que hay que añadir otros componentes secundarios. Algunos de ellos, como el silicato y el aluminato tricálcico, presentan un calor de hidratación, una velocidad de fraguado y una resistencia inicial elevados.

El cemento es el aditivo comercial por excelencia ya que sus buenos resultados de resistencia y durabilidad son garantía de éxito. Por ello para este trabajo, se ha elegido este aditivo como referencia para todas las combinaciones a realizar y ensayar.

#### **4.1.2.2. CAL HIDRÁULICA NATURAL (NHL·5)**

La cal hidráulica natural empleada se clasifica según la norma UNE-EN 459-1, 2, 3 como NHL·5. También conocida vulgarmente como “cal sucia”, debe esta denominación a que se utiliza en la fabricación de la misma, un 20% de arcilla como materia prima. Como consecuencia de la calcinación de la arcilla se forman, entre otros,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  los cuales le confieren a la cal la capacidad de fraguar en contacto con el agua lo que la convierte en un aditivo con capacidad cementante y un poderoso conglomerante hidráulico.

La cal hidráulica se emplea principalmente en morteros, pinturas, estucos, etcétera. Posee un alto contenido en calcio (ver tabla 2 con los compuestos químicos más importantes) y posee interesantes propiedades puzolánicas (ver tabla 1 con las propiedades físicas más características) con lo que resulta muy adecuada para su uso en la estabilización de suelos de naturaleza arcillosa. No obstante, hoy en día no es muy común su uso en obra civil, como la estabilización de suelos, debido a que el actual Pliego de Prescripciones Técnicas (PG-3) no lo recoge (Bustos, 2001).

### 4.1.2.3. CENIZAS CÁSCARA DE ARROZ (RHA)

Las cenizas de cáscara de arroz (RHA) utilizadas en este proyecto (fotos 5 y 6) se producen en la central térmica Maicerías Española-Dacsa en Almassera (Valencia) cuyo único combustible es el subproducto agrícola del tratamiento de los granos de arroz. La producción de cenizas procedentes de las cáscaras de arroz calcinadas es de 24000 kilos por semana.



**Foto 5. Apariencia de las cenizas de cáscara de arroz.**

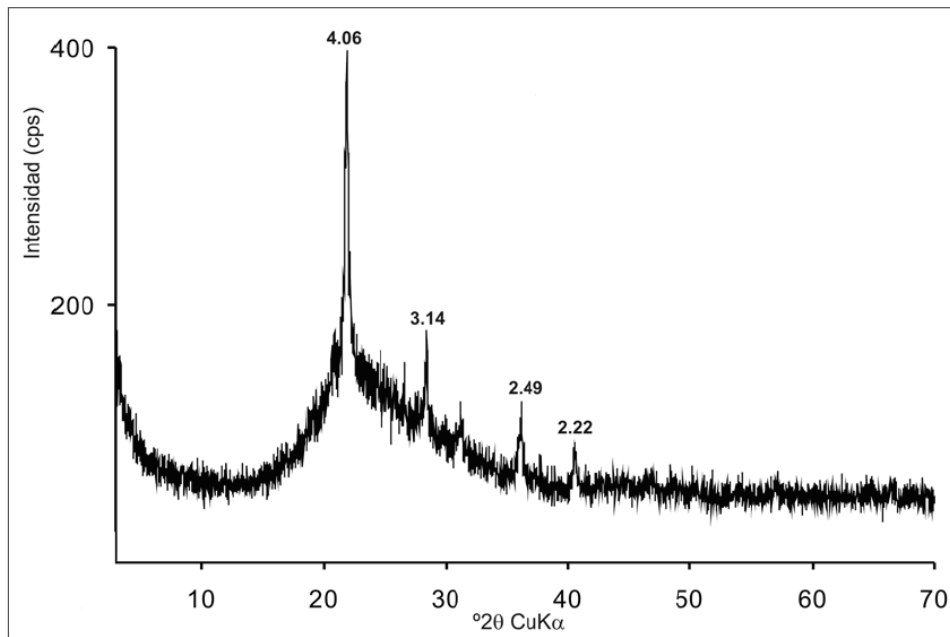


**Foto 6. Detalle de las cenizas.**

Siendo un residuo a nivel mundial, las cenizas suponen un gran problema de almacenamiento y un grave impacto medio ambiental, y por el momento, no se ha desarrollado ninguna aplicación concreta ni uso para valorizarlas.

Estas cenizas se han utilizado tal y como salen del horno sin ningún tipo de tratamiento purificador previo a su uso como aditivo estabilizador. La composición mineral de las cenizas se determinó mediante DRX (figura 4).





**Fig. 4. Difractograma de las cenizas de cáscara de arroz.**

Tal y como se puede observar en el difractograma superior, los máximos de difracción indican exclusivamente la presencia de  $\text{SiO}_2$  en forma de cristobalita. Este alto contenido en silicio proporciona a las cenizas, mezcladas con otros aditivos, unas buenas propiedades puzolánicas; reacciones básicas para la elaboración de los *ecoladrillos* que se proponen en este trabajo.

#### **4.1.2.4. CÁSCARAS DE ARROZ (RH)**

La cáscara de arroz (foto 7), como subproducto del cultivo del arroz, se caracteriza por su baja densidad, por ser aislante acústico y por su fácil trabajabilidad, no oponiendo resistencia al corte. En lo que respecta al fuego se ha comprobado no ser inflamable y de condiciones aceptables de combustibilidad, no produciendo gases.



**Foto 7. Apariencia de las cáscaras de arroz.**

La cáscara de arroz (RH) tiene una composición química parecida a la de la madera, es decir, celulosa, lignina, grasas y resinas, diferenciándose por una fuerte proporción de cenizas con un 18% en sílice.

A continuación, en la tabla 2 quedan reflejados los porcentajes de óxidos más importantes de los aditivos caracterizados químicamente: el cemento Portland, la cal hidráulica natural y las cenizas de cáscaras de arroz.

<b>PESO (%) DE LOS PRINCIPALES ÓXIDOS</b>			
<b>Óxidos principales</b>	<b>Cemento (PC)</b>	<b>Cal hidráulica (NHL·5)</b>	<b>Cenizas (RHA)</b>
<b>CaO</b>	65	-	-
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	-	53	-
<b>MgO</b>	1	-	-
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3	10	-
<b>SiO<sub>2</sub></b>	25	12	95
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,5	-	-
<b>Otros</b>	5,5	25	5

**Tabla 2. Compuestos químicos más importantes de los aditivos empleados.**

## 4.2. METODOLOGÍA

*La campaña diseñada para este proyecto queda dividida en cuatro fases de experimentación en laboratorio con el fin de elegir las combinaciones óptimas hasta llegar al ladrillo definitivo. Teniendo en cuenta la novedad del producto que se propone, la utilización de un suelo marginal no antes utilizado para este tipo de materiales constructivos y los aditivos seleccionados, tanto el comercial como los residuales, no fue posible elaborar directamente el ladrillo ecológico deseado ya que no se contaba con referencias bibliográficas concretas al respecto.*

*Todas las combinaciones propuestas, de cada una de las cuatro fases planteadas, se elaboraron a tres niveles diferentes y relativamente bajos de compactación: 10 MPa, 5 MPa y 1 MPa. No obstante, conforme se han ido analizando los resultados y según han resultado evidente que algún nivel de compactación de los propuestos inicialmente no era eficiente, se ha descartado del proceso. Además, todas las combinaciones elaboradas en la campaña también se realizaron con un aditivo tan estudiado como el cemento para tener una comparativa de referencia.*

*En la fase inicial, el objetivo principal era determinar el contenido óptimo de agua y la densidad seca máxima de compactación de cada combinación propuesta en la fase I. En la fase II, se seleccionaron las tres combinaciones de la fase anterior que superaban, tras 7 días de curado, el ensayo de absorción. Primaron aquellas, que dando buenos resultados, requerían el mínimo contenido de aditivo comercial posible, no sólo por razones económicas sino también medio ambientales.*

*En las dos últimas fases de la campaña, se incorporaron los aditivos residuales. En la fase III, el objetivo principal era el aumento de la resistencia mecánica de la pieza, con lo que a la combinación seleccionada de suelo y cal hidráulica (e igualmente para el aditivo de referencia), se añadieron las cenizas de cáscara de arroz. Por último, en la fase IV se fabricó el ladrillo ecológico definitivo: la marga gris y la cal hidráulica, más las cenizas de cáscara de arroz y las cascarillas trituradas de arroz.*

### 4.2.1. COMPOSICIÓN DE LAS MEZCLAS

Los porcentajes de aditivos por los que se han optado son en base a la bibliografía consultada (Oti et al 2008; Oti et al 2009). Con respecto al aditivo comercial se ha fijado el mínimo en 5% porque según otras investigaciones realizadas en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la UPNA y la consulta a expertos, es considerado un mínimo de garantía. En cuanto a los porcentajes fijados de cenizas, se eligen en función de los resultados previos obtenidos en investigaciones paralelas para ese fin en el mismo laboratorio. Igualmente, el contenido establecido de las cáscaras de arroz es fruto de la realización de unas pruebas previas a la elaboración de la mezcla definitiva.

A continuación se especifican las combinaciones ensayadas con la marga gris en cada fase. Se debe tener en cuenta que los porcentajes de aditivos a los que se hace referencia en las siguientes tablas (fase I, fase II, fase III, fase IV) están calculados sobre suelo seco.

#### COMBINACIONES FASE I:

COMBINACIÓN	Aditivo comercial (%)	PRESIÓN DE COMPACTACIÓN
<b>5PC</b>	5%	
<b>10PC</b>	Cemento	1 MPa
<b>15PC</b>	Portland	5 MPa
<b>20PC</b>	20%	10 MPa
<b>5NHL·5</b>	5%	
<b>10NHL·5</b>	Cal	1 MPa
<b>15NHL·5</b>	hidráulica	5 MPa
<b>20NHL·5</b>	20%	10 MPa

**COMBINACIONES FASE II:**

<b>COMBINACIÓN</b>	<b>Aditivo comercial</b>	<b>Porcentaje de aditivo sobre suelo seco</b>	<b>PRESIÓN DE COMPACTACIÓN</b>
<b>5PC-10MPa</b>		5%	
<b>10PC-10MPa</b>		10%	10 MPa
<b>15PC-10MPa</b>	Cemento Portland	15%	
<b>5PC-5MPa</b>		5%	
<b>10PC-5MPa</b>		10%	5 MPa
<b>15PC-5MPa</b>		15%	
<b>5NHL·5-10MPa</b>		5%	
<b>10NHL·5-10MPa</b>		10%	10 MPa
<b>15NHL·5-10MPa</b>	Cal hidráulica	15%	
<b>5NHL·5-5MPa</b>		5%	
<b>10NHL·5-5MPa</b>		10%	5 MPa
<b>15NHL·5-5MPa</b>		15%	

**COMBINACIONES FASE III:**

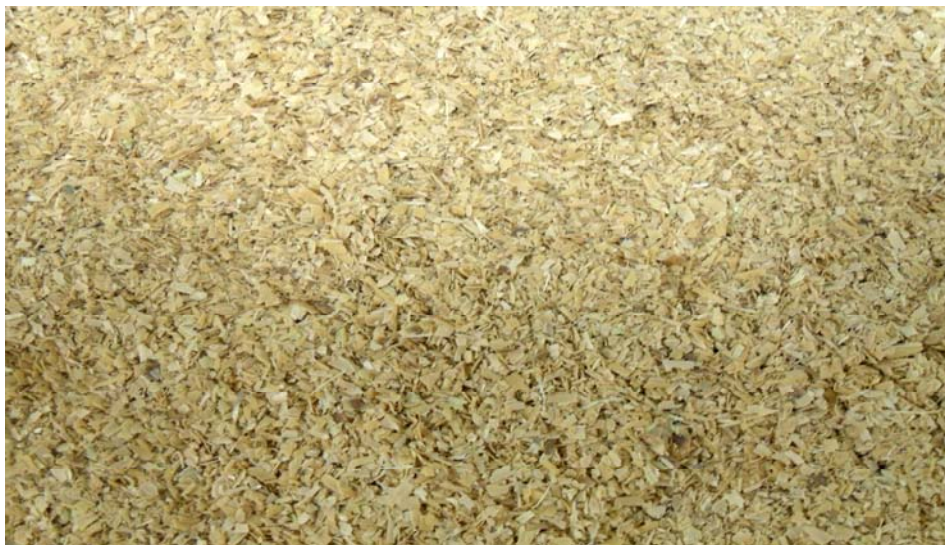
<b>COMBINACIÓN</b>	<b>Aditivo comercial (%)</b>	<b>Cenizas de cáscara de arroz (RHA) (%)</b>	<b>PRESIÓN DE COMPACTACIÓN</b>
<b>5PC-8RHA-10MPa</b>		8%	
<b>5PC-4RHA-10MPa</b>	5% Cemento Portland	4%	10 MPa
<b>5PC-8RHA-5MPa</b>		8%	5 MPa
<b>5PC-4RHA-5MPa</b>		4%	
<b>5NHL·5-8RHA-10MPa</b>		8%	
<b>5NHL·5-4RHA-10MPa</b>	5% Cal hidráulica	4%	10 MPa
<b>5NHL·5-8RHA-5MPa</b>		8%	
<b>5NHL·5-4RHA-5MPa</b>		4%	5 MPa

**COMBINACIONES FASE IV:**

COMBINACIÓN	Aditivo comercial (%)	Cenizas de cáscara de arroz (RHA) (%)	Cáscaras de arroz (RH) (%)	PRESIÓN DE COMPACTACIÓN
<b>5PC-8RHA-5RH-10MPa*</b>	5% Cemento Portland	8%	5%	10 MPa
<b>5NHL-5-8RHA-5RH-10MPa</b>	5% Cal hidráulica			

*\*Ecoladrillo*

Para la realización de las mezclas de la fase IV, se trituraron las cáscaras de arroz (foto 8) con un molinillo para disminuir la dimensión de las mismas provocando un mejor contacto entre partículas, y para que no se generaran huecos de aire y se provocara el agrietamiento de las piezas. Además, de esta manera, el diseño estético del ladrillo mejoraba notablemente.



**Foto 8. Cáscaras de arroz (RH) trituradas.**

El total de combinaciones estudiadas, descritas en las tablas anteriores, es de 48. Teniendo en cuenta esta planificación, era de suponer que sería una investigación costosa que finalmente ha supuesto aproximadamente un año de trabajo.

## **4.2.2. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD Y LA DENSIDAD MÁXIMA SECA**

Para cada combinación es necesario conocer el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima que varían, sobre todo, en función de la presión de compactación utilizada. Ambos datos serán determinados mediante las curvas humedad-densidad (curvas H/D).

Para realizar las curvas H/D, fue necesario preparar 200 gramos de muestra y el correspondiente porcentaje de aditivo sobre masa de suelo seco. Cada combinación se premezclaba en seco durante 5 minutos en la mezcladora y a continuación se añadía la cantidad de agua fijada de manera constante, y se volvía a mezclar durante 10 minutos con el fin de garantizar la homogeneidad de la mezcla.

Para la determinación del contenido óptimo de humedad (curvas H/D), se eligieron cuatro puntos de humedad diferentes, de menor a mayor cantidad, elegidos en base a las referencias de otros trabajos realizados en la UPNA. La densidad seca máxima, se calculó desecando una probeta (ver la realización de las mismas en el apartado 4.2.3.). Para ello, y conocido el peso de la probeta, se introdujo en la estufa a 100°C durante 24 horas y posteriormente se tomó el peso de nuevo, calculando así la diferencia entre el suelo con agua y el suelo seco.



### 4.2.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para cada combinación se fabricaron dos probetas por ensayo a realizar (resistencia a compresión, inmersión, heladicidad) y por fecha de ensayo (1, 7, 14, 28, 56 y 90 días), es decir, 24 por combinación. Hay que decir que, como el número de ensayos a realizar no es el mismo en todas las fases del proyecto, el número aproximado de probetas varía.

Las probetas se compactaron a tres niveles: 1 MPa, 5 MPa y 10 MPa, siendo presiones relativamente bajas de compactación. Esta nueva propuesta, ya que la bibliografía empleada aconseja niveles de compactación mayores (mínimo 13 MPa), se debe a que uno de los objetivos de este proyecto es minimizar el gasto energético.

La mezcla preparada con el contenido óptimo de humedad (como se indica en el apartado anterior, ver 4.2.2.) se procesó con una biotrituradora, que aunque no preparada para esta función específicamente, dejaba la mezcla totalmente homogénea, triturando así los agregados que contenían mucha parte del agua de la mezcla.

A continuación, se procedió a la compactación estática de las muestras con la prensa multi-ensayos, con una velocidad de compactación de 0,05 (N/mm<sup>2</sup>)/s para las probetas compactadas a 1 MPa, y, 0,2 y 0,7(N/mm<sup>2</sup>)/s para las compactadas a 5 y a 10 MPa respectivamente. A fin de garantizar la uniformidad en cada una de las probetas de ensayo, se determinó previamente la densidad seca máxima de cada combinación según la norma UNE EN 772-13, obteniéndose de esta manera, probetas totalmente idénticas.

Una vez compactadas las probetas, se desmoldaron y se envolvieron con un film de plástico y un papel de aluminio. De esta manera, se evitaba una desecación prematura de las mismas y se aseguraba la disponibilidad de humedad en la probeta para un curado correcto. Cada una de las probetas se pesó y se clasificó para someterlas posteriormente a diferentes ensayos a distintas edades de curado: 1, 7, 14, 28, 56 y 90 días. El curado de estas probetas se realizó en el laboratorio a una temperatura media de 20°C.

Son probetas cilíndricas, compactas, macizas, sin cavidades ni oquedades, de 65 mm de diámetro y 30 mm de altura (foto 9).



**Foto 9. Tipología de probeta fabricada para ensayar en el laboratorio.**

El hecho de la elección de este diseño de la pieza constructiva se debe a varias razones: principalmente a su rapidez de fabricación, además de su fácil almacenamiento y la adecuación a los medios de los que se disponía en ese momento en el laboratorio de mecánica de suelos. Esta metodología de fabricación es totalmente adaptable a la manufactura industrial de este tipo de ladrillos eligiendo la forma más adecuada en función del uso final del mismo, según la normativa UNE EN 772-16. No obstante, avanzado el proyecto, el departamento de Proyectos e Ingeniería Rural (UPNA) dispuso al laboratorio de un molde nuevo para la realización de ladrillos convencionales. Por ello, al final del proyecto se realizó un muestrario de las combinaciones propuestas elaboradas con el molde nuevo.

## 4.2.4. ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

El objetivo de este ensayo es conocer las propiedades mecánicas en cuanto a resistencia a compresión simple (en MPa) de cada combinación estudiada. Para la



realización de este ensayo se ha utilizado una prensa multi-ensayo normalizada de 5 toneladas (foto 10) que va ejerciendo una carga continua sobre la muestra de  $0,1 \text{ (N/mm}^2\text{)/s}$  hasta completar la rotura de la misma tal y como dicta la norma UNE EN 772-1.

Se realizaron dos probetas idénticas por combinación a ensayar, con lo que el resultado final es la media aritmética de ambas dos.

Al mismo tiempo, como medida de control, cada una de las probetas se pesó antes de ser ensayada a compresión simple para ver así la posible pérdida de peso que sufrían desde el momento de fabricación hasta que

**Foto 10. Prensa multi-ensayo**

eran ensayadas a cada determinada edad de curado. Aplicando la ley de “*la conservación de la materia*” que promulgó A. Lorenzo Lavoiser (1743-1794), se deduce que la variación de peso que sufren las probetas durante el curado es debida a una pérdida de humedad por desecación. De esta manera se garantiza que los resultados obtenidos de resistencia son debidos al efecto cementante de los aditivos y no a una desecación elevada de las propias probetas.

#### 4.2.4. ENSAYO DE ABSORCIÓN

En primer lugar cabe destacar la importancia de realizar este exigente ensayo ya que aquellas combinaciones que lo superan tienen un valor añadido. Es más, este ensayo es realizado conforme dicta la norma UNE EN 772-11 para ladrillos convencionales puesto que de momento no hay normativa preparada para los ladrillos ecológicos. Además hay que tener en cuenta, que ninguna de las probetas sometidas a inmersión estaban protegidas con de ningún tipo de recubrimiento hidrófugo ni envolturas (foto 11).



**Foto 11. Bandejas de ensayo de las probetas a inmersión.**

Al realizar unas pruebas previas, se descartó la inmersión a 1 día ya que no es tiempo suficiente como para que las probetas endurezcan lo suficiente para aguantar 24 horas sumergidas en agua. Con lo cual, se sometieron al ensayo de absorción dos probetas por cada combinación, con un mínimo de 7 días de curado, a las siguientes edades: 7, 14, 28, 56 y 90 días.

Como el objetivo de este ensayo era analizar y valorar el porcentaje de absorción de agua que tienen las probetas, se controló el peso (sin envoltorio) antes y después del ensayo como indica la norma. Al final del ensayo, se sometieron todas las piezas a inspección ocular para determinar cualquier tipo de anomalía: probetas rajadas,

desconchadas, etcétera. Se determinó que para que una probeta superara el ensayo de absorción debía estar perfectamente, es decir, quedaban descartadas todas aquellas probetas que se encontraran semirotas o con desperfectos.

Por añadido, y con el fin de analizar las consecuencias que tiene la inmersión en agua durante 24 horas sobre las propiedades mecánicas de las probetas ensayadas, en la tercera y cuarta fase (fases en las que se incorporan los aditivos residuales), aquellas que superaban este ensayo se sometieron al ensayo de resistencia a compresión simple. Con ello, obtenemos unos resultados comparativos por combinaciones y edades ensayadas de la pérdida de resistencia de las mismas.

#### **4.2.5. ENSAYO DE HELADICIDAD**

Tal y como establece la norma UNE 67028 EX se sometieron dos probetas iguales por combinación a ciclos de hielo-deshielo para así caracterizar la durabilidad de las combinaciones ensayadas en condiciones extremas. Los ciclos se adaptaron a las capacidades técnicas y humanas disponibles en el laboratorio en el momento del ensayo.

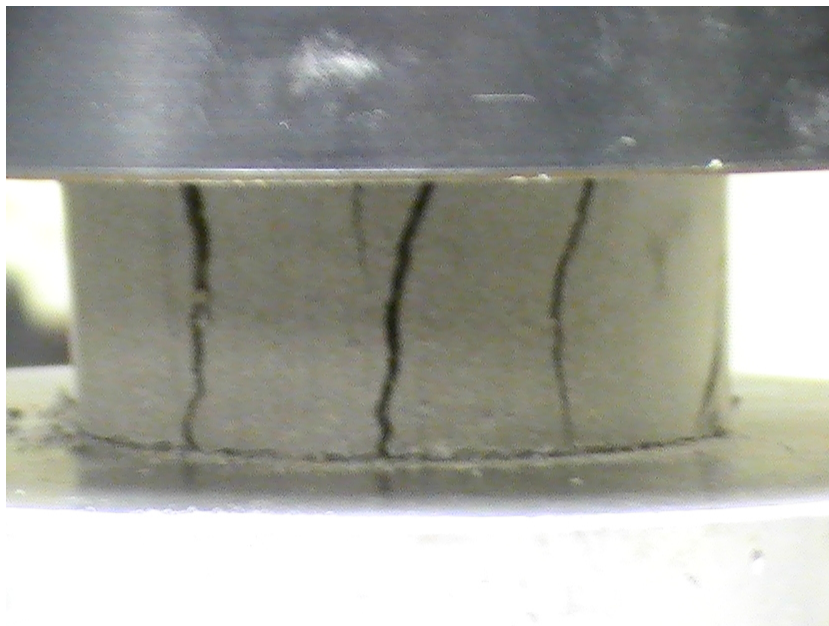
Las probetas ensayadas (pertenecientes a la fase II y IV del proyecto) se curaron previamente durante 7 días en las condiciones comentadas anteriormente. Antes de introducirse en la cámara, se eliminó el envoltorio de aluminio y se pesaron. Como excepción a esta metodología, cabe resaltar que las probetas con cemento de la fase II se ensayaron sin ningún tipo de envoltorio. No obstante, como se intuyó que la desecación era muy acelerada, para las futuras pruebas se decidió no eliminar el film de plástico para así obtener unos resultados más fiables.

Cada ciclo consta de 24 horas en el interior de una cámara frigorífica con circulación de aire a una temperatura de  $-15^{\circ}\text{C}$ , y de las siguientes 24 horas en una bandeja de deshielo a temperatura ambiente, en este caso a la temperatura del laboratorio de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

En total, salvo las probetas de la fase IV que debido a la fecha de inicio de la misma alcanzan los 21 ciclos, todas las combinaciones ensayadas a heladicidad se sometieron a 45 ciclos completos de hielo/deshielo.

Como medida de control para determinar la degradación sufrida durante el ensayo, todas las probetas fueron pesadas al inicio del ensayo y cada 7 días desde su comienzo. Al final de los 45 ciclos, se procedió a la inspección ocular de las mismas para comprobar los cambios superficiales que se habían podido producir a lo largo de los mismos.

Por último, y al igual que en el ensayo de absorción, todas las probetas fueron sometidas a compresión simple (foto 12) para poder determinar la variación de resistencia que se producía después de los ciclos de hielo-deshielo respecto a 90 días (fase II) y 28 días (fase IV) de curado en condiciones normales.



**Foto 12. Probeta en el momento de compresión tras el ensayo de heladicidad.**

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

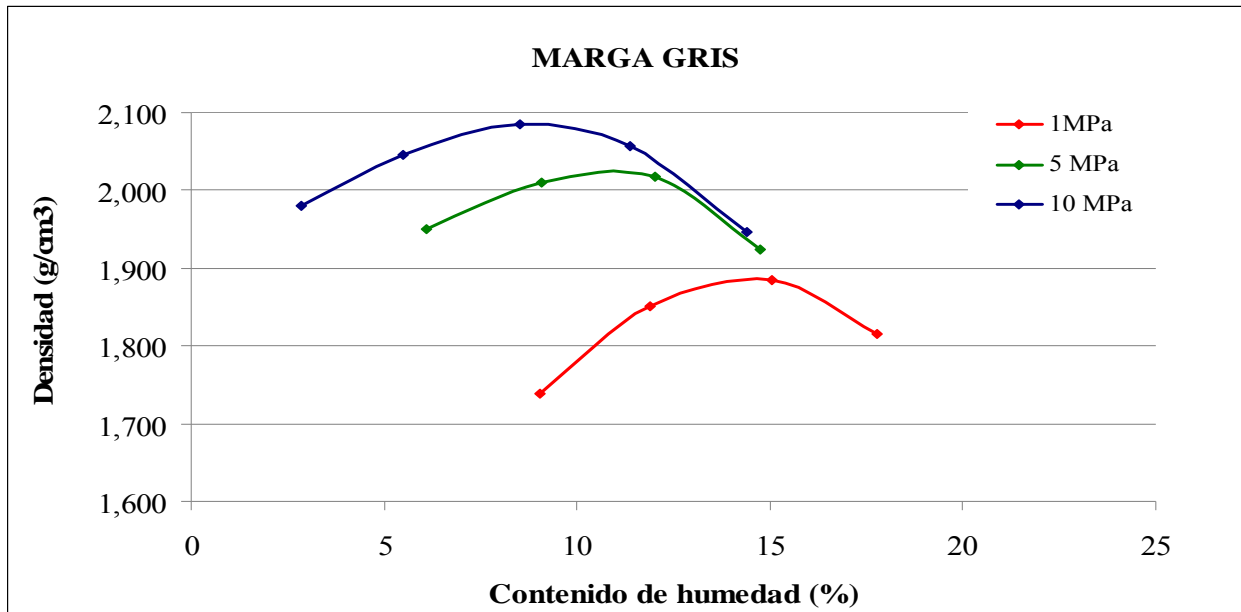
*A continuación se analizarán y valorarán los resultados obtenidos de los ensayos realizados en cada fase. En la primera fase se analizan básicamente los resultados obtenidos de humedad y densidad para que resulten óptimos para cada combinación propuesta. En la fase II, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión simple, inmersión y durabilidad frente al ensayo de heladicidad. Al mismo tiempo, se analizan las variaciones de peso que sufren las probetas (también en fase III y IV) y las pérdidas de resistencia que se producen por los ciclos de hielo/deshielo. En la tercera fase, se analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a resistencia a compresión simple e inmersión en agua, y la pérdida de resistencia que se produce tras inmersión. En la fase IV, se presentan los resultados referentes a los ladrillos definitivos relativos a los ensayos de resistencia, absorción y heladicidad. También se valoran las pérdidas de resistencia que se producen consecuencia de la inmersión en agua y de los ciclos de hielo/deshielo.*

## **5.1. FASE I**

### **EFFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO (COH) Y DE LA DENSIDAD SECA MÁXIMA (DSM):**

Las curvas humedad/densidad (H/D) que se muestran a continuación son fruto de la media aritmética de las 3 repeticiones realizadas por curva. Esto se debe a que se comprobó, que aun siguiendo exactamente el mismo procedimiento de preparación de la muestra, había una gran variabilidad de los datos obtenidos entre una curva y otra para una misma combinación.

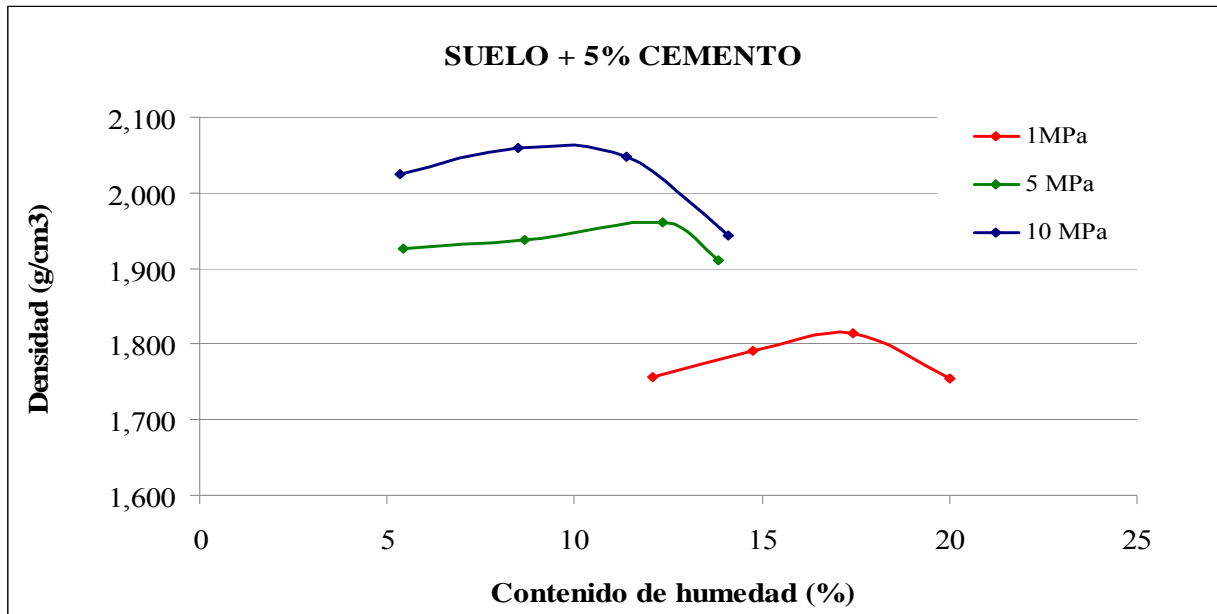




**Fig. 5. Curva H/D del suelo con respecto a tres niveles diferentes de compactación.**

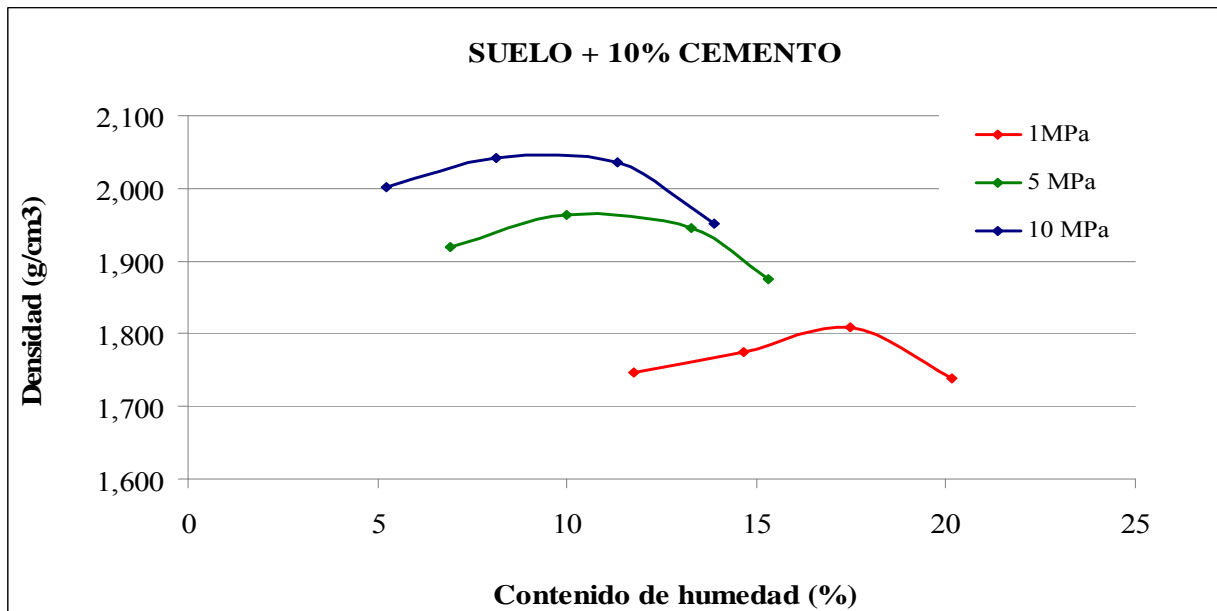
La figura 5 representa las curvas H/D obtenidas del suelo sin aditivo. Se observa como el contenido óptimo de humedad de la marga gris utilizada para la realización de este proyecto y su densidad seca máxima varía en función del nivel de presión utilizado en cada combinación. Así mismo, corresponde una humedad del 9% para una compactación de 10 MPa, del 11,20% para 5 MPa y del 14% para 1 MPa. La densidad seca máxima alcanzada con 10 MPa de presión es de  $2,087 \text{ g/cm}^3$ , con 5 MPa de  $2,023 \text{ g/cm}^3$ , y con 1 MPa de presión es de  $1,870 \text{ g/cm}^3$ .

A continuación se exponen los resultados medios obtenidos de la realización de las distintas **curvas de humedad-densidad del suelo con cemento Portland** (aditivo comercial empleado como referencia) conforme se ha aumentado el contenido del mismo, desde un 5% a un 20% de PC sobre masa de suelo seco (ver figuras 6, 7, 8 y 9).



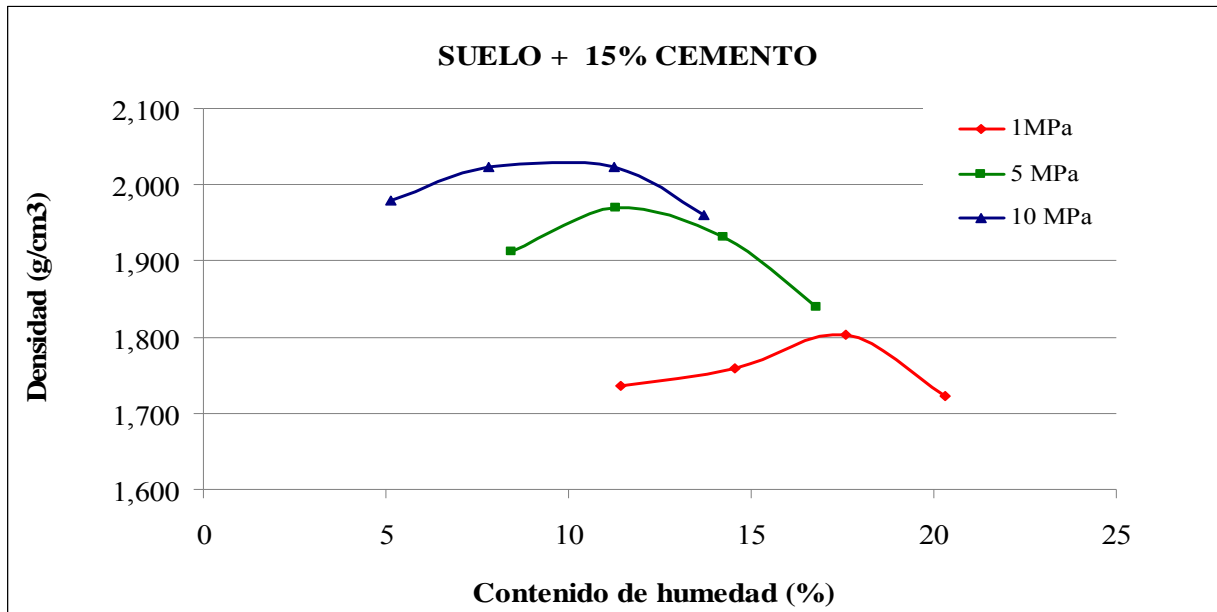
**Fig. 6. Curva H/D del suelo con un 5% de cemento a 1, 5 y 10 MPa de compactación.**

Los datos obtenidos para las curvas de la figura 6 son los siguientes: el contenido óptimo de humedad es del 9,25% para una compactación de 10 MPa, del 12% para 5 MPa y del 14,92% para 1 MPa. La densidad seca máxima alcanzada con 10 MPa de presión es de  $2,066 \text{ g/cm}^3$ , con 5 MPa de  $1,980 \text{ g/cm}^3$ , y con 1 MPa de presión es de  $1,814 \text{ g/cm}^3$ .



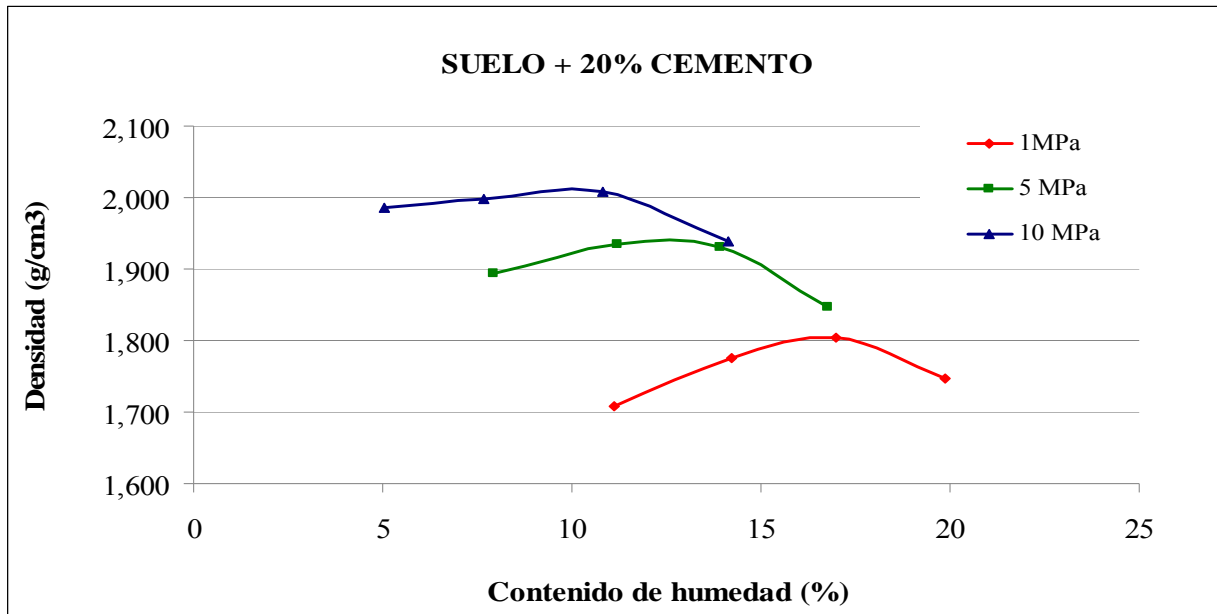
**Fig. 7. Curva H/D del suelo con un 10% de cemento a 1, 5 y 10 MPa de compactación.**

Las curvas correspondientes al suelo con 10% de PC (figura 7) nos indican lo siguiente: el contenido óptimo de humedad es del 9,61% para una compactación de 10 MPa, 12,17% de humedad para 5 MPa y del 15,79% para 1 MPa. La densidad seca máxima alcanzada con 10 MPa de presión es de 2,048 g/cm<sup>3</sup>, con 5 MPa de 1,974 g/cm<sup>3</sup>, y con 1 MPa de presión es de 1,809 g/cm<sup>3</sup>.



**Fig. 8. Curva H/D del suelo con un 15% de cemento a 1, 5 y 10 MPa de compactación.**

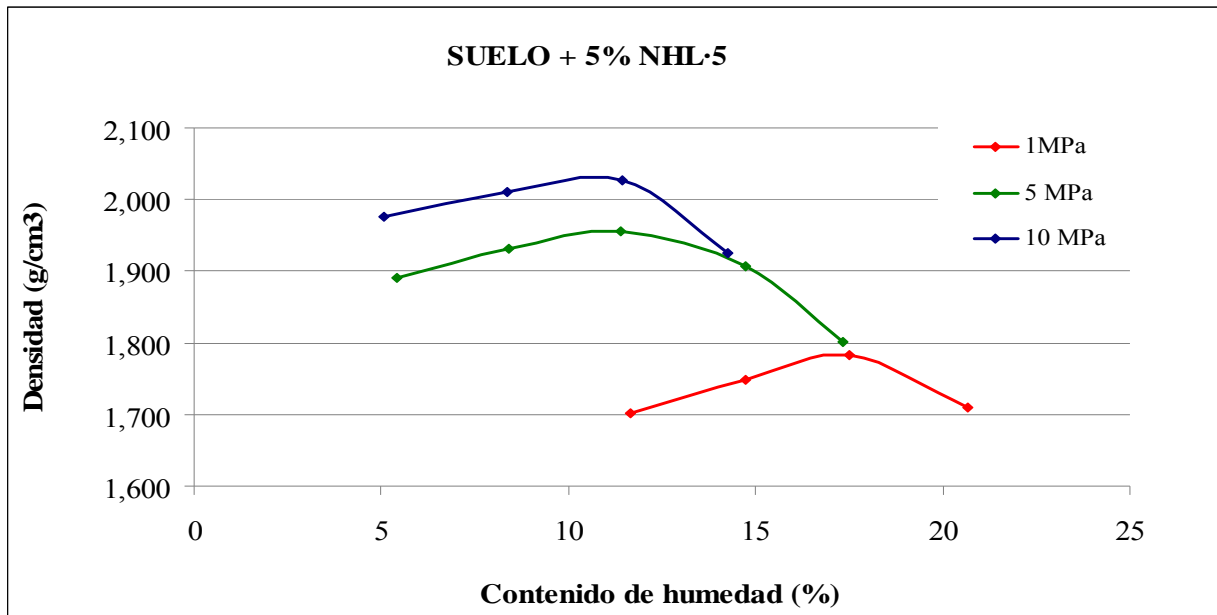
La figura 8 muestra las curvas humedad-densidad del suelo con un 15% de PC. De ahí se obtienen: el contenido de humedad óptimo para cada nivel de compactación, sea de 9,95% para 10 MPa, 12,56% para 5 MPa y 16,85% para 1 MPa; y la densidad seca máxima: 2,030 g/cm<sup>3</sup>, 1,969 g/cm<sup>3</sup>, y 1,803 g/cm<sup>3</sup> para 10, 5 y 1 MPa respectivamente.



**Fig. 9. Curva H/D del suelo con un 20% de cemento a 1, 5 y 10 MPa de compactación.**

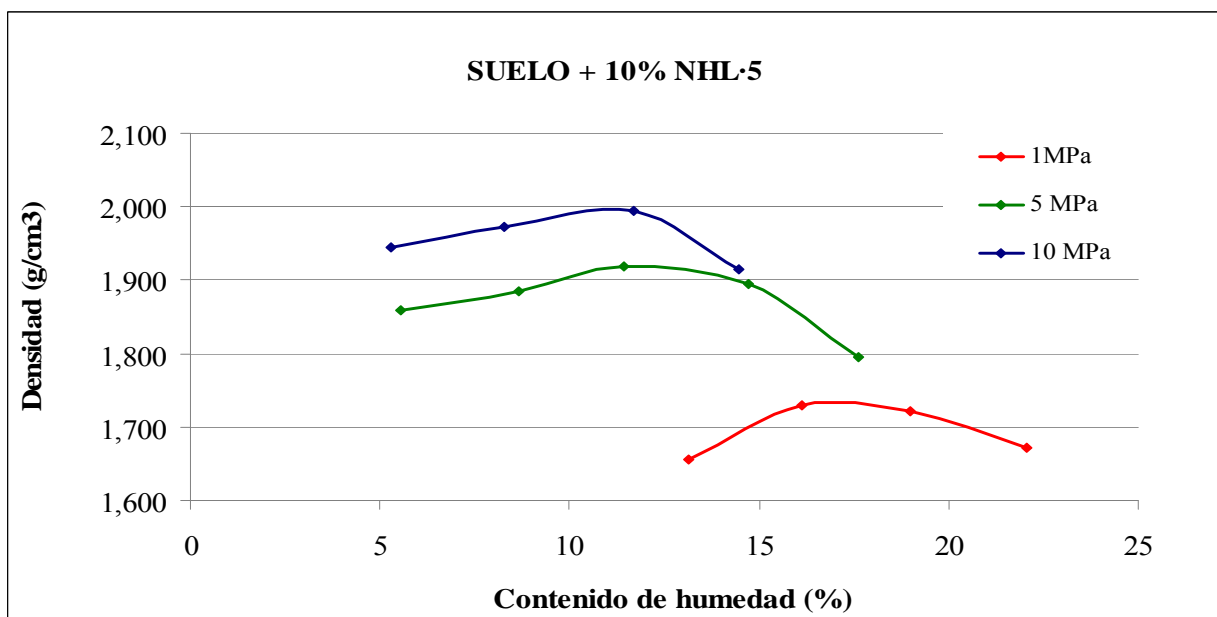
Los datos obtenidos para las curvas de la figura 9 son los siguientes: el contenido óptimo de humedad es del 10,25% para una compactación de 10 MPa, del 12,90% para 5 MPa y del 17,40% para 1 MPa. La densidad seca máxima alcanzada con 10 MPa de presión es de  $2,009 \text{ g/cm}^3$ , con 5 MPa de  $1,945 \text{ g/cm}^3$ , y con 1 MPa de presión es de  $1,800 \text{ g/cm}^3$ .

Seguidamente, se exponen los resultados medios obtenidos de la realización de las distintas **curvas de humedad-densidad de suelo con la cal hidráulica** como aditivo comercial, conforme ha sido aumentado el contenido de la misma, desde un 5% de NHL·5 a un 20% sobre masa de suelo seco (figuras 10, 11, 12 y 13).



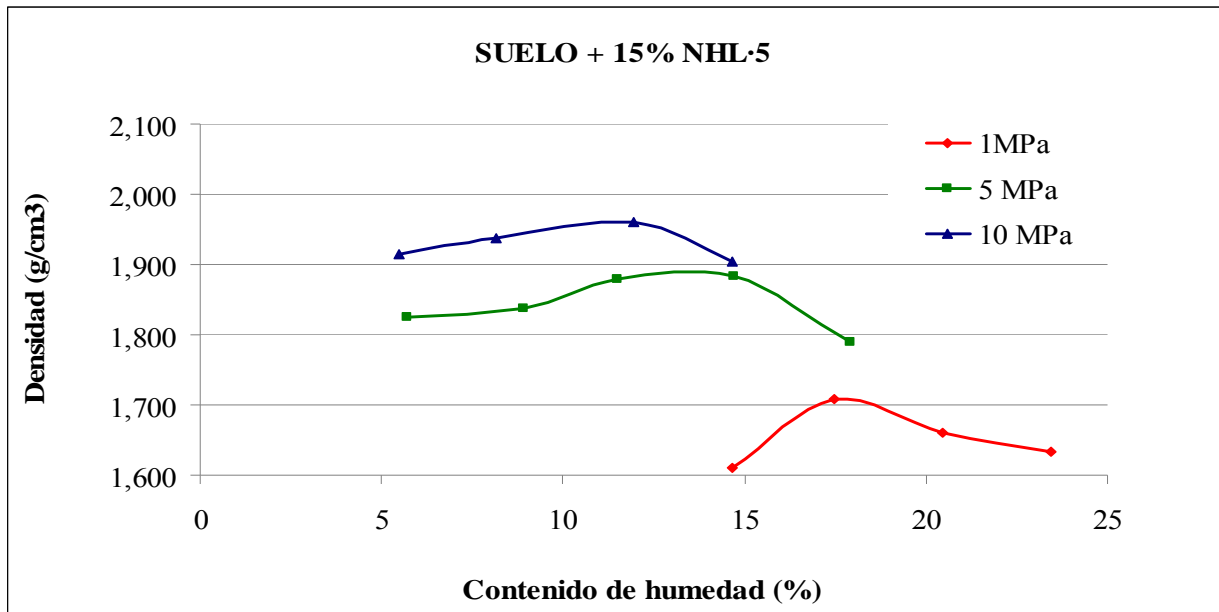
**Fig. 10. Curva H/D del suelo con un 5% de cal hidráulica a 1, 5 y 10 MPa de compactación.**

Las curvas correspondientes al suelo con un 5% de NHL-5 (figura 10) nos reflejan lo siguiente: el contenido óptimo de humedad es del 10,20% para una compactación de 10 MPa, del 11,90% para 5 MPa y del 15,07% para 1 MPa. La densidad seca máxima alcanzada con 10 MPa de presión es de  $2,040 \text{ g/cm}^3$ , con 5 MPa de  $1,960 \text{ g/cm}^3$ , y con 1 MPa de presión es de  $1,785 \text{ g/cm}^3$ .



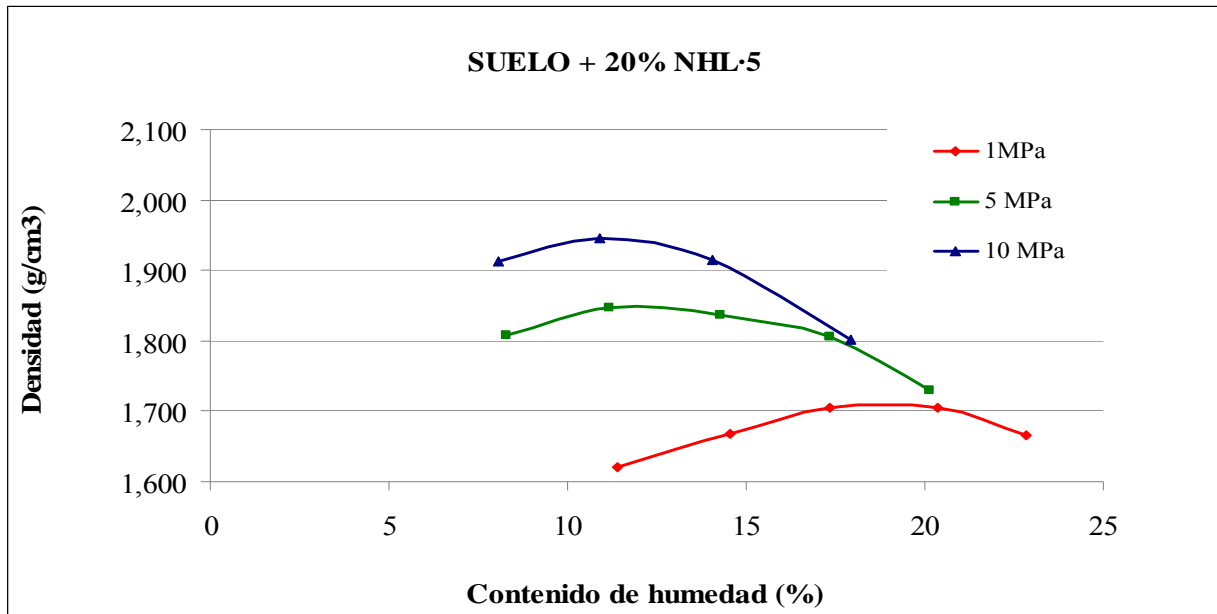
**Fig. 11. Curva H/D del suelo con un 10% de cal hidráulica a 1, 5 y 10 MPa de compactación.**

Para las curvas H/D de la figura 11 el contenido óptimo de humedad para 1, 5 y 10 MPa de compactación, es del 10,34%, 12,54% y 16,03% respectivamente; y la densidad seca máxima es de 1,998 g/cm<sup>3</sup> a 10 MPa, 1,918 g/cm<sup>3</sup> a 5 MPa, y 1,737 g/cm<sup>3</sup> a 1 MPa.



**Fig. 12. Curva H/D del suelo con un 15% de cal hidráulica a 1, 5 y 10 MPa de compactación.**

Las curvas correspondientes al suelo con un 15% de NHL-5 (figura 12) indican que el contenido óptimo de humedad es del 10,87% para una compactación de 10 MPa, del 13,40% para 5 MPa y del 17,45% para 1 MPa. La densidad seca máxima alcanzada con 10 MPa de presión es de 1,965 g/cm<sup>3</sup>, con 5 MPa de 1,885 g/cm<sup>3</sup>, y con 1 MPa de presión es de 1,712 g/cm<sup>3</sup>.



**Fig. 13. Curva H/D del suelo con un 20% de cal hidráulica a 1, 5 y 10 MPa de compactación.**

La figura 13 muestra las curvas humedad-densidad del suelo con un 20% de cal hidráulica. De ahí se obtienen: el contenido de humedad óptimo para cada nivel de compactación, sea 11,30% para 10 MPa, 13,67% para 5 MPa y 17,60% para 1 MPa; y la densidad seca máxima: 1,948 g/cm<sup>3</sup>, 1,850 g/cm<sup>3</sup>, y 1,708 g/cm<sup>3</sup> para 10, 5 y 1 MPa respectivamente.

## DISCUSIÓN FASE I

A continuación se procede a realizar el análisis de los resultados mostrados anteriormente (figuras 5-13):

Como se observa en las gráficas, todas las curvas humedad-densidad, tanto del suelo sin aditivos como con el cemento o la cal hidráulica, siguen un mismo patrón de comportamiento a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo utilizado: se desplazan de manera gradual hacia abajo, descendiendo la densidad alcanzada, y hacia la derecha, aumentando el contenido óptimo de humedad. Estos resultados son los esperados ya que cuanto mayor es el porcentaje de aditivo añadido a la mezcla, la cantidad de agua requerida es mayor puesto que los mismos aditivos también absorben parte del agua de la mezcla total. Al mismo tiempo, conforme se añade más aditivo, teniendo éstos una menor densidad que el suelo, la densidad de la mezcla disminuye gradualmente. Y se acentúan

más estos desplazamientos conforme la curva referida es la realizada a 1 MPa. Es decir, conforme el nivel de compactación es menor, la curva se desplaza más hacia abajo y hacia la derecha.

De la misma manera, se ha comprobado que los resultados obtenidos son fiables ya que, y según la teoría, la diferencia de presiones a la hora de compactar un material se debe reflejar en las curvas H/D de manera que entre las caídas de las mismas se cree una asíntota, como así se muestra en las gráficas elaboradas. Como se refleja en estas, la fuerza de compactación utilizada es determinante: cuanta menor es la presión de compactación utilizada, mayor es el requerimiento de agua y menor la densidad seca máxima alcanzada.

Por tanto, el mayor requerimiento de agua se produce conforme el nivel de compactación es menor y el porcentaje de aditivo añadido mayor. Esta conclusión va a ser determinante para futuras decisiones. Por este motivo, las combinaciones con mayor porcentaje de aditivo (15% y 20%) compactadas a 1 MPa tendrán que ser descartadas ya que las necesidades de agua de dichas mezclas son excesivamente elevadas. No hay que olvidar que este proyecto parte de unos criterios sostenibles, y aunque interesa el menor gasto energético posible (1 MPa) no va a ser a costa de un gasto excesivo de agua como requiere la compactación a 1 MPa.

Por otro lado, es necesario reparar en la diferencia, apenas existente, entre los resultados obtenidos con la cal hidráulica con su homólogo de referencia el cemento Portland. De ellos se concluye que la cal hidráulica es un aditivo que requiere mayor cantidad de agua que el cemento, aproximadamente un 0,9% más de agua a 10 MPa, un 0,5 % más que el cemento a 5 MPa y un 0,3% más a 1 MPa. En cuanto a las diferencias en la densidad seca máxima, la cal hidráulica alcanza menos  $0,100 \text{ g/cm}^3$  de densidad que el cemento, siendo mayor la diferencia conforme el porcentaje de aditivo es mayor y el nivel de compactación menor. Esto es debido a que la cal tiene menor densidad aparente que el cemento.

Por último, cabe destacar que la diferencia existente en la densidad de compactación hace que se observen las tres curvas, correspondientes a 10, 5 y 1 MPa, a distintos niveles en la gráfica siendo menor la diferencia entre 10 y 5 MPa que entre éstas y 1 MPa. Como



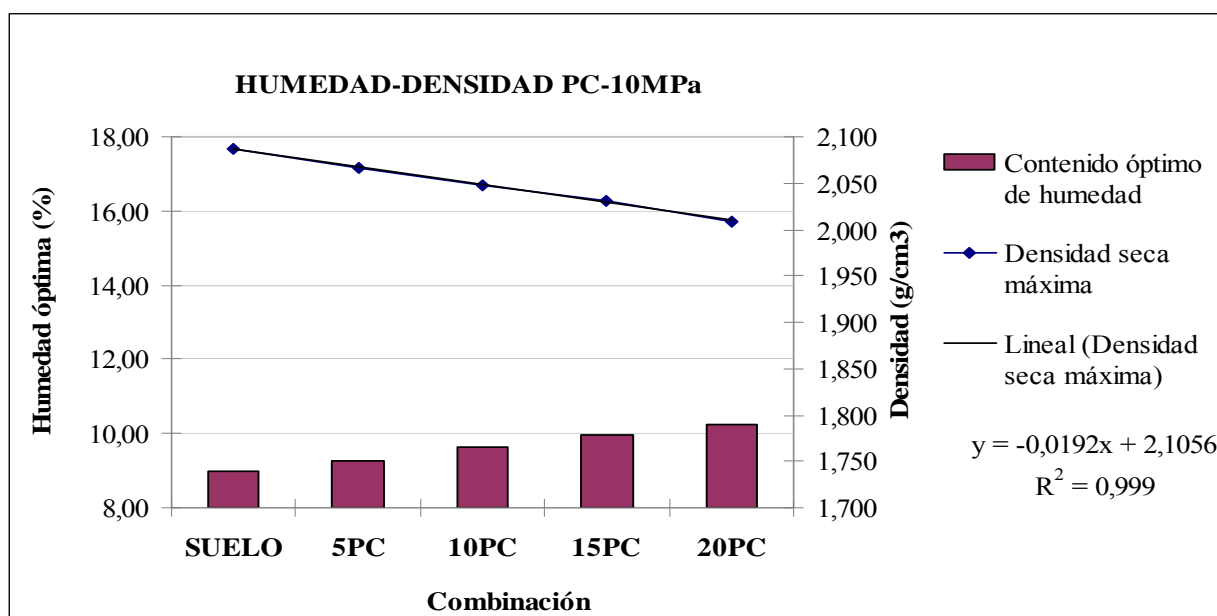
ejemplo nos podemos referir a la gráfica del suelo solo: entre 5 y 10 MPa las diferencias de DSM son del 3,1%, y entre la curva a 5 MPa y a 1 MPa es del 7,6%; en todos los demás casos igualmente, como mínimo, se duplica la diferencia. En referencia al COH entre curvas, éste apenas difiere, registrándose unas diferencias entre curvas en el caso del suelo solo del 2,2% entre 10 y 5 MPa, y del 2,8% entre 5 y 1 MPa.

Estos primeros resultados son de gran importancia ya que serán la base para la realización de los siguientes pasos de la campaña establecida puesto que las reacciones puzolánicas se desarrollarán mejor cuando el porcentaje de agua a añadir sea el óptimo de la mezcla. Resaltar también, que tan exhaustiva caracterización del suelo y del resto de combinaciones será útil y extrapolable para futuros ensayos, investigaciones o puestas en obras que trabajen con esta marga gris.

A continuación se muestran las relaciones obtenidas de humedad óptima y densidad para cada combinación estudiada. En primer lugar las realizadas a 10 MPa, seguidamente las correspondientes a 5 MPa, y las dos últimas gráficas corresponden a las combinaciones realizadas a 1 MPa. Se presentan dos gráficas por nivel de compactación: la primera en relación al cemento Portland y la segunda referente a la cal hidráulica.

#### Combinaciones realizadas a 10 MPa:

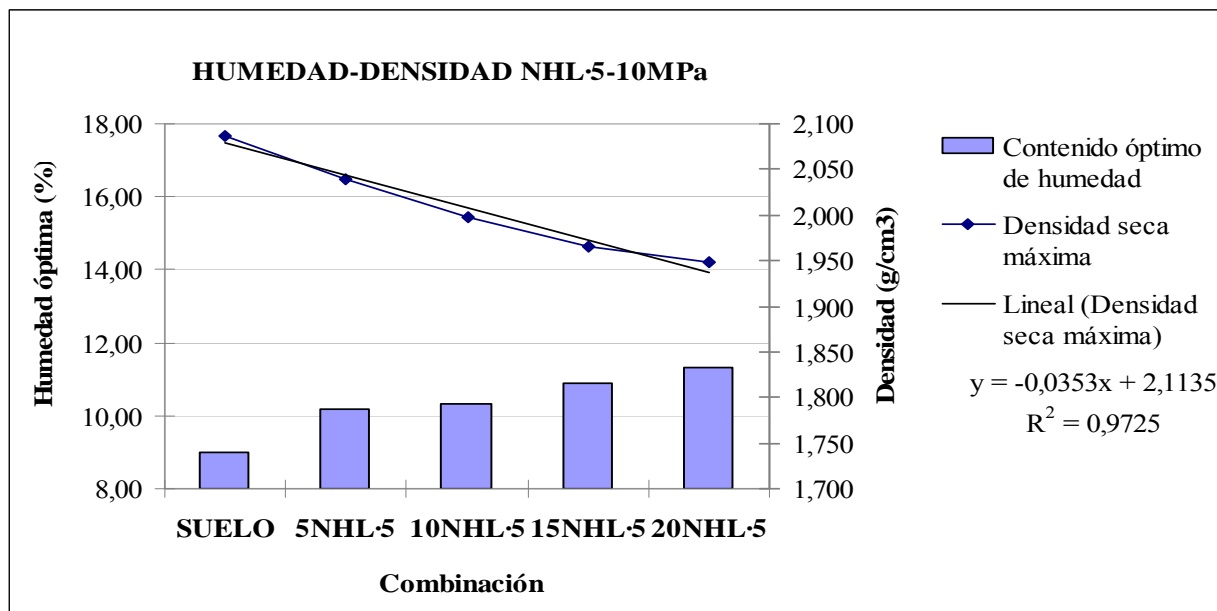
Los resultados obtenidos para las combinaciones de cemento y cal hidráulica a 10 MPa siguen, en líneas generales, una misma tendencia ya comentada anteriormente: según se aumenta el porcentaje de aditivo en cada combinación, existe una tendencia creciente respecto al contenido óptimo de humedad (COH) y decreciente en cuanto a la densidad (DSM). Ambas gráficas (figuras 14 y 15), consiguen una línea de tendencia perfectamente ajustada a los resultados, validando así los mismos.



**Fig. 14. Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de las combinaciones de cemento realizadas a 10 MPa.**

La relación media entre el porcentaje de humedad óptimo y el contenido de aditivo añadido, es de 0,33% más de agua por cada porcentaje añadido de cemento en las combinaciones realizadas a 10 MPa. Se puede observar como la densidad de cada combinación desciende una media de 0,019 g/cm<sup>3</sup> según el contenido del cemento en la

mezcla es mayor. Cabe destacar que la línea de tendencia se ajusta perfectamente a los resultados obtenidos de densidad ( $R^2=0,99$ ).



**Fig. 15. Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de las combinaciones de cal hidráulica realizadas a 10 MPa.**

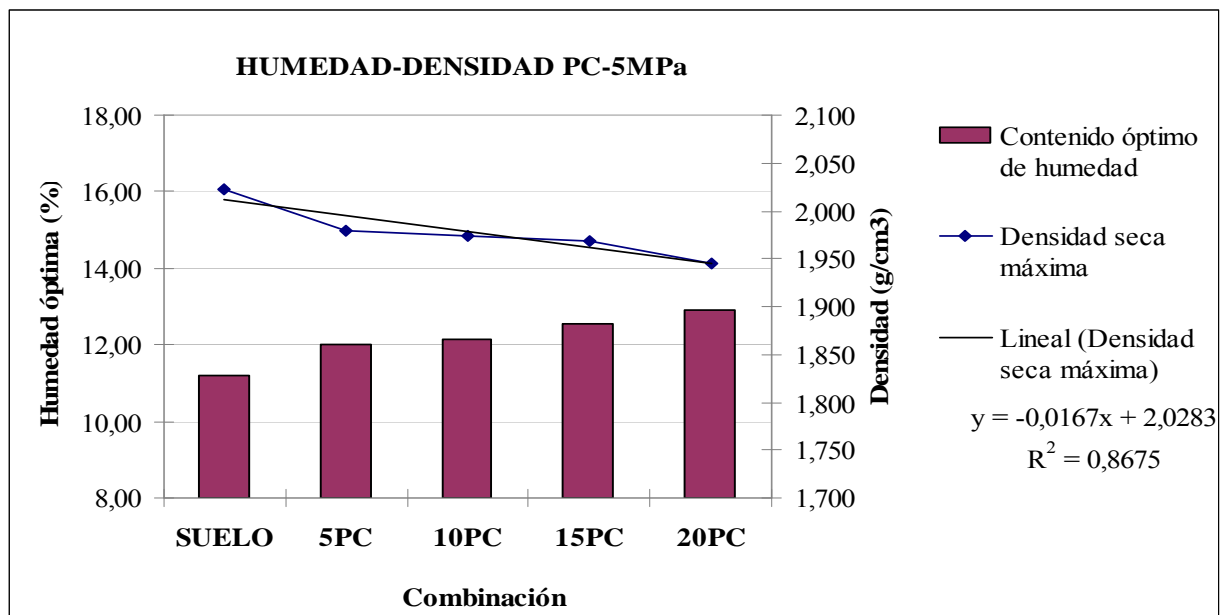
Con respecto a las combinaciones de cal hidráulica realizadas a 10 MPa, la relación entre el contenido de agua y el aditivo entre el 10 y el 20% del mismo, es de 0,48% más de agua por cada porcentaje añadido de NHL-5, exceptuando que entre el 5 y el 10% de aditivo, el porcentaje de humedad óptima varía ligeramente, tan solo un 0,14%. En cuanto a la densidad, el ajuste de la recta sigue siendo muy bueno en relación a los resultados obtenidos ( $R^2=0,97$ ), y desciende  $0,01 \text{ g/cm}^3$  menos conforme se va incrementando la cantidad de aditivo a la mezcla.

Cabe destacar que la pendiente de la densidad de la cal hidráulica es prácticamente el doble que la correspondiente al cemento. Además la cal hidráulica alcanza densidades más bajas que el cemento, y las diferencias entre ambos aditivos son mayores conforme el porcentaje de aditivo es mayor. Estas diferencias varían entre un 1% menos de densidad del 5% de NHL-5 que 5PC-10, al 3% menos de densidad para las combinaciones con 20% de aditivo. Al mismo tiempo, la cal hidráulica requiere, de media, 0,9% más de agua que el cemento para alcanzar el contenido óptimo de humedad para cada combinación. Esto se

debe a que, a pesar de que las propiedades de ambos aditivos son similares, la NHL·5 es un aditivo que requiere más humedad que el PC y como ya hemos visto, menos denso.

### Combinaciones realizadas a 5 MPa:

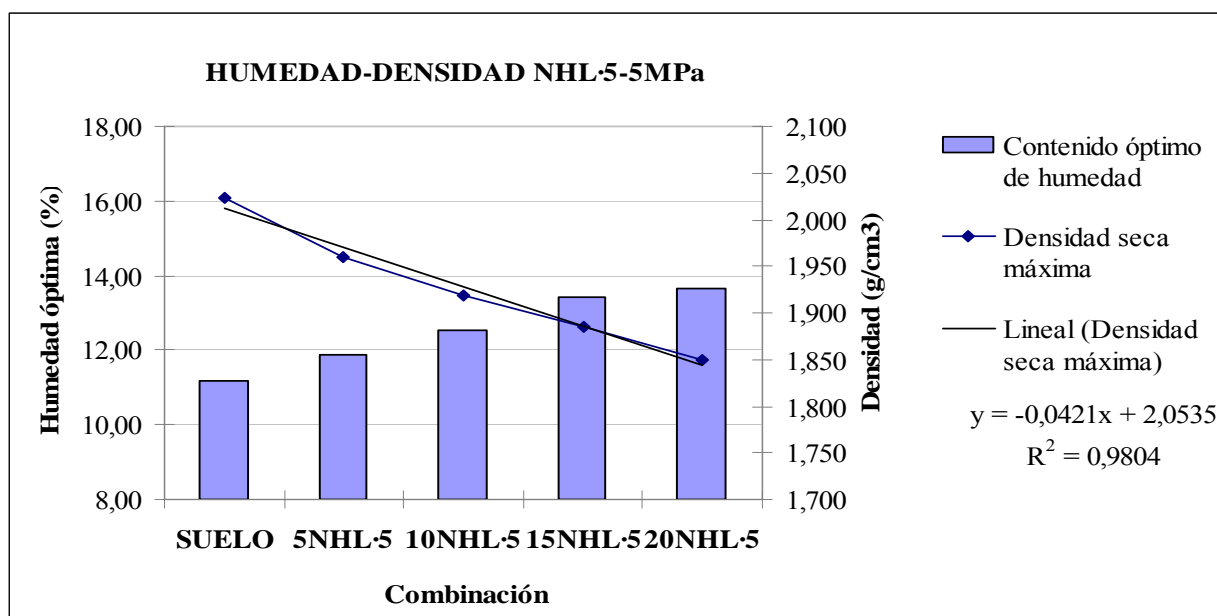
Al igual que los resultados obtenidos de las combinaciones realizadas a 10 MPa, la tendencia seguida del cemento y la cal hidráulica a 5 MPa refleja que conforme se aumenta el porcentaje de aditivo en cada combinación, existe una tendencia creciente respecto al contenido óptimo de humedad (COH) y decreciente en cuanto a la densidad (DSM). Estas tendencias, como veremos a continuación (figuras 16 y 17), no son igual de acentuadas en ambos aditivos estudiados.



**Fig. 16. Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de las combinaciones de cemento realizadas a 5 MPa.**

De la gráfica anterior se concluye lo siguiente: por cada porcentaje añadido de cemento se añade un 0,3% más de agua en las combinaciones realizadas del mismo a 5 MPa. En cuanto a la densidad, ésta apenas desciende entre el 5% y el 15% de aditivo añadido: disminuye  $0,006 \text{ g/cm}^3$  según el contenido del cemento en la mezcla es mayor. En cambio, hay que destacar un descenso de  $0,024 \text{ g/cm}^3$  entre el 15 y el 20% de PC

añadido, lo que supone una diferencia entre ambos de 1,2%. Debido a estas fluctuaciones de la densidad, que pueden ser debidas al bajo nivel de presión utilizado, y aunque la línea de tendencia se ajusta correctamente a los resultados obtenidos ( $R^2=0,87$ ), el ajuste es peor que en los casos anteriores.



**Fig. 17. Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de las combinaciones de cal hidráulica realizadas a 5 MPa.**

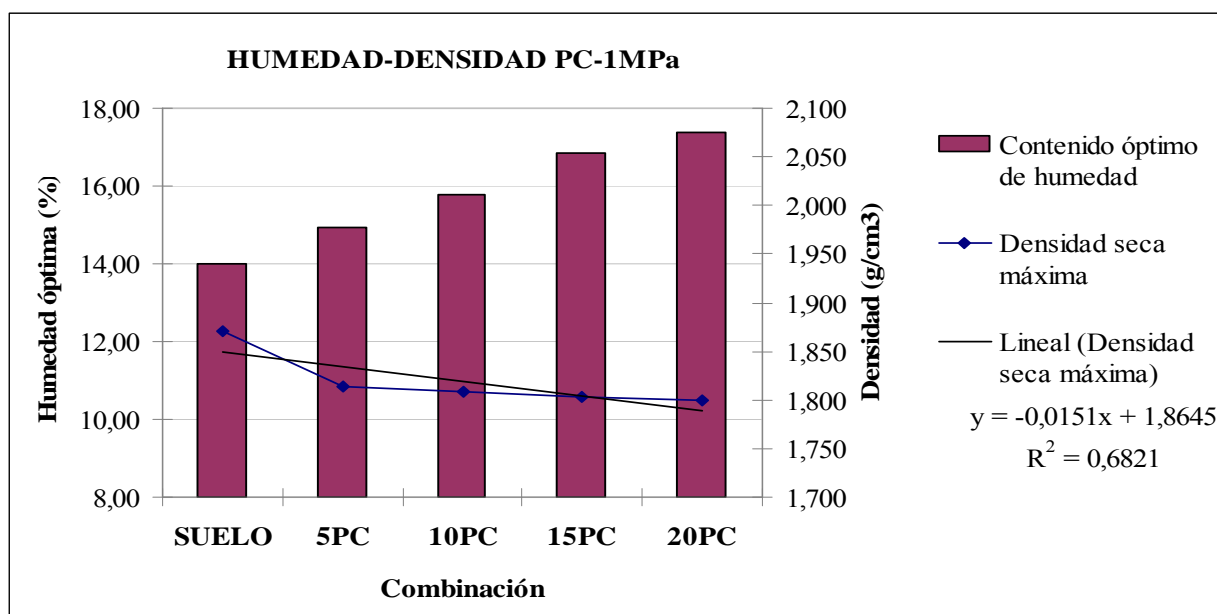
Las combinaciones realizadas con cal hidráulica a 5 MPa presentan una relación entre el contenido óptimo de agua y el aditivo de 0,75% más de agua por cada porcentaje añadido de NHL·5 hasta la combinación del 15%. Entre el 15 y el 20% de cal añadida, se aprecia que el incremento de la necesidad de agua para alcanzar el contenido óptimo es menor: tan solo se produce un incremento del 0,27% de adición de humedad con respecto a la anterior combinación. Con respecto a la densidad, la línea de tendencia se ajusta perfectamente a los resultados obtenidos ( $R^2=0,98$ ). Según el porcentaje añadido de cal hidráulica es mayor, la densidad desciende una media de  $0,037 \text{ g/cm}^3$  por cada combinación.

De la comparación de los resultados obtenidos de las combinaciones de ambos aditivos a 5 MPa se concluye que, en general, conforme aumenta el porcentaje de aditivo empleado, el incremento de necesidad de agua es el doble, en la mayoría de las mezclas,

en el caso de la cal hidráulica que en el cemento. En cuanto a los requerimientos de agua para alcanzar el COH a 5 MPa, la cal demanda de media un 0,65% más de agua que el cemento. Además, al igual que en las combinaciones a 10 MPa, la pendiente de la densidad de la cal hidráulica es el doble que la del cemento. Así mismo, las densidades alcanzadas por la cal son gradualmente menores que las del cemento conforme el porcentaje añadido es mayor, existiendo una diferencia de entre el 1 y el 5%.

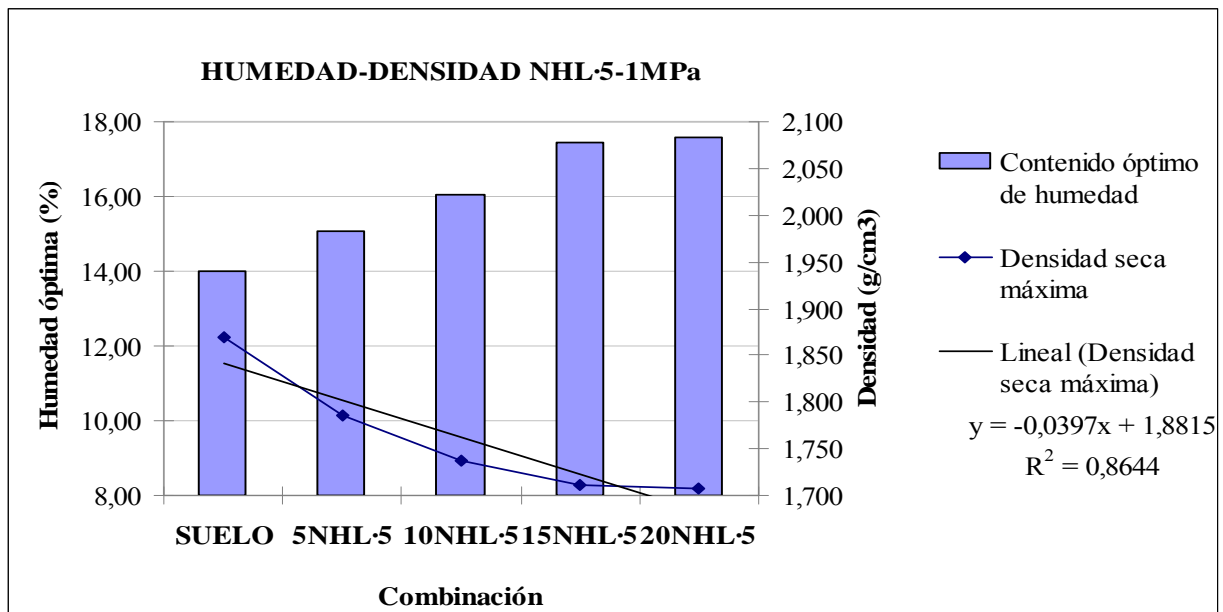
#### Combinaciones realizadas a 1 MPa:

A continuación se observa que el porcentaje de agua necesario para alcanzar el contenido óptimo de humedad, es claramente mayor en comparación con los resultados obtenidos de las combinaciones anteriores realizadas a 10 y a 5 MPa. La tendencia con respecto al COH sigue siendo la misma: conforme la cantidad de aditivo es mayor, el incremento de agua va en aumento. En cuanto a la densidad, cabe destacar que las densidades alcanzadas para ambos casos (figuras 18 y 19) son notoriamente menores que los casos anteriores (10 y 5 MPa). La tendencia de la densidad, aunque sigue disminuyendo conforme el porcentaje de aditivo empleado es mayor, manifiesta que el comportamiento entre el PC y la NHL·5 difiere entre sí.



**Fig. 18. Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de las combinaciones de cemento realizadas a 1 MPa.**

La diferencia porcentual existente en las combinaciones realizadas a 1 MPa entre diferentes porcentajes de aditivos y el contenido de agua necesario para alcanzar el COH, es de 0,83% más de agua por cada porcentaje añadido de cemento. La densidad descende una media de 0,005 g/cm<sup>3</sup> por cada combinación, es decir, prácticamente permanece constante ante la adición de más aditivo. Lo cual pone de manifiesto que la densidad apenas varía con el incremento de aditivo utilizado ya que el nivel de compactación empleado, 1 MPa, es insuficiente para alcanzar densidades mayores.



**Fig. 19. Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de las combinaciones de cal hidráulica realizadas a 1 MPa.**

Los resultados obtenidos para las combinaciones de cal hidráulica a 1 MPa, reflejan un incremento del 1,19% más de agua conforme se añade hasta un 15% de aditivo. En cambio, entre el 15 y el 20% de cal hidráulica añadida a la combinación, la diferencia es mínima: tan solo un 0,15% más de humedad necesaria para alcanzar el contenido óptimo de humedad. Con respecto a los datos de densidad, ésta descende aproximadamente un 1% en cada porcentaje de aditivo desde el 5 al 20% de NHL-5 añadido a la mezcla.

Las necesidades de agua de la cal hidráulica a 1 MPa son un 0,3% mayores que las de las combinaciones de cemento, no siendo diferencias significativas en cuanto al COH entre ambos aditivos. Por contra, en los datos referidos a la densidad, ésta apenas varía

conforme se añade más aditivo en el caso del cemento pero para la cal hidráulica desciende de forma gradual. Esto vuelve a reiterar, como igualmente se ha visto en las combinaciones a 5 MPa, que a bajos niveles de presión, la densidad alcanzada por el cemento es prácticamente invariable en función del porcentaje de aditivo empleado. Aún así, las densidades alcanzadas por las combinaciones de PC a 1 MPa son mayores, aproximadamente un 0,8% mayores que la NHL-5. En cuanto a los requerimientos de agua para alcanzar el óptimo de humedad para la mezcla, la diferencia supone un incremento de agua de más del 3,3% para el cemento y 3,7% para la cal que lo necesitado para las mismas combinaciones a 5 MPa.

Consecuencia derivada de la realización de los ensayos para obtener los parámetros de humedad/densidad, se han desechado todas las combinaciones realizadas a 1 MPa ya que la estructura de las probetas compactadas a este nivel de presión se ha considerado abierta y con numerosas cavidades (foto 13).



**Foto 13. Probeta compactada a 1 MPa.**

Por tanto, se ha descartado la realización de los ladrillos a 1 MPa por ser un nivel de compactación insuficiente para garantizar la cohesión de las partículas y el buen desarrollo de las reacciones puzolánicas. Además, las piezas constructivas con una estructura tan abierta son muy vulnerables a los agentes erosivos: hielo, viento. No obstante, con posterioridad se realizó el ensayo de absorción para constatar la idea que a menos compactación de las probetas superan mejor la inmersión en agua.

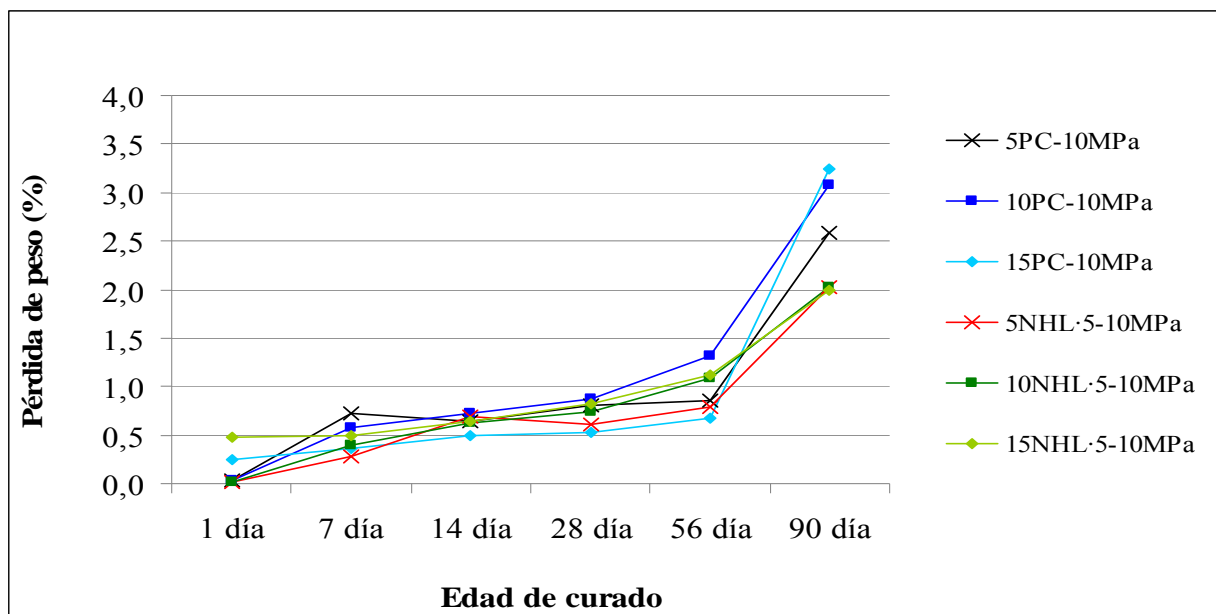


## 5.2. FASE II

En esta fase se ensayan las combinaciones con un 5, 10 y 15% de aditivo comercial por ser las mezclas que menor cantidad de aditivo requieren. Se realizarán a 5 y a 10 MPa para poder comparar si las diferencias entre ambos niveles de presión son significativas y qué beneficios reportan una u otra compactación. Como se ha comentado en la fase anterior, la realización de los ladrillos a 1 MPa queda descartada por las razones ya comentadas. No obstante, se han realizado los ensayos de absorción de las combinaciones que se habían realizado en la fase I a 1 MPa.

### VARIACIÓN DEL PESO CONFORME AVANZA LA EDAD DE CURADO

A continuación se presentan las variaciones de peso que se han registrado en las probetas que van a ser sometidas al ensayo de compresión simple. Se han comprobado las pérdidas de peso sufridas por todas las combinaciones ensayadas en esta fase a 10 y a 5 MPa, y a todas las edades estipuladas para realizar ensayo: 1, 7, 14, 28, 56, y 90 días.

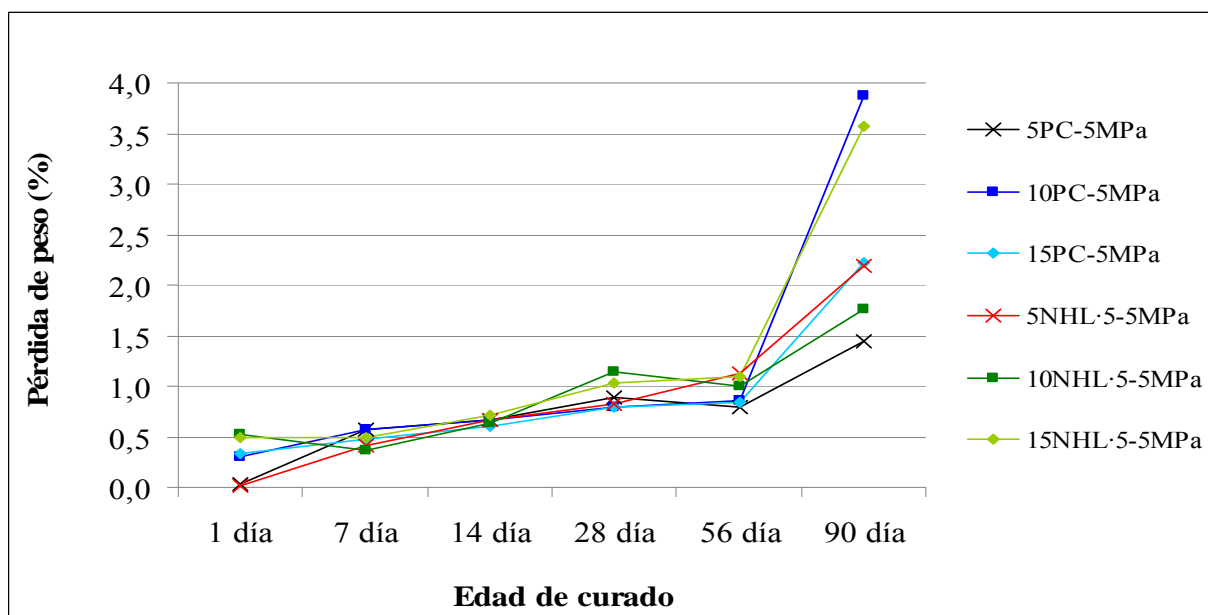


**Fig. 20. Variación del peso de las probetas de las combinaciones con 5%, 10% y 15% de cemento y cal hidráulica a 10 MPa conforme avanza el tiempo de curado.**

Las variaciones de peso producidas son similares para todas las combinaciones, esta similitud se debe a que la envoltura ha sido igual para todas ellas. A 1 día, ninguna combinación sufre pérdidas de peso exceptuando las combinaciones que utilizan un 15% de aditivo tanto de PC como de NHL·5. Hay que destacar (figura 20), que entre el día 7 y el 56, la pérdida de peso se mantiene prácticamente constante, no así a 90 días que la pérdida aumenta el doble de lo producido en edades anteriores.

Hasta los 56 días, las pérdidas de peso no superan el 1,5% y el 1% en las combinaciones de cemento y cal hidráulica respectivamente; y a los 90 días, alcanzan unas pérdidas de peso de hasta un 3% en las mezclas realizadas con cemento y hasta un 2% en las de cal hidráulica. La diferencia tan elevada de pérdida de peso a los 90 días, se debe a que el sellado de esas probetas se había dañado por la manipulación de las piezas contiguas. Causa muy probable de que no se hayan obtenido, como se verá más adelante, los resultados esperados a compresión simple a 90 días. No obstante, hasta 56 días las pérdidas de peso resultantes son propias del avance de la edad de curado y no afectan a los valores de resistencia alcanzados.

Por otra parte señalar, que las probetas de cal hidráulica pierden, en todas las combinaciones a 10 MPa, menos peso que las de cemento y menor aún la mezcla con un 5% de NHL·5. Y, aunque las combinaciones de cal hidráulica siguen un comportamiento esperado y lógico, las de cemento, entre sí, no guardan relación ninguna, siendo independiente la pérdida de peso que sufren del contenido de PC empleado en cada combinación.



**Fig. 21. Variación del peso de las probetas de las combinaciones con 5%, 10% y 15% de cemento y cal hidráulica a 5 MPa conforme avanza el tiempo de curado.**

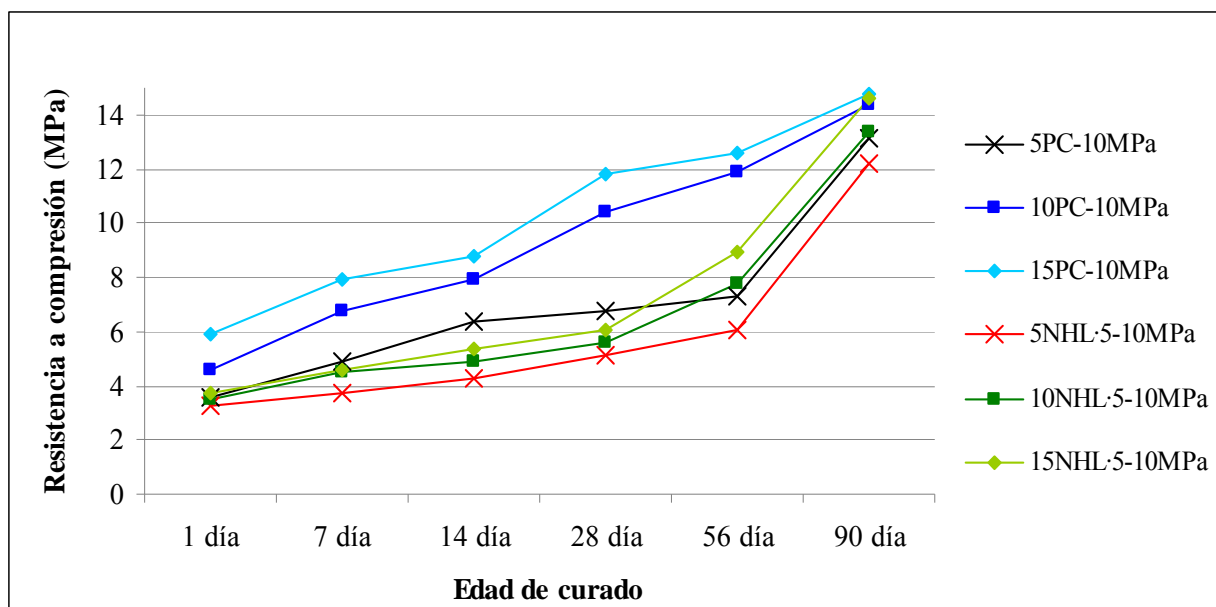
En el caso de las combinaciones de PC y NHL-5 realizadas a 5 MPa, se observa claramente como existe una ligera tendencia creciente conforme avanzan los días de curado (ver figura 21). A 1 día, exceptuando las combinaciones con 5% de aditivo, todas comienzan a sufrir las pérdidas de peso. Esta diferencia con las combinaciones realizadas a 10 MPa, se debe a que las probetas a 5 MPa están menos compactadas y ya existen pequeñas oquedades por donde resulta más fácil sufrir pérdidas de humedad hasta que endurecen. Entre los días 7 y 56 de curado, existe un crecimiento más o menos continuo en la pérdida de peso, no guardando relación ninguna entre la mayor pérdida de peso y la combinación con mayor cantidad de aditivo empleado, como se ha visto en el gráfico que hace referencia a las mezclas a 10 MPa. Así mismo, se observa cómo se vuelve a producir una mayor pérdida de peso a 90 días. Es probable que las razones de la misma estén también justificadas por el daño sufrido en el envoltorio de las probetas. No obstante, y exceptuando por ello los resultados a 90 días, las pérdidas de peso sufridas por las combinaciones realizadas a 5 MPa son producto de la desecación propia y normal de las mismas.

Como se ha comentado, las pérdidas de peso sufridas no guardan relación con el porcentaje de aditivo empleado en la combinación en cuestión, pero cabe reseñar que en este caso (combinaciones a 5 MPa), no existen prácticamente diferencias entre las pérdidas de peso sufridas por el cemento y por la cal hidráulica. Hasta los 56 días, ambos

aditivos, pierden hasta 1% de peso; de hecho, la mayoría de las pérdidas son menores que las sufridas por las mismas combinaciones a 10 MPa. Esto quiere decir que, hasta los 2 meses, las probetas con menos tendencia a sufrir pérdidas de peso por desecación son las combinaciones realizadas a 5 MPa. En cuanto a las pérdidas sufridas a 90 días, y teniendo en cuenta que algunos de los datos obtenidos (10PC-5MPa y 15NHL-5-5MPa) son producto de un mal sellado de las probetas, se prevé que las máximas pérdidas sufridas por las combinaciones a 5 MPa y a 90 días de curado sean menores a 2,25%, siguiendo así la tendencia que las probetas fabricadas con un menor nivel de presión, sufren menos pérdidas de peso.

## DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

En las siguientes gráficas (figuras 22 y 23), se muestran los niveles de resistencia alcanzados para las combinaciones con 5, 10 y 15% de cemento y cal hidráulica a diferentes edades de curado: 1, 7, 14, 28, 56 y 90 días. En primer lugar las combinaciones realizadas a 10 MPa y en segundo, las elaboradas a 5 MPa. Ambas gráficas reflejan una misma tendencia: conforme avanza la edad de curado de la probeta ensayada, la resistencia alcanzada es mayor. Además, tanto a 10 como a 5 MPa, todas las combinaciones mejoran la resistencia del suelo sin aditivos: 0,94 MPa.

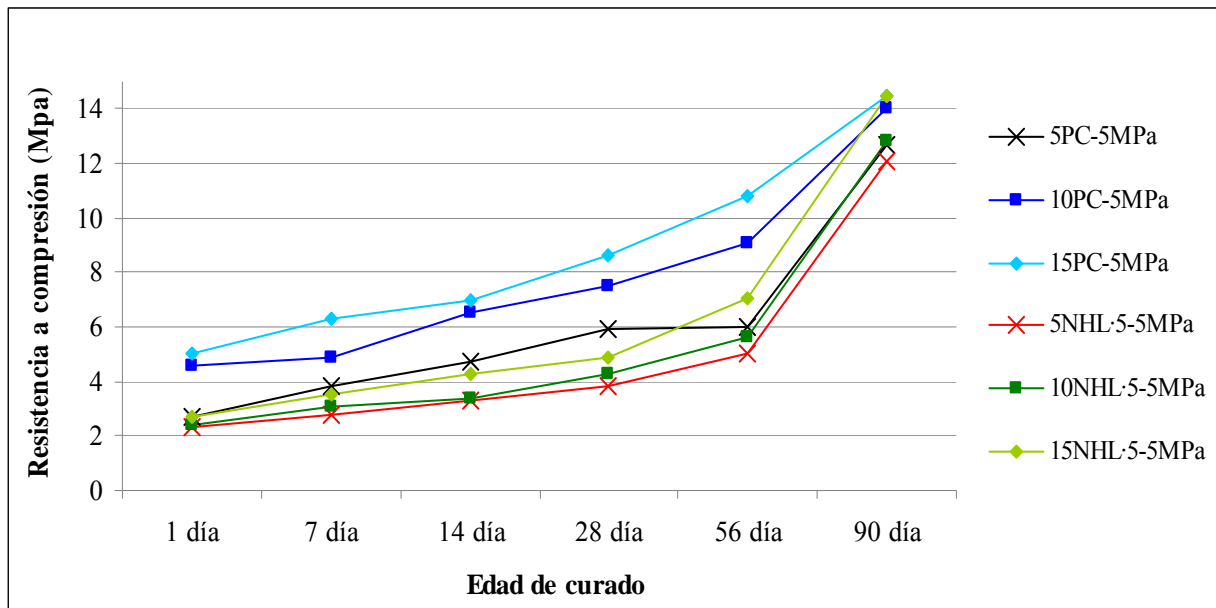


**Fig. 22. Ensayo de resistencia a compresión simple conforme avanza el tiempo de curado, de las combinaciones con 5, 10 y 15% de cemento y cal hidráulica a 10 MPa.**

Como se aprecia en el gráfico superior, se observa como las combinaciones de cemento alcanzan resistencias mayores que las de cal hidráulica. Esto es debido a que el PC es un aditivo más eficaz que la cal hidráulica ya que sus componentes están en proporciones muy equilibradas. Contiene más cantidad de silicio y el calcio aparece como óxido de calcio, a diferencia de la cal hidráulica en la que aparece como hidróxido por lo que actúa más lentamente. Además, entre los componentes del cemento, se encuentran el yeso y el óxido de hierro, componentes que la cal hidráulica no tiene. Estas características hacen que el cemento sea un aditivo de actuación rápida, con gran poder hidráulico, y de gran resistencia, con lo que se considera el aditivo por excelencia utilizado en construcción.

Como era de esperar para ambos aditivos, las combinaciones realizadas con un mayor porcentaje de aditivo alcanzan resistencias mayores ya que se desarrollan antes y en mayor medida las reacciones cementantes. No obstante, existen diferencias en cuanto a los incrementos de resistencia que se dan entre el ensayo realizado a 1 día y a 90 días. Destacar también que los 56 días de curado, en la mayoría de las combinaciones, es clave para el desarrollo de las propiedades mecánicas, siendo a partir de este momento cuando las ganancias de resistencia van a ser mucho mayores.

En referencia al cemento, la combinación que contiene el 5% de cemento es la que presenta la mayor ganancia de resistencia, entorno al 213%; por contra, la combinación que menos incremento logra es la que contiene el mayor porcentaje de aditivo, 15PC-10, con un incremento del 151%. Con respecto a la cal hidráulica, el mayor incremento de resistencia se produce con la combinación del 15% de aditivo, con una ganancia del 295%. El menor incremento es de 270% que corresponde a la combinación de 5% de NHL·5.



**Fig. 23. Ensayo de resistencia a compresión simple conforme avanza el tiempo de curado, de las combinaciones con 5, 10 y 15% de cemento y cal hidráulica a 5 MPa.**

En el gráfico referente a las combinaciones realizadas a 5 MPa (ver figura 23), se observa como las combinaciones de PC, al igual que en el caso anterior a 10 MPa, siguen alcanzando, resistencias más altas que la cal hidráulica.

También en este caso, el cemento y la cal hidráulica alcanzan resistencias mayores según el porcentaje de aditivo añadido es mayor. Por otra parte, el mayor incremento de resistencia se produce entre los días 56 y 90, y aún más acentuado en el caso de la cal hidráulica. En el caso del cemento, el mayor incremento en la ganancia de resistencia entre el primer y último día de ensayo, es de 370% que corresponde a la combinación 5PC-5MPa; y el menor incremento es de 190% de la combinación que utiliza un 15% de PC. Con la cal hidráulica, el mayor incremento de resistencia se produce con el 15% de NHL·5, siendo este de 473%; y el menor incremento es de 426% correspondiendo a la combinación 5NHL·5-5. Cabe destacar, que las combinaciones de cal compactadas a 5 MPa suponen unos incrementos muy similares entre un porcentaje y otro de aditivo.

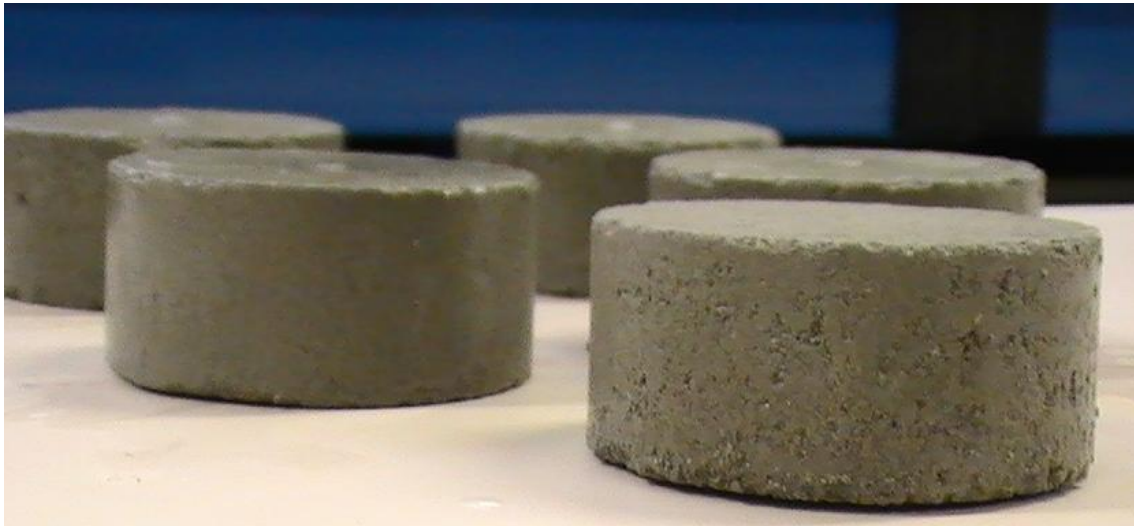
Una vez analizados todos los incrementos de resistencia que se producen entre el primer y el último día de ensayo (entre 1 y 90 días de curado) de todas las combinaciones estudiadas (a 10 y a 5 MPa), se puede afirmar que el comportamiento entre el cemento y la cal hidráulica es diferente. Esto es, en las mezclas realizadas con cemento, a 5 y a 10 MPa, se registra un mayor incremento de resistencia según el contenido de aditivo en la combinación es menor. Por el contrario, para las combinaciones con cal hidráulica, las mezclas con un 5% son las que menor ganancia de resistencia consiguen y las de 15% las que mayor incremento.

De todas las combinaciones ensayadas en esta fase II, las que mejores resultados obtienen son las que contienen un 15% de aditivo, y entre ellas, la realizada a 10 MPa: 15PC-10MPa. No obstante, es donde la ganancia de resistencia entre el día 1 y el 90 es menor. Así mismo, los mayores incrementos de resistencia se producen en las combinaciones realizadas a 5 MPa, registrando la máxima ganancia la mezcla 15NHL-5-5MPa.

Aunque las valoraciones realizadas parecen concluyentes para elegir una de las combinaciones que utilice un 15% de conglomerante hidráulico, y como se verá en la fase III, es conveniente elegir un 5% de aditivo, como así lo recomiendan recientes estudios, no solo por el ahorro económico sino porque registran buenos incrementos de resistencia (264% a 10 MPa y 370% a 5 MPa). El criterio de mayor peso, ya que las resistencias alcanzadas a 90 días son similares, es que el incremento en la ganancia de resistencia entre el día 1 y el día 90 de una combinación sea el máximo.

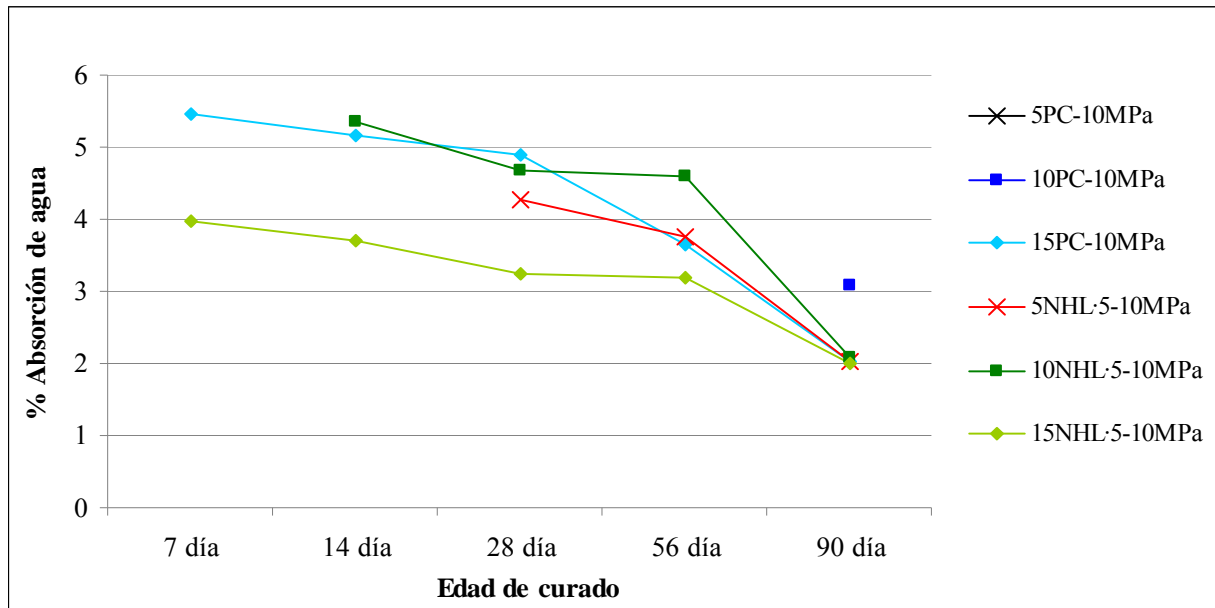
## VALORACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS PROBETAS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de absorción a partir de 7 días de curado ya que con 1 día, y tras realizar unas pruebas previas, no aguantaba ninguna combinación salvo los experimentos que se hicieron con las combinaciones a 1 MPa (foto 14). Este hecho, como también quedará patente con los siguientes resultados, ratificó que cuanto menor es el nivel de presión utilizado, las probetas aguantan mejor a inmersión. No obstante, estas probetas a 1 MPa no eran válidas para ningún ensayo posterior ya que no tenían consistencia alguna.



**Foto 14. Probetas compactadas a 1 MPa tras el ensayo de inmersión a 1 día.**

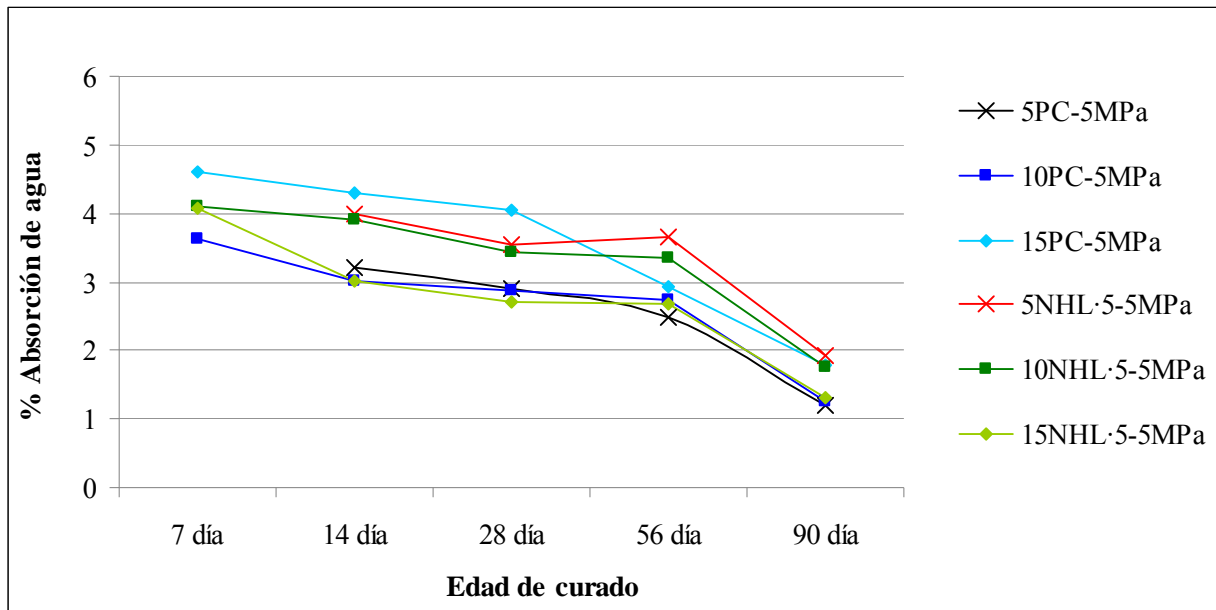




**Fig. 24. Porcentaje de absorción de agua del cemento y la cal hidráulica con proporciones de 5, 10 y 15% a 10 MPa.**

En el gráfico superior se observa como las combinaciones de cal hidráulica aguantan mejor el ensayo de absorción ya que en el caso del cemento, tan solo resisten la combinación que contiene un 15% de aditivo y a 90 días la del 10% de PC. Cabe destacar que en ninguno de los casos el porcentaje de absorción no supera el 5,5%. Este dato es de gran relevancia ya que según la bibliografía, el rango máximo impuesto de porcentaje de absorción para ladrillos convencionales es del 6%.

Las probetas que resisten este ensayo, ya sean de cemento o de cal hidráulica, mantienen una misma tendencia: conforme avanza la edad de curado de las mismas, el porcentaje de absorción disminuye hasta alcanzar, prácticamente todas las combinaciones, aproximadamente un 2% de absorción de agua en el caso de la cal y un 3% en el cemento. Esto se debe a que las probetas van endureciendo poco a poco y la estructura cada vez es más conexa, fuerte y cerrada.



**Fig. 25. Porcentaje de absorción de agua del cemento y la cal hidráulica con proporciones de 5, 10 y 15% a 5 MPa.**

Como se aprecia en la figura 25, en contra de lo que ocurre a 10 MPa, todas las combinaciones superan el ensayo de absorción, únicamente las que contienen un 5% de aditivo resisten a partir de los 14 días de curado. El máximo porcentaje de absorción es alrededor del 4,5%, lo que quiere decir que a 5 MPa se produce una menor absorción que a 10 MPa, resultando un 0,75% la mínima diferencia existente entre ambos niveles de presión.

Al igual que los resultados obtenidos a 10 MPa, las combinaciones a 5 MPa disminuyen su porcentaje de absorción conforme avanza la edad de curado de las probetas, reduciendo la absorción hasta alrededor del 1,5% a 90 días, porcentaje menor aún que los obtenidos para la misma edad de curado de las combinaciones a 10 MPa. Como se ha comentado anteriormente para las combinaciones a 10 MPa que han aguantado, son las combinaciones de PC las que sufren un mayor porcentaje de absorción. En el caso de las combinaciones a 5 MPa, se refleja la misma comparativa exceptuando las combinaciones con un 5% de aditivo ya que en ese caso, es la cal la que absorbe un mayor porcentaje de agua que el cemento en todas las fechas estipuladas para ensayo.

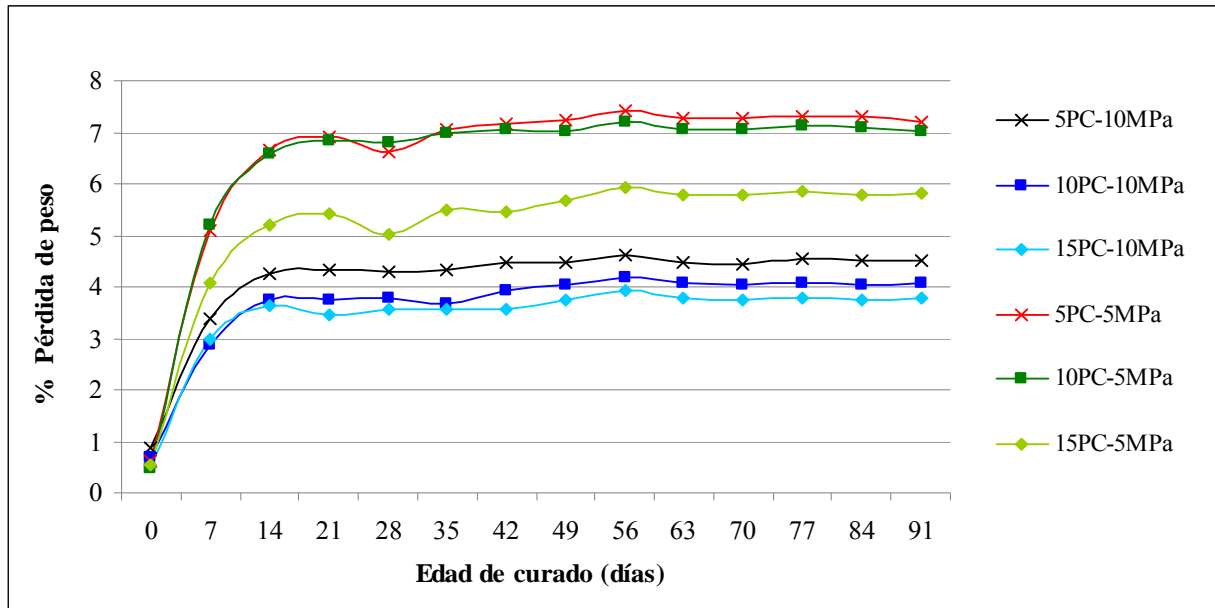
De forma general, y a diferencia de lo ocurrido a 10 MPa, todas las combinaciones realizadas a 5 MPa superan el ensayo de absorción. Esto se debe a que cuanto menor es la densidad de compactación de los ladrillos, los huecos entre las láminas de arcilla de la mezcla son mayores y al introducirse el agua, se producen menos cambios de volumen en la pieza sumergida que cuando está compactada a mayor presión.

De ambas gráficas se concluye, que en general el porcentaje de absorción de agua de las probetas es menor cuanto que el contenido de aditivo empleado en la mezcla es mayor ya que la capacidad de endurecimiento es mayor. Además, las combinaciones que utilizan porcentajes altos de aditivo, superan a edades más tempranas el ensayo de absorción. Conforme más tiempo de curado tienen las probetas a ensayar, mayor durabilidad en agua.

## **DURABILIDAD FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO**

Para los resultados obtenidos de las pruebas de hielo-deshielo, y como excepción, se han agrupado en una primera gráfica (figura 26) las combinaciones realizadas con cemento a 5 y 10 MPa, y en la segunda gráfica (figura 27) las mezclas con cal hidráulica realizadas a ambos niveles de compactación. Se ha procedido de esta manera ya que las probetas de cemento, que comenzaron antes los ciclos, se ensayaron sin ningún tipo de envoltura por eso el comportamiento de uno y otro aditivo es diferente.

Las probetas de cal hidráulica se introdujeron en la cámara con una envoltura de film para evitar la desecación prematura observada en las probetas de cemento. Este imprevisto, derivó en una conclusión colateral para futuros ensayos: la importancia de realizar los ciclos de hielo-deshielo con las probetas protegidas, ya sea mediante un film o cualquier material hidrófugo.



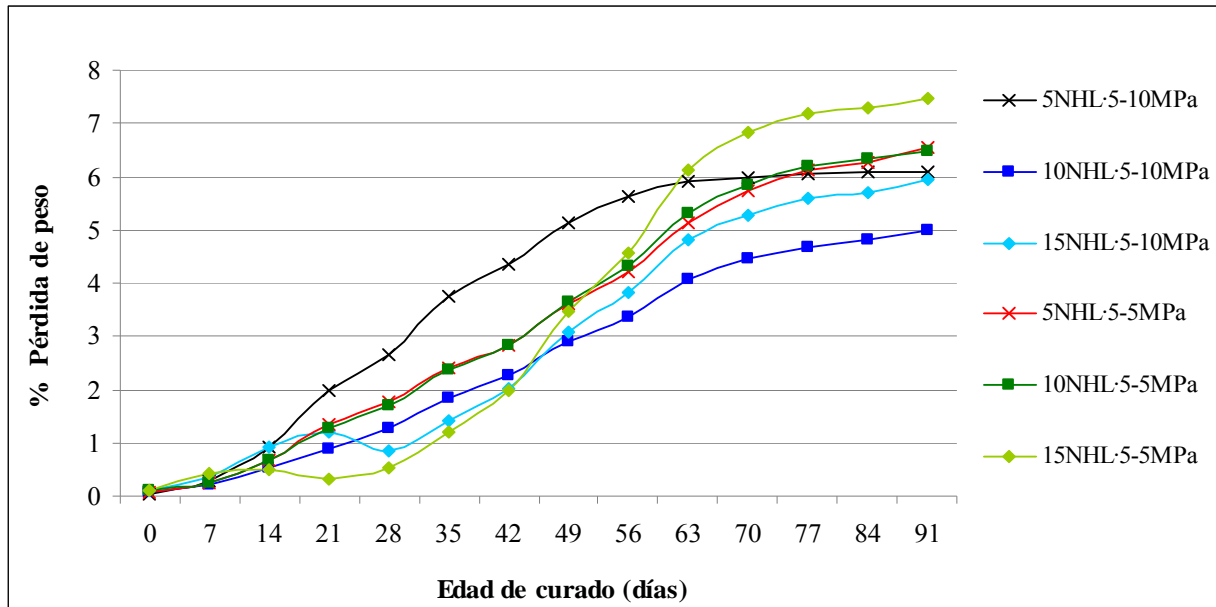
**Fig. 26. Pérdida de peso durante 45 ciclos de hielo y deshielo de las probetas realizadas con cemento a 10 y 5 MPa.**

En el gráfico superior se observa como ya antes de empezar el ensayo de heladicidad, las probetas han perdido casi un 1% de peso, hay que tener en cuenta que este ensayo comienza tras 7 días de curado. A partir de los 7 ciclos de hielo-deshielo (alrededor de los 14 días) la pérdida de peso alcanzada se mantiene constante a lo largo del resto del ciclo. Además, todas las combinaciones mantienen una misma tendencia: conforme el porcentaje de aditivo de la mezcla ensayada es mayor, y el nivel de compactación utilizado también, es decir a 10 MPa, menor pérdida de peso sufren las mismas.

Cabe destacar que en las combinaciones de cemento a 10 MPa, la diferencia al final de los ciclos entre la mezcla con mayor aditivo y con el menor es de 0,74%; y en cambio, la misma diferencia para las combinaciones realizadas a 5 MPa es de casi el doble, 1,20%. Entre las combinaciones que tienen el mismo contenido de PC pero difieren en el nivel de compactación utilizado, la diferencia es aproximadamente la misma: existe una pérdida de peso mayor en las combinaciones realizadas a 5 MPa de aproximadamente del 2,56%.

Destacar la importancia de utilizar un mayor nivel de compactación para que las pérdidas producidas por los ciclos de hielo-deshielo sean las mínimas posibles. Esto se debe a que cuando la probeta está más compactada existen menos huecos u oquedades que facilitan estas pérdidas de peso producidas por la desecación normal de las mismas. En

referencia al porcentaje de aditivo a utilizar, como era de esperar, cuanto mayor es el aditivo cementante en la mezcla se producen menores pérdidas de peso ya que el endurecimiento y fraguado de las mismas es mayor.



**Fig. 27. Pérdida de peso durante 45 ciclos de hielo y deshielo de las probetas realizadas con cal hidráulica a 10 y 5 MPa.**

Con respecto a los resultados obtenidos en el ensayo de heladicidad de la cal hidráulica (representados en la figura 27), destaca la tendencia creciente de pérdida de peso de todas las combinaciones. Conforme avanzan los ciclos, las pérdidas de peso aumentan hasta alcanzar a los 35 ciclos una ligera tendencia a mantener la pérdida de peso alcanzada. Cabe destacar, en comparación con lo ocurrido con el cemento, que las pérdidas producidas durante los 7 días de curado previo antes de empezar el ensayo de heladicidad son prácticamente nulas. Esto se debe al buen sellado de las probetas con cal hidráulica, de ahí la importancia de aislarlas para evitar desecaciones aceleradas.

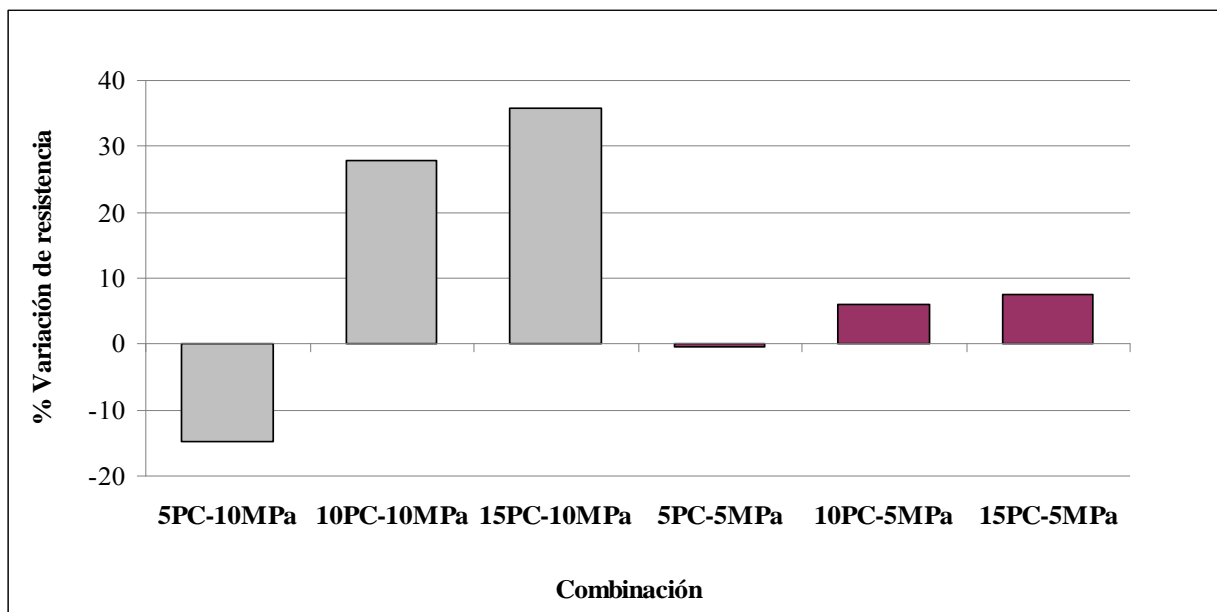
Las combinaciones a 10 MPa sufren menores pérdidas de peso que las mezclas a 5 MPa al término de los 45 ciclos de hielo-deshielo. La máxima diferencia, de 2,23%, se registra en las combinaciones con un 10% de cal, en las otras dos mezclas las diferencias son mínimas, siendo de 0,94% en las combinaciones con 5% de aditivo y de 0,12% comparando las del 10% de cal.

Señalar que para las combinaciones realizadas con cal hidráulica, el incremento de las pérdidas de peso es indiferente al porcentaje de aditivo añadido a la mezcla. En este caso y para ambos niveles de compactación, las combinaciones que menos pérdida de peso sufren al término del ensayo, son las que contienen un 10% de cal hidráulica. Y las que mayores pérdidas registran son a 10 MPa la combinación con el 5% de aditivo, y a 5 MPa la del 15%.

Por último, se realizó una inspección ocular a cada una de las probetas ensayadas en los ciclos de hielo-deshielo, no detectándose ningún desperfecto.

## VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA TRAS ENSAYO DE HELADICIDAD

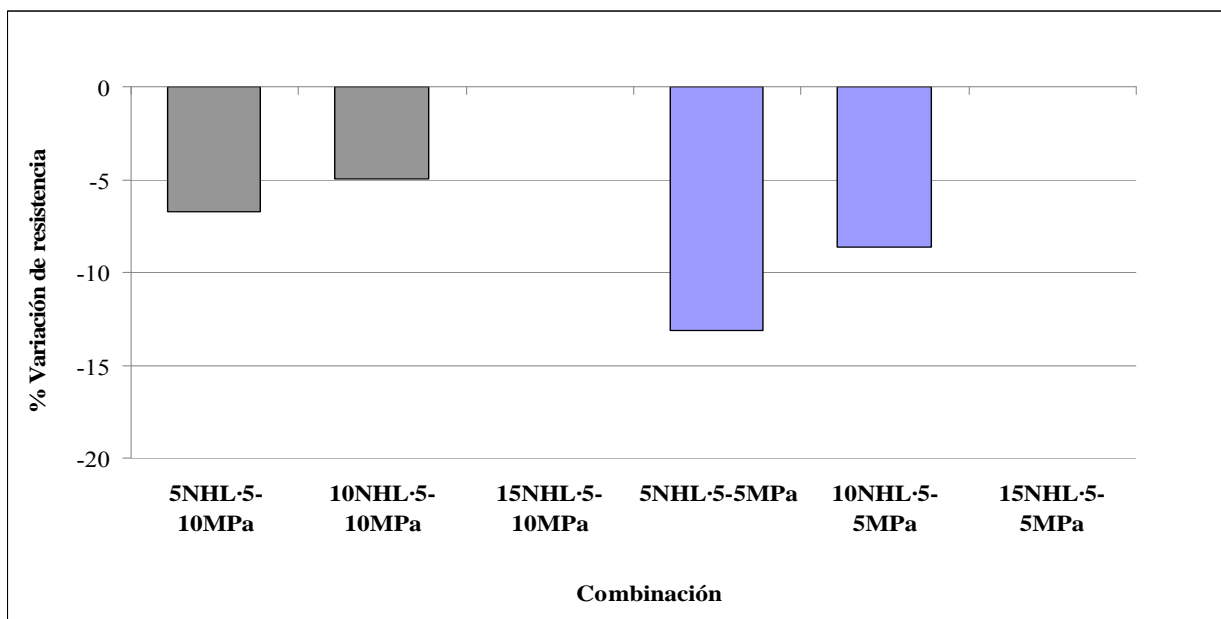
Al concluir el ensayo de heladicidad, se sometieron a compresión simple todas las probetas mostradas en imágenes anteriormente. En los gráficos posteriores (figuras 28 y 29) se presentan la variación de resistencia producida entre las probetas a 90 días de curado en condiciones normales y las mismas combinaciones pero habiendo sufrido durante los 90 días los ciclos de hielo-deshielo.



**Fig. 28. Variación de resistencia tras 45 ciclos de hielo y deshielo de las probetas realizadas con cemento a 10 y 5 MPa .**

Las combinaciones ensayadas de cemento, aunque sus resultados no son concluyentes ya que las probetas se ensayaron sin sellado alguno, se procedió a la rotura de las mismas para comprobar como cuando las probetas sufren una brusca desecación, incluso algunas podían tener el núcleo helado, la variación en la resistencia puede ser incluso positiva.

Como se ve en la figura 28, las pérdidas de resistencia no superan el 15% en la única combinación que registra una disminución de la resistencia. El resto de combinaciones, exceptuando la que contiene un 5% de PC a 5 MPa que apenas varía, ganan resistencia. Las probetas compactadas a 10 MPa aumentan alrededor de un 30% su resistencia estándar y las realizadas a 5 MPa incrementan entorno al 8%. Se refleja claramente, como las variaciones más bruscas se producen en las piezas compactadas a un mayor nivel, de hecho, se podría decir que las realizadas a 5 MPa apenas manifiestan una gran variación con respecto a las roturas realizadas en condiciones normales de curado.



**Fig. 29. Variación de resistencia tras 45 ciclos de hielo y deshielo de las probetas realizadas con cal hidráulica a 10 y 5 MPa .**

En los resultados obtenidos de cal hidráulica a 10 MPa (figura 29) se observa como las combinaciones con menor porcentaje de aditivo, 5 y 10%, registran un detrimento de la resistencia de alrededor del 5%. Las combinaciones de cal realizadas a 5 MPa pierden

una media de 10% de resistencia en comparación con las mismas combinaciones rotas en condiciones estándar.

Destacan las mezclas que contienen un 15% de cal ya que no experimentan ninguna variación en la resistencia a compresión simple. Puede ser debido a que el contenido de aditivo cementante es suficiente como para no debilitarse con el ensayo de heladicidad.

Como era de esperar, en la mayoría de los casos se producen pérdidas de resistencia provocadas por el efecto de los ciclos de hielo-deshielo, no obstante éstas no alcanzan ni el 15% de las pérdidas. Datos muy interesantes y optimistas puesto que todas las probetas han sido sometidas a 1080 horas de temperaturas bajo cero, mientras que la norma marca solamente 200 horas.



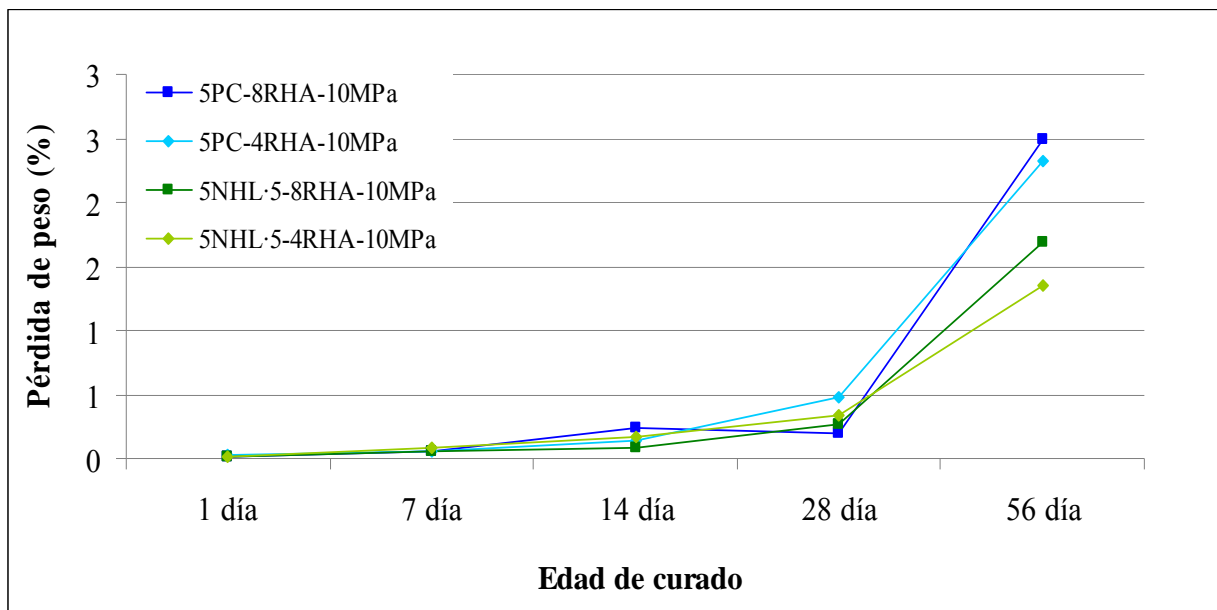
### 5.3. FASE III

En la tercera fase de la campaña se ensayan las combinaciones elegidas procedentes de la fase II: un 5% de aditivo comercial (cemento como referencia y cal hidráulica) combinado con cenizas de cáscara de arroz en proporciones de 4 y 8%. Todas las mezclas propuestas se han realizado a los dos niveles de compactación que se vienen estudiando (5 y 10 MPa). El seguimiento de estas probetas queda reflejado en este trabajo hasta la edad de 56 días; no obstante quedarán más piezas a disposición del laboratorio de Mecánica de Suelos para futuros ensayos a 90 días.

Esta fase es determinante porque de aquí saldrá la combinación definitiva para ensayar con las cáscaras de arroz en la IV fase que conformará el ecoladrillo final.

### VARIACIÓN DEL PESO CONFORME AVANZA LA EDAD DE CURADO

En las gráficas siguientes se muestran las variaciones de peso sufridas por las probetas que van a ser sometidas al ensayo de compresión simple.

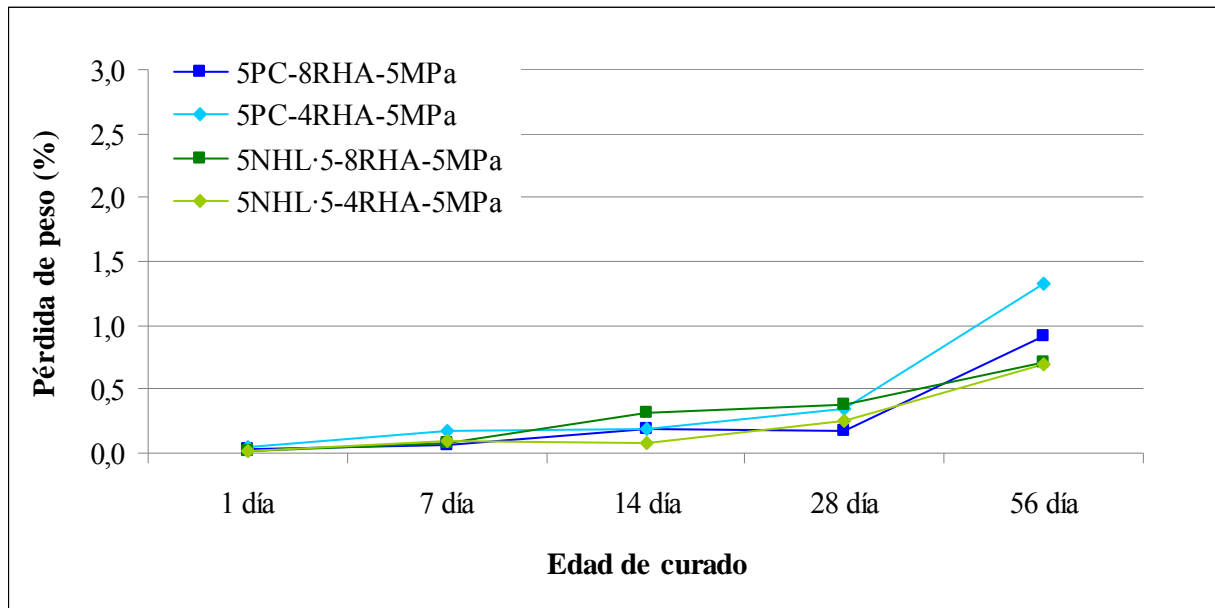


**Fig. 30. Variación del peso de las combinaciones con 5% de cemento y cal hidráulica con 4 y 8% de cenizas de cáscara de arroz a 10 Mpa.**

Las variaciones de peso producidas (figura 30) son similares para todas las combinaciones ya que el sellado ha sido el mismo para todas las probetas. A 1 día ninguna combinación sufre pérdidas de peso y tan solo incrementa un 0,14% hasta los 14 días, el mismo incremento que se produce de los 14 a los 28 días. En el siguiente periodo, entre los 28 y 56 días de curado, es cuando se registra el mayor aumento de pérdida de peso, siendo de 2,07% de media en las combinaciones de PC y de 1,22% en las de NHL-5.

No existen diferencias significativas en cuanto que el porcentaje de cenizas en la mezcla es menor, tan solo se aprecia en algunas combinaciones que las mezclas con 4% de cenizas tienden ligeramente a sufrir mayores pérdidas de peso. Las combinaciones de cemento pierden a los 56 días alrededor de 2,4% de peso y las de cal hidráulica entorno a 1,5%. Teniendo en cuenta que la envoltura de las probetas era la correcta, parece clave que a partir de 1 mes, y de una forma más acentuada a los 56 días, las cenizas de cáscara de arroz comienzan bruscamente a perder la humedad que hasta ese momento retenían. De hecho, las pérdidas de peso registradas en estas combinaciones con cenizas a 56 días, alcanzan prácticamente las pérdidas obtenidas por las mismas mezclas a 10 MPa sin cenizas pero a 90 días.

Por tanto, cabe decir que a partir de los 56 días, las combinaciones con cenizas a 10 MPa sufren pérdidas de peso mucho mayores que sin ellas. Como veremos a continuación, a 5 MPa no se pueden aplicar las mismas conclusiones.



**Fig. 31. Variación del peso de las combinaciones con 5% de cemento y cal hidráulica con 4 y 8% de cenizas de cáscara de arroz a 5 Mpa.**

En el caso de las combinaciones de PC y NHL-5 realizadas a 5 MPa (figura 31), las pérdidas de peso también son mayores conforme avanzan los días de curado. Además, en la mayoría de las combinaciones estudiadas se refleja como no es determinante la adición de un 4% más o menos de cenizas a la mezcla. No obstante, existe también una ligera tendencia a que las combinaciones con mayor cantidad de cenizas sufran menores pérdidas de peso. Igualmente que en los resultados obtenidos para las combinaciones a 10 MPa, a 56 días de curado son las combinaciones de PC las que disminuyen más sobre el peso inicial. Esto es claramente así a partir, aproximadamente, del mes y medio de curado.

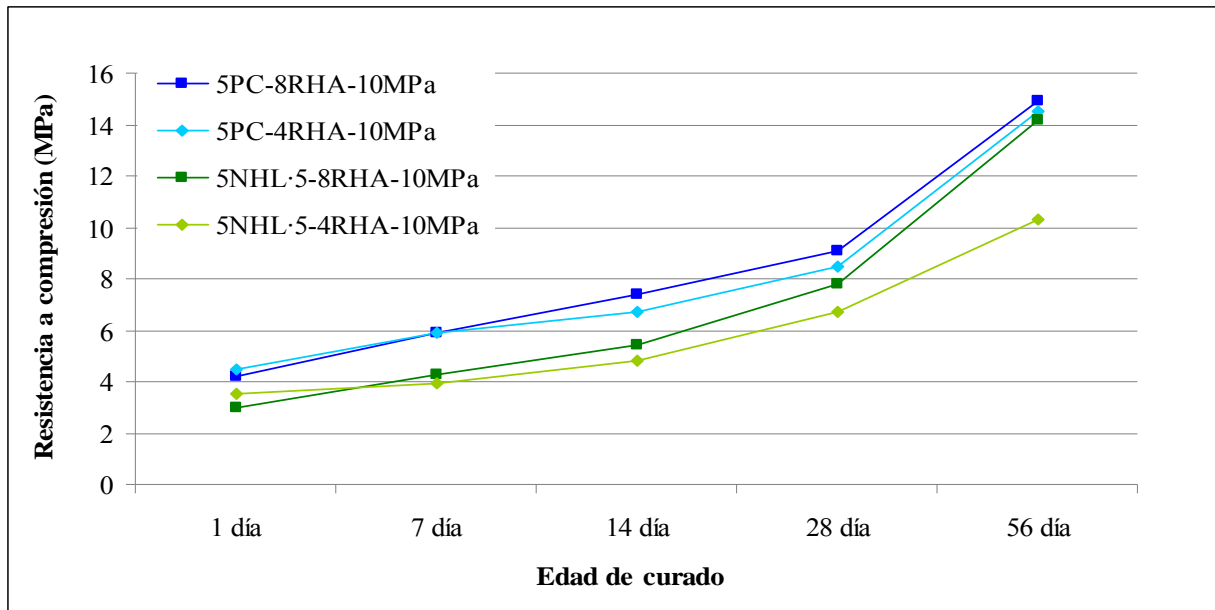
Hasta los 7 primeros días de curado las pérdidas de peso son insignificantes (0,08%). Entre los 7 y 14 días ocurre lo siguiente: las combinaciones, tanto de cemento como de cal, que contienen un 8% de cenizas incrementan su pérdida de peso entorno a 0,19%; en cambio, las formadas por un 4% de cenizas mantienen el peso registrado a la semana de curado. Es realmente curioso, como en el periodo comprendido entre los 14 y 28 días ocurre completamente lo contrario, es decir, las combinaciones con un 8% de cenizas mantienen el peso de los 14 días, y las mezclas con el 4% de cenizas disminuyen un 0,2% más de peso. En el último periodo de tiempo analizado, entre los 28 y 56 días de curado, los incrementos en las pérdidas de peso son parejos según el aditivo comercial empleado. Esto es, las dos combinaciones de PC disminuyen un 0,9% más de peso en

referencia al peso registrado a los 28 días, y las mezclas de NHL·5 tienen un incremento de pérdida de peso de 0,4%.

Por último destacar que a los 56 días, las combinaciones realizadas a 5 MPa pierden entorno al 1% menos de peso que las de 10 MPa. Igualmente, dentro de las combinaciones estudiadas a 5 MPa, son las de cal hidráulica las que a 56 días registran menor pérdida de peso. Cabe resaltar que en comparación con los datos procesados en la fase anterior se obtienen las siguientes conclusiones. Las combinaciones con un 5% de PC pero sin cenizas de cáscara de arroz sufren una menor pérdida de peso, en cambio, los resultados obtenidos par a las combinaciones realizadas con la cal hidráulica indican que éstas mezclas con cenizas pierden menos peso que estas combinaciones sin cenizas. No obstante estas diferencias, al contrario que a 10 MPa, son irrelevantes en estas combinaciones realizadas a 5 MPa ya que las diferencias rondan el 0,4%.

## **DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE**

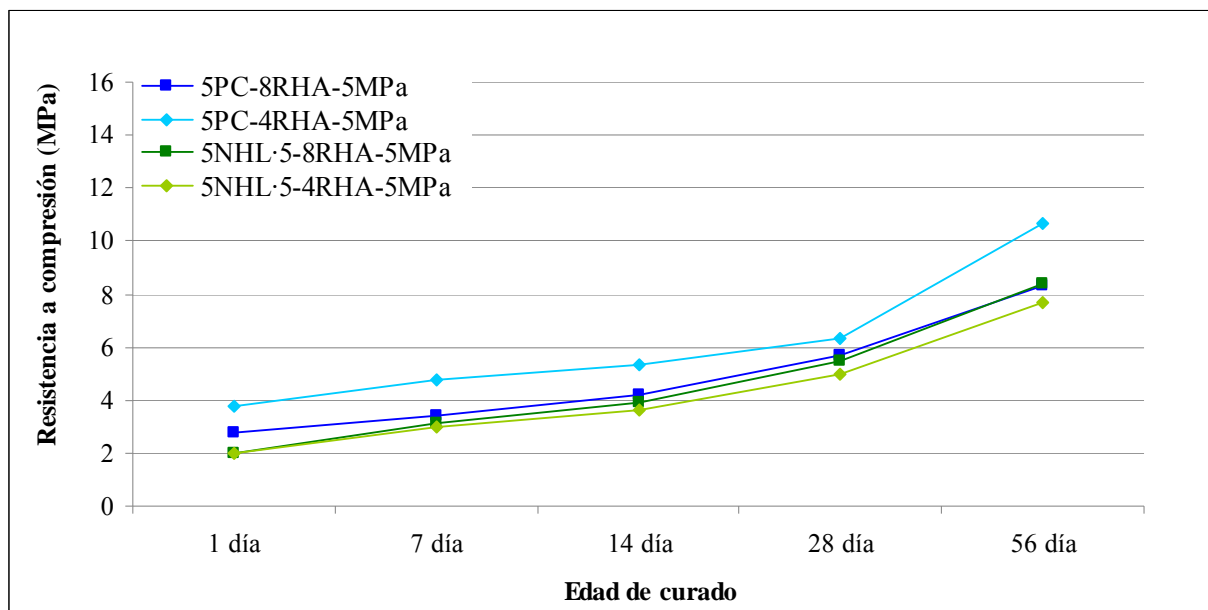
A continuación, se muestran los niveles de resistencia alcanzados para las combinaciones con 5% de aditivo comercial y, 4 y 8% de cenizas a 10 y 5 MPa a las siguientes edades de curado: 1, 7, 14, 28, y 56 días. Ambas gráficas (ver figuras 28 y 29) reflejan una misma tendencia: conforme avanza la edad de curado, aumenta la resistencia alcanzada; y esta tendencia es más acentuada en el caso de las combinaciones realizadas a 10 MPa. Igualmente en ambos casos, el cemento registra valores más altos de resistencia que las combinaciones con cal hidráulica ya que se trata de un aditivo más fuerte por las razones ya comentadas en la fase anterior.



**Fig. 32. Ensayo de resistencia a compresión simple de las combinaciones con cemento y cal hidráulica más cenizas de cáscara de arroz a 10 MPa.**

El análisis de los resultados obtenidos para las combinaciones estudiadas en la fase III (figura 32) indica que el incremento que se produce entre las distintas fechas de ensayo hasta los 28 días, es similar entre las mismas. Entre el día 1 y el 28, el incremento total que se produce es de entorno al 103% para las mezclas de referencia (PC), y de 126% para las combinaciones que utilizan cal hidráulica como aditivo principal. Esta variación en el aumento de resistencia es mayor entre tan solo el periodo de 28 a 56 días, siendo el incremento para las dos composiciones que utilizan cemento de más del 65%.

En cambio, se producen diferencias entre las combinaciones de cal hidráulica, revelándose un mayor incremento para la mezcla con mayor porcentaje de cenizas, del 82%; y para la combinación de NHL·5 con un 4% de cenizas, el aumento de resistencia entre el día 28 y el 56, es de más del 54%.



**Fig. 33. Ensayo de resistencia a compresión simple de las combinaciones con cemento y cal hidráulica más cenizas de cáscara de arroz a 5 MPa.**

El gráfico superior (figura 33) hace referencia a los resultados obtenidos del ensayo de compresión simple de las combinaciones a 5 MPa. Las mezclas con cal hidráulica y cenizas a 5 MPa siguen la misma tendencia reflejada para las mismas combinaciones a 10 MPa. Entre el periodo comprendido de 1 a 28 días el incremento de resistencia es de más del 160%, un 35% más de incremento que el obtenido a 10 MPa.

Las combinaciones de referencia (PC) incrementan su resistencia entre el día 1 y el 28, con una tendencia diferente según el porcentaje de cenizas contenido en la mezcla. Así, el aumento de resistencia que se produce en ese periodo para la combinación de cemento con 8% de cenizas es de más del 100%, y para la mezcla con un 4% es del 65%.

El hecho de que la combinación 5PC-4RHA-5MPa tenga un incremento mínimo entre las primeras edades de ensayo y hasta los 28 días, se debe a que los niveles de resistencia alcanzados a 1 día ya son destacadamente buenos. De hecho, en comparación con lo ocurrido en el resto de combinaciones estudiadas, es la única mezcla que aun teniendo un menor porcentaje de cenizas funciona mejor que el resto de las combinaciones. Esto refleja que la combinación óptima de PC a 5 MPa no requiere de más del 4% de aditivo residual ya que una cantidad mayor, por ejemplo del 8%, puede saturar la mezcla y obtener resultados menores de lo esperado. Este hecho aislado reitera la gran influencia que tiene el uso de un nivel de compactación u otro.

Al igual que ocurre con las probetas de las mismas combinaciones compactadas a 10 MPa, tan solo en el periodo comprendido entre los 28 y 56 días, el incremento es de más del 50% en el caso de las mezclas de cal hidráulica. El cemento con un 4% de cenizas aumenta la resistencia desde la resultante a 28 días hasta el último día ensayado en casi un 70%, y en un 45% la combinación con 8 % de cenizas.

Cabe señalar que comparando con la fase anterior, cuyas mezclas no contenían las cenizas de cáscara de arroz, se produce una gran mejora de la resistencia mecánica. Este incremento en lo referente a las muestras a 10 MPa, se produce en todas las combinaciones y a todas las edades ensayadas, exceptuando las combinaciones de cal hidráulica con cenizas a 1 día. Las mejoras no superan apenas el 20% hasta alcanzar los 28 días de curado, en este momento los incrementos que se producen entre la fase II y la fase III son de aproximadamente el 30% para las combinaciones con PC, y de más del 40% para las mezclas con NHL·5. Pero los mayores incrementos de resistencia entre las combinaciones que utilizan cenizas y las que no, se produce a los 56 días de curado, alcanzando mejoras de más del 100% para todas las combinaciones que utilizan cenizas, tanto con cemento como con cal hidráulica. Lo cual pone de manifiesto el gran potencial puzolánico de este aditivo residual.

Esta comparativa entre fases, refleja claramente la capacidad de las cenizas de cáscara de arroz de mejorar de las propiedades mecánicas, aumentando la resistencia a compresión simple de la mezcla. Esto mismo sucede para las combinaciones realizadas a 5 MPa, aunque el incremento producido por el uso de las cenizas es prácticamente la mitad que el aumento reflejado a 10 MPa. Este hecho tendrá una relevancia fundamental a la hora de descartar el nivel de compactación de 5 MPa en la IV fase.

Las combinaciones con cemento y cenizas a 5 MPa, mejoran la resistencia en un 20% a 1 día pero conforme se comparan las siguientes fechas de ensayo con los resultados obtenidos de las mismas mezclas sin cenizas, la mejora va siendo más pequeña llegando incluso, a los 28 días, a aumentar la resistencia en función de la agregación de cenizas a la mezcla, en tan solo un 2%. Sin embargo, a los 56 días, las combinaciones con un 5% de cemento a 5 MPa, aumentan su resistencia, de media, en prácticamente un 60%.

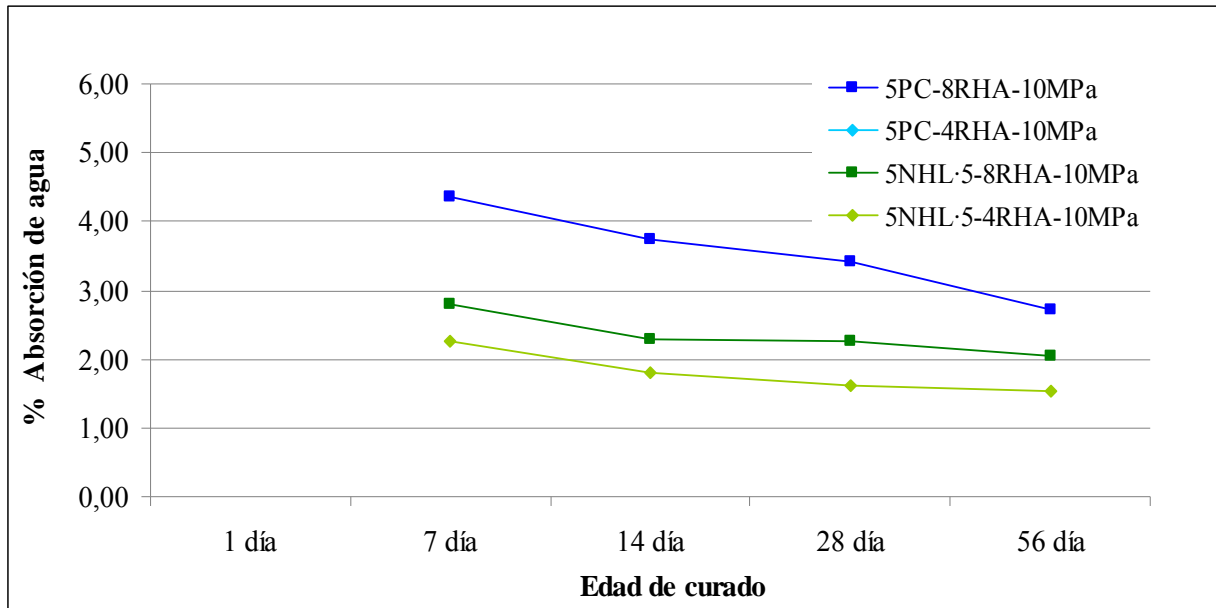
Del resultado de la comparación entre las combinaciones con un 5% de cal hidráulica a 5 MPa, resulta que incluso a 1 día, al añadir las cenizas de cáscaras de arroz a la mezcla, la resistencia a compresión es sobre un 10% menor que sin ellas. No obstante, a partir de los 7 días, ya existen incrementos de resistencia con respecto a la fase anterior, desde un aumento de la resistencia del 10 y 15% para los días 7 y 14 respectivamente, registrando a los 28 días una mejora del 40%, y por último, con 56 días de curado la mezcla mejora prácticamente un 60% con las cenizas.

Aunque a 5 MPa las combinaciones estudiadas en esta fase III también mejoran al añadirles las cenizas de cáscaras de arroz, a 56 días de curado su nivel de resistencia a compresión simple es de 4 puntos menos que el alcanzado por las mismas combinaciones a 10 MPa. La diferencia entre resistencias obtenidas a un mayor o menor nivel de compactación resulta 3 veces mayor que las diferencias producidas entre las mismas combinaciones a 10 y 5 MPa pero sin cenizas. Lo que quiere decir, que en esta fase, los resultados obtenidos de las mezclas compactadas a 5 MPa presentan unas diferencias demasiado significativas, con lo que las mezclas realizadas a 10 MPa resultan mucho más interesantes ya que acentúan más la capacidad de mejora de la resistencia de las cenizas de cáscaras de arroz.

## **VALORACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS PROBETAS**

Todas las combinaciones realizadas en la fase III son sometidas al ensayo de absorción a la edad de 1, 7, 14, 28 y 56 días. A diferencia de la fase anterior, se decidió ensayar las probetas estudiadas a 1 día ya que se esperaban obtener resultados más optimistas pues las cenizas han demostrado que mejoran notablemente la resistencia de la pieza.



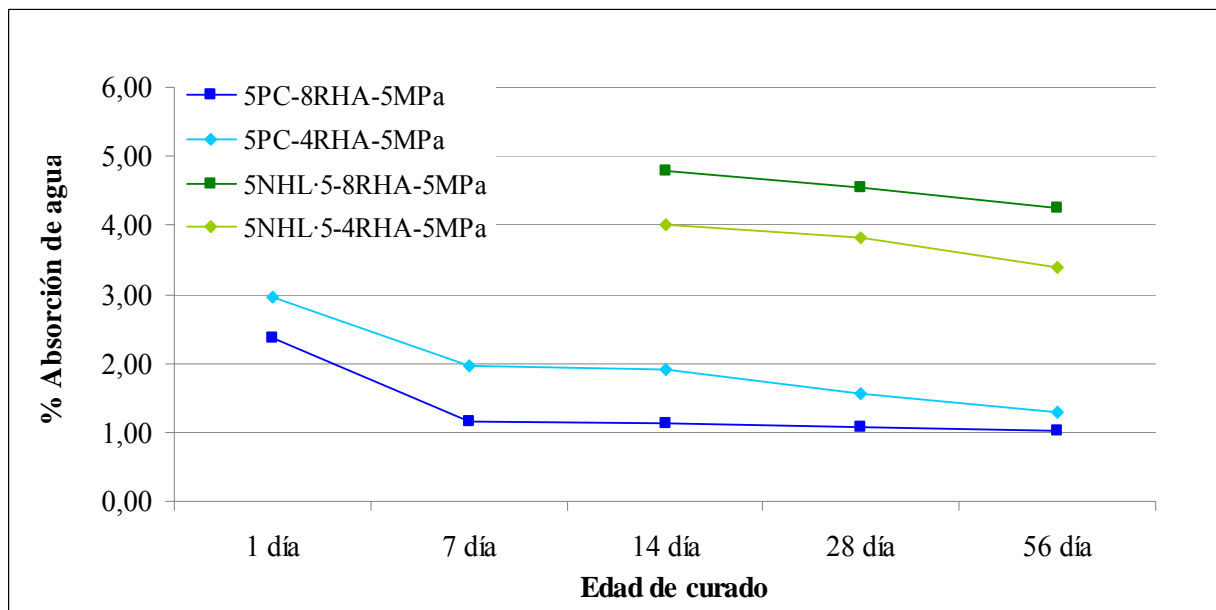


**Fig. 34. Porcentaje de absorción de agua del cemento y la cal hidráulica en combinación con las cenizas de cáscara de arroz a 10 MPa.**

En la figura 34 se observa otra de las razones por la cual se descartará la combinación formada por un 4% de cenizas. Esa es la única mezcla que no supera el ensayo de absorción a ninguna de las edades ensayadas. Matizar, que a 56 días tras las 24 horas en agua, las probetas no se deshicieron pero al inspeccionarlas se hallaron desperfectos. En cuanto a la otra combinación de PC, con 8% de cenizas, resiste el ensayo de absorción a partir de la semana de curado, obteniendo un índice máximo de absorción del 4,4%. A partir de los 7 días sigue una tendencia decreciente en el nivel de absorción de agua, registrando una máxima disminución en la absorción de 0,7% entre el periodo de los 28 a los 56 días; siendo de la mitad la disminución que se produce entre los días 14 y 28.

Con respecto a las combinaciones de cal hidráulica con cenizas a 10 MPa, cabe decir que siguen prácticamente la misma tendencia decreciente: conforme avanza la edad de curado de las probetas, el porcentaje de absorción de agua se reduce. Existe una ligera diferencia entre las dos combinaciones de NHL·5 estudiadas, que la mezcla formada por un 8% de cenizas absorbe una media de 0,5% más de agua que las combinaciones con un 4% de cenizas. Razón no suficiente como para determinar que las mezclas con un 4% son las óptimas para pasar a la IV fase.

Ambas combinaciones de cal hidráulica disminuyen alrededor de un 0,5% en el porcentaje de absorción de agua entre los días 7 y 14. Entre el siguiente periodo, la combinación con un 4% de cenizas gana un 0,2% menos de absorción y la que contiene un 8% de aditivo residual más o menos se mantiene en el mismo porcentaje de absorción con respecto al anterior dato registrado. En el último periodo, entre los 28 y 56 días, la mezcla con un 8% disminuye un 0,2% y la combinación con el 4% de cenizas vuelve a disminuir muy ligeramente con un 0,1%.



**Fig. 35. Porcentaje de absorción de agua del cemento y la cal hidráulica en combinación con las cenizas de cáscara de arroz a 5 MPa.**

Ante todo señalar el comportamiento tan diferente que se observa entre las combinaciones a 10 y a 5 MPa ensayadas. En la gráfica anterior (figura 35) referente a las combinaciones realizadas a 10 MPa, era el cemento el que registraba en todo momento porcentajes más altos de absorción, siendo este hecho muy interesante porque lo que era de esperar era que el PC al ser un aditivo de referencia por ser más resistente, no absorbiera tanta agua, en cambio se ve que la cal hidráulica a 10 MPa supera mejor el ensayo de absorción. En cambio, las relaciones que se dan en las gráficas resultantes de los ensayos con las combinaciones de 5 MPa, ocurre lo contrario, más bien lo que era de

esperar, y que así se vio en la fase II exceptuando las combinaciones que utilizaban un 15% de aditivo, que las mezclas con cal hidráulica absorben más que las de cemento.

La combinación de cemento con un 8% de cenizas a 5 MPa, disminuye su porcentaje de absorción en un 1,2% entre el día 1 y el 7; a partir de ese día mantiene los niveles de absorción de agua alrededor del 1,1%. En cambio, la combinación anterior pero con el 4% de cenizas disminuye su ganancia de agua en la primera semana en un 1%, manteniéndose constante posteriormente y, de los 14 a los 56 días disminuye en 0,6% su porcentaje de absorción.

Entre las dos combinaciones de cemento, aunque siguen una tendencia decreciente parecida, hasta los 14 días la diferencia entre ambas es de 0,7%, aunque conforme avanza el tiempo de curado estas diferencias son menores. El hecho de que sea la combinación con 8% de cenizas la que absorba menos agua es debido a las propiedades de las RHA, las probetas están más endurecidas a la hora de inmersión y permiten una menor entrada de agua en las mismas. En cambio, como se ha observado en los dos gráficos correspondientes a este ensayo de absorción, no ocurre lo mismo con la cal hidráulica puesto que absorben una menor cantidad de agua las probetas con un 4% de cenizas, tanto a 10 como a 5 MPa.

En cuanto a las combinaciones de cal hidráulica con cenizas a 5 MPa alcanzan unos porcentajes de absorción mucho mayores, registrando una diferencia máxima del 3,7% entre las de cemento y cal hidráulica, con 8% de cenizas. Entre las combinaciones de PC y NHL-5 que utilizan un 4% de cenizas existe una diferencia máxima del 2,25% registrada a los 28 días. Entre las propias combinaciones de cal hidráulica existe una diferencia, la que formada por 8% de cenizas absorbe de media un 0,8% más de agua que la que contiene un 4% de cenizas. Ambas combinaciones de cal hidráulica a 5 MPa disminuyen entorno al 0,6% su nivel de absorción de agua entre los 14 y 56 días.

Con respecto a las combinaciones a 10 MPa, resulta muy interesante la mejora que se produce al añadir un 8% de cenizas ya que la misma combinación sin cenizas de la fase anterior, no soportó ningún ensayo de absorción durante los 90 días que se realizaron las pruebas. De hecho, las mejoras entre la fase II y la fase III (con cenizas) son muy

significativas. A 7 días, se logra disminuir en un 10% la cantidad de cemento y además, se disminuye en un 1,1% la absorción de agua por parte de las probetas.

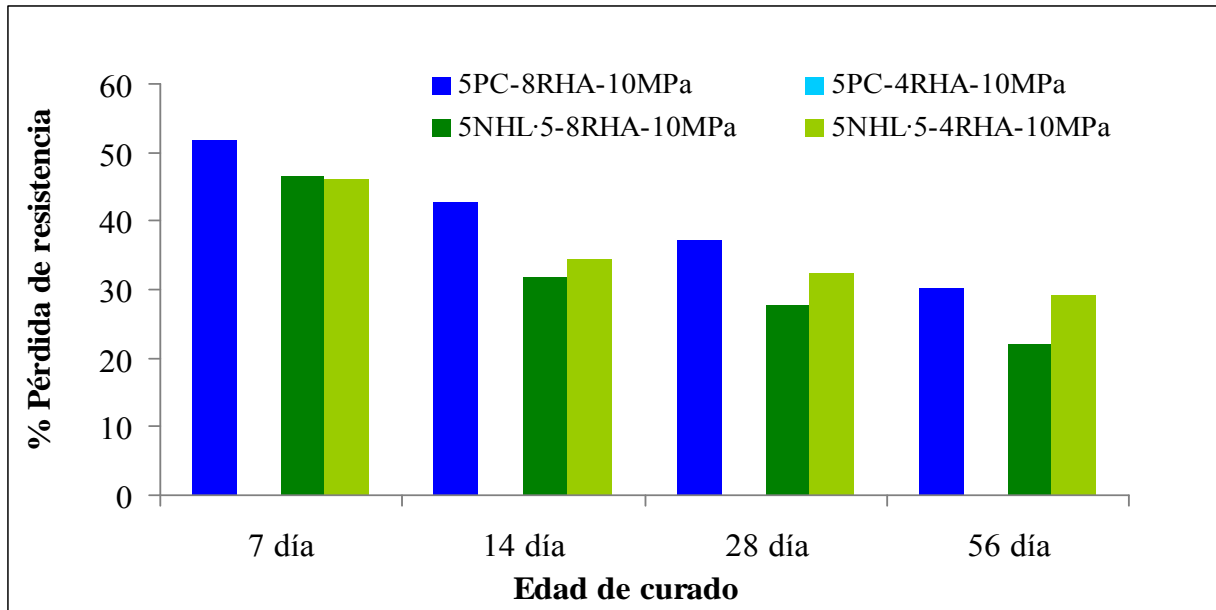
La mejora que se produce respecto a la fase anterior con la cal a 10 MPa es similar a la comentada en el caso del cemento, en este caso para ambos porcentajes de cenizas. Se produce una disminución a 7 días del 10% de aditivo residual utilizado para superar la inmersión en agua a esa fecha y una reducción del 1,5% de la absorción de agua con respecto a las mismas combinaciones con cal hidráulica sin cenizas.

En comparación con la fase II las combinaciones a 5 MPa, no mejoran en cuanto a su capacidad de impermeabilidad al agua, ni reducen la cantidad necesaria de aditivo para superar el ensayo de absorción. Incluso la combinación que utiliza un 8% de cenizas registra de media un 0,7% más de absorción de agua que la misma combinación sin cenizas de la fase anterior.

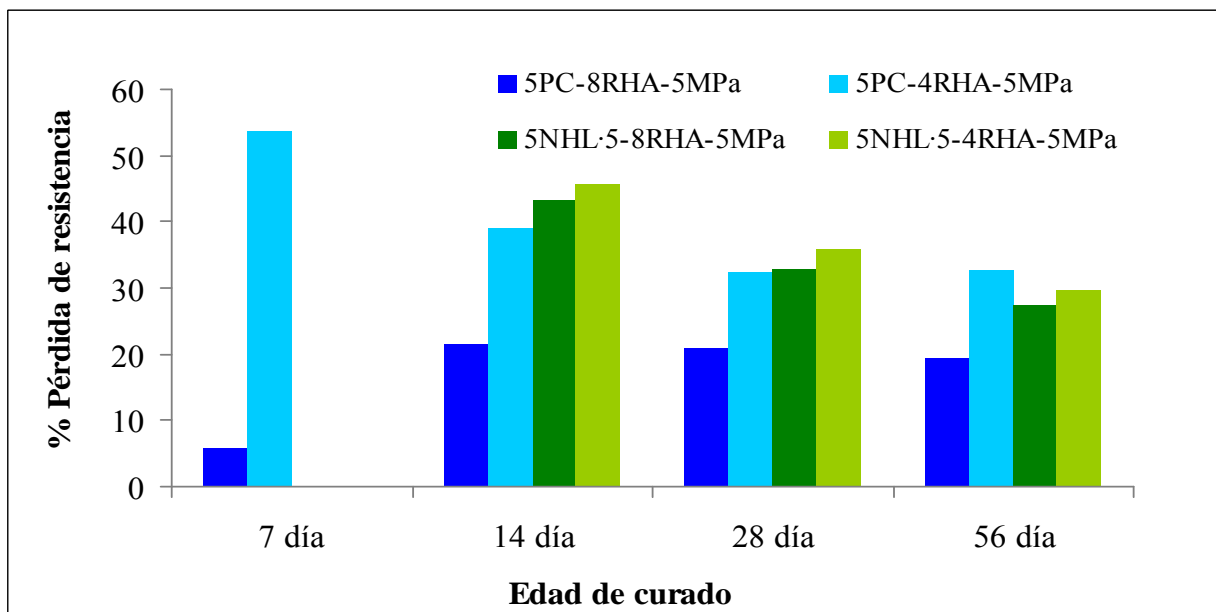
De estos resultados se deriva el descarte de las combinaciones a 5 MPa con cenizas ya que no resultan muy eficaces, además tanto a 10 MPa como a 5 la combinación óptima es la que utiliza el 8% de cenizas de cáscaras de arroz.

## **PÉRDIDA DE RESISTENCIA PRODUCIDA POR LA ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS PROBETAS**

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a compresión simple realizadas a las combinaciones procedentes de la fase III que superaron el ensayo de absorción. Se rompieron las probetas que tenían 7 días de curado ya que se consideró una fecha mínima para que los resultados fueran significativos. Esta prueba se realizó con el fin de comprobar qué consecuencias sobre las propiedades mecánicas de las mezclas tenía el sumergir las probetas durante 24 horas en agua.



**Fig. 36. Pérdida de resistencia tras inmersión de las combinaciones de cemento y cal hidráulica con cenizas de cáscara de arroz a 10 MPa.**



**Fig. 37. Pérdida de resistencia tras inmersión de las combinaciones de cemento y cal hidráulica con cenizas de cáscara de arroz a 5 MPa.**

En ambas gráficas cabe destacar que, exceptuando la combinación 5PC-4RHA-5MPa a 7 días, ninguna de las probetas sufrió pérdidas de más del 50% comparando éstas con las mismas combinaciones ensayadas a compresión simple en condiciones estándar de curado. Por otro lado, en la mayoría de los casos, se observa como se producen mayores

disminuciones de resistencia en las combinaciones que contienen menor cantidad de cenizas (4% de RHA).

En cuanto al cemento, cabe señalar que se producen las mínimas pérdidas en la mezcla con un 8% de cenizas a 5 MPa. En referencia a la cal hidráulica, son las combinaciones con un 8% de cenizas de cáscaras de arroz a 5 y 10 MPa las que tras el ensayo de absorción, sufren una menor pérdida de resistencia a compresión simple. Como antes ya se ha concluido, las combinaciones que utilizan un 8% de cenizas en vez del 4% son más eficaces.

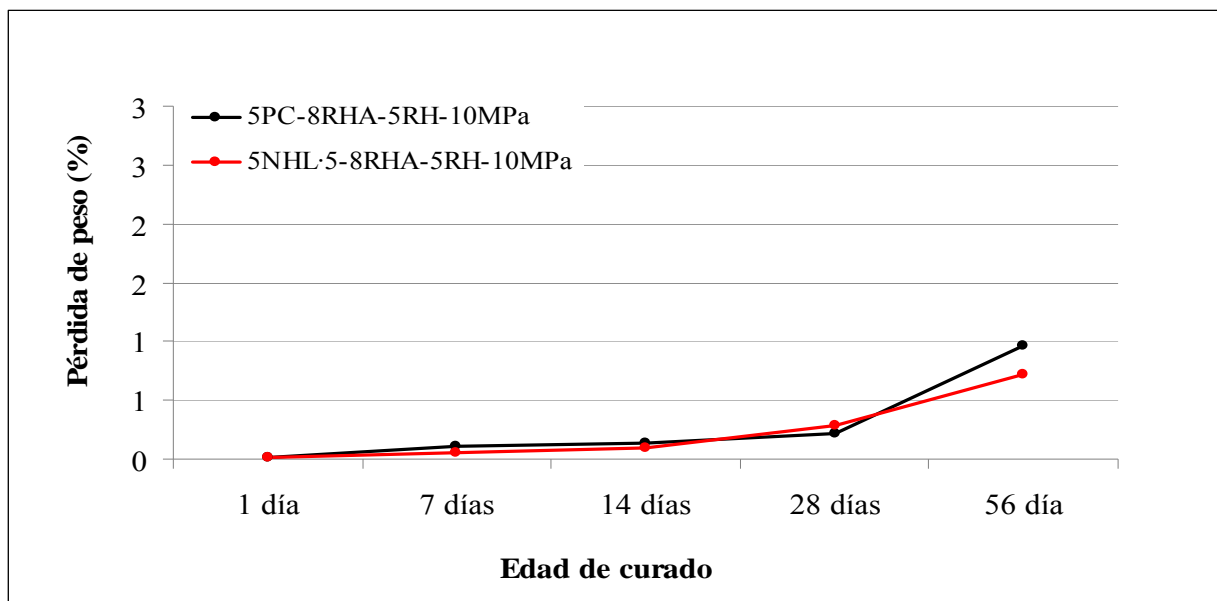
No obstante, estos resultados son muy satisfactorios ya que las pérdidas son relativamente pequeñas teniendo en cuenta que estas probetas han estado 24 horas sumergidas en agua. Cabe destacar que conforme se ha realizado el ensayo con las combinaciones con más edad de curado, las pérdidas tan solo son de entorno al 30% en la mayoría de los casos.

## 5.4. FASE IV

En esta última fase de la campaña, se añaden las cascarillas de arroz que completarán a la cal hidráulica y a las cenizas de cáscara de arroz, en la combinación que será resultante del ecoladrillo definitivo propuesto. Para la determinación de la cantidad de RH que iba a ser utilizada, se realizaron unas pruebas experimentales previas: para un mismo volumen de mezcla, se iba añadiendo en proporciones 1:1, 1:2... hasta determinar el 5% como la cantidad óptima para ensayar. A continuación se muestran todos los ensayos realizados a las combinaciones definitivas, la de cemento como referencia, a diferentes edades de curado: 1, 7, 14, 28 y 56 días.

### VARIACIÓN DEL PESO CONFORME AVANZA LA EDAD DE CURADO

Las pérdidas de peso registradas en esta última fase destacan por ser mínimas con respecto a las fases anteriores. En la gráfica inferior se observa como ambas combinaciones mantienen la tendencia creciente vista en las fases anteriores: conforme avanza el tiempo de curado, las probetas sufren una pérdida de peso mayor.



**Fig. 38. Pérdida de peso sufrida por el avance del tiempo de curado, por las combinaciones finales con un 5% de aditivo comercial, 8% de cenizas y 5% de cáscaras de arroz.**

El incremento de pérdida de peso que se produce entre un periodo y otro de curado es muy similar entre la combinación de referencia y el *ecoladrillo*. La máxima diferencia es de aproximadamente el 0,06%, el día 7 es el cemento el que sufre más de pérdidas que *ecoladrillo*, y el día 28 es al contrario. A partir del día 14, es cuando la mezcla con cal hidráulica pierde más peso que la combinación de referencia. Esto era de esperar, ya que el cemento tiene una mayor capacidad de endurecimiento con lo que en cuanto esto ocurre, las pérdidas de peso son menores.

Las pérdidas de peso son hasta los 28 días similares a las de la tercera fase, esto quiere decir que la adición de las cascarillas de arroz no supone mayores pérdidas de peso, no implican una desecación irregular o prematura. A los 56 días, se produce una pérdida de peso del *ecoladrillo* de 0,24% menos que la combinación de referencia, registrando ambas combinaciones definitivas una pérdida de peso de menos de un 1%. Por otro lado, la máxima diferencia entre la fase anterior, que registra mayores pérdidas de peso, y esta última fase es de 1,74% en el caso del cemento y 1,24% en la cal, ambas referidas a los 56 días.

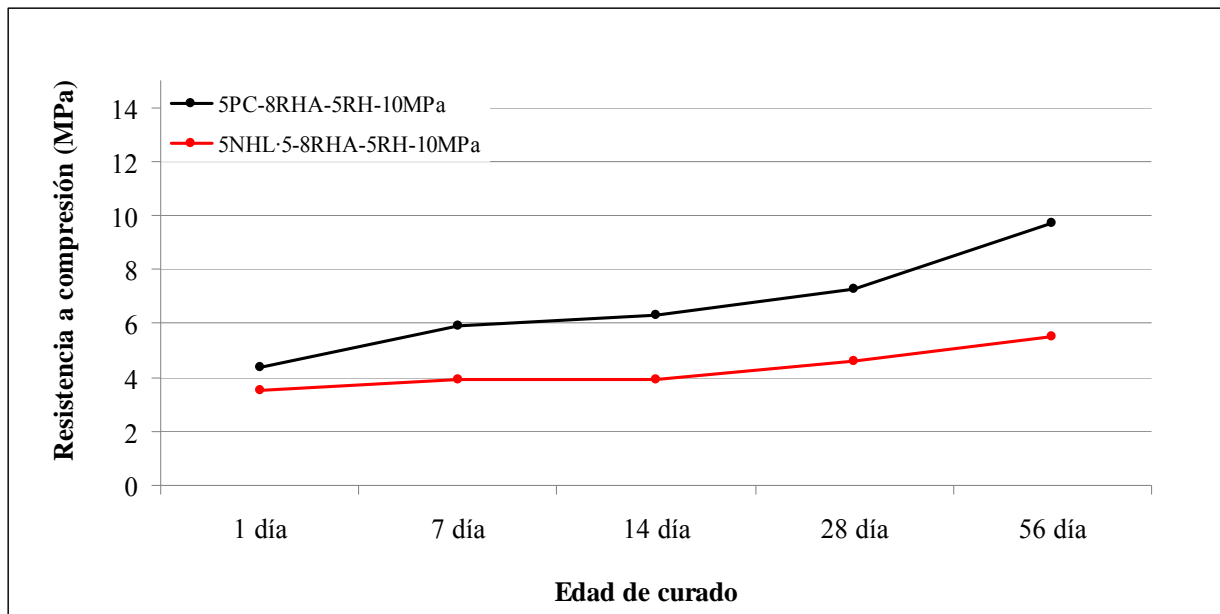
Analizados los resultados, cabe destacar que la adición de cascarillas de arroz a la mezcla implica una menor pérdida de humedad en las piezas. Por último, recalcar la importancia que tiene la obtención de tan bajas pérdidas de peso ya que esto implica que los resultados que se obtienen en los demás ensayos son fiables. Estas pérdidas, como en las anteriores fases, son debidas a la pérdida de humedad por desecación y al efecto cementante de los aditivos. Garantía además, de que la metodología seguida para envolver las probetas es muy acertada.

## **DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE**

A continuación se observan los resultados obtenidos por el *ecoladrillo* con la mezcla realizada de referencia. Aunque entre los días 1 y 7 las diferencias son algo menores, a partir de la semana de curado, el cemento logra más de un 35% de aumento de resistencia en comparación con la combinación de cal hidráulica, incluso a los 56 días registra un



incremento mayor del 43%. Esta diferencia es un 10% más acentuada que la producida en la fase III entre las combinaciones con cenizas de cemento y cal hidráulica.

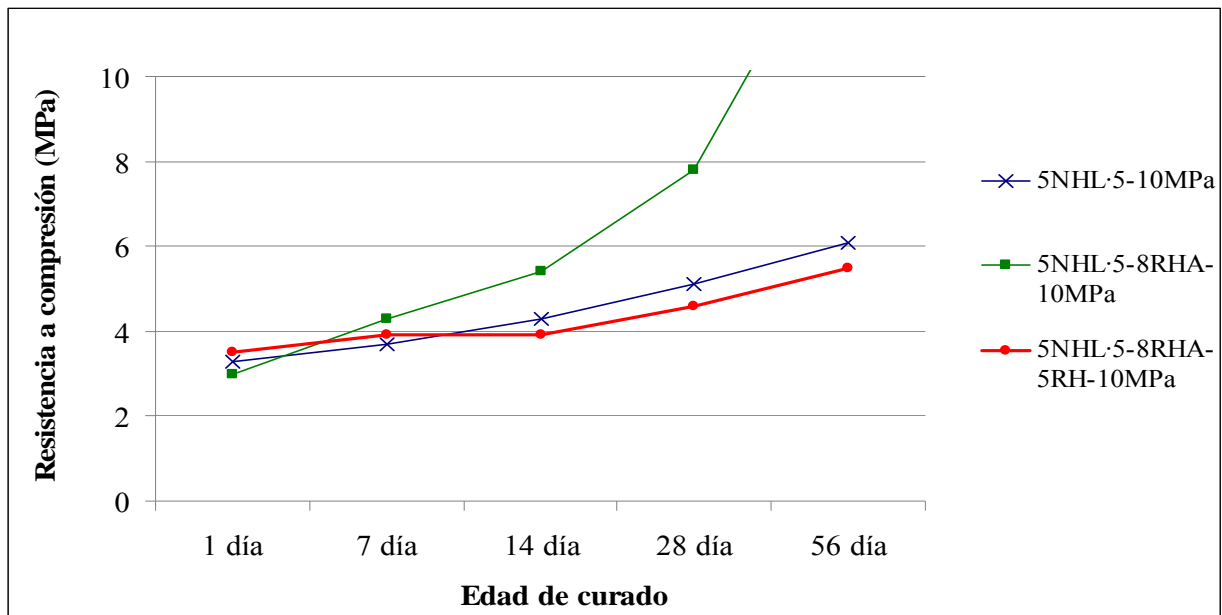


**Fig. 39. Ensayo de resistencia a compresión simple de las combinaciones con 5% de aditivo comercial, 8% de cenizas y 4% de cáscara de arroz a 10 MPa.**

Destaca la pérdida de resistencia que se produce una vez que se añade la cáscara de arroz a la mezcla, y más acentuada aún cuanto mayor tiempo de curado tiene la probeta. Aunque claramente aligera el ladrillo, la diferencia entre la combinación con cáscara y sin ella es de incluso el 60% a los 56 días en el caso de la cal hidráulica. En el caso del cemento, la diferencia máxima registrada entre la fase III y la IV, también a los 56 días, es de aproximadamente el 35% de pérdida de resistencia.

Hasta la semana de curado se obtienen, para ambos casos, los mismos niveles de resistencia que el ladrillo solo con cenizas. Parece ser, que la adición de las cascarillas de arroz modifica la estructura interna de la pieza causándole las pérdidas de resistencia a rotura ya comentadas.

En el siguiente gráfico (figura 40) se muestra la variación que se produce en la resistencia de la pieza conforme se han ido añadiendo aditivos a la mezcla compactada a 10 MPa que conforma el *ecoladrillo* definitivo compuesto por un 5% de cal hidráulica natural, un 8% de cenizas de cáscara de arroz y un 5% de cascarillas de arroz.

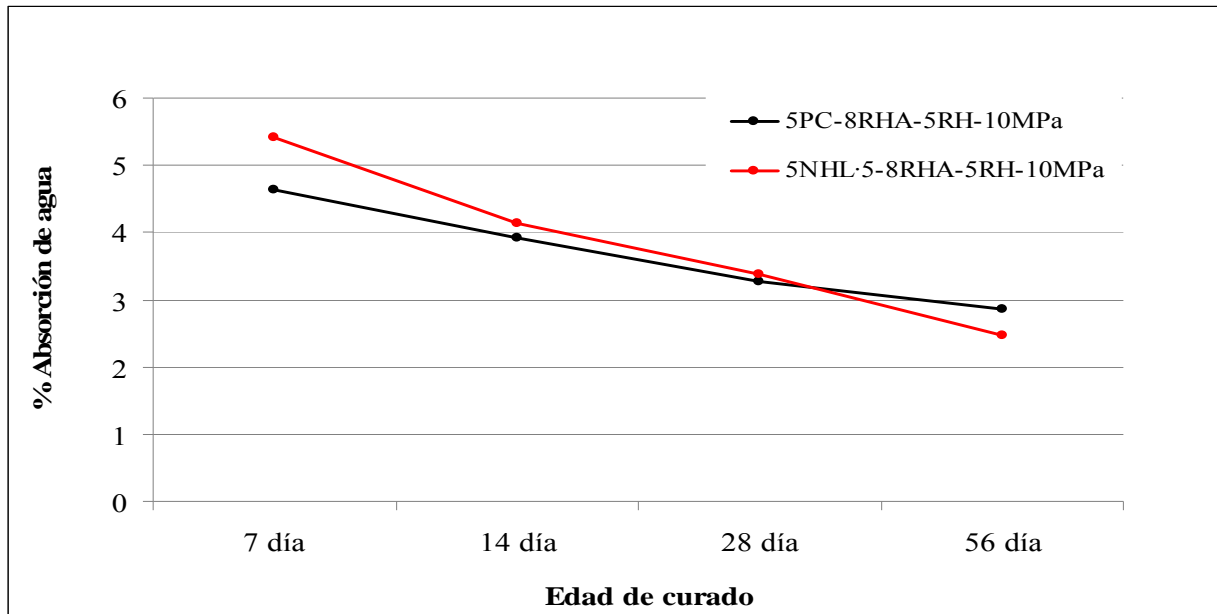


**Fig. 40.** Variación de la resistencia conforme avanza el tiempo de curado y según se va añadiendo a la mezcla el aditivo resistente (cenizas de cáscara de arroz) y el aditivo estructurante (cascarilla de arroz).

Es positivo que aunque, la diferencia entre el uso de cascarilla o no en el ladrillo sea tan grande, el *ecoladrillo* sigue manteniendo niveles de resistencia a compresión simple similares a los que se obtenían solo con el suelo y la cal hidráulica.

## VALORACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS PROBETAS

El ensayo de absorción en esta fase IV se realiza a las siguientes edades de ensayo: 1, 7, 14, 28 y 56 días. Ninguna combinación de las representadas supera la inmersión en agua a 1 día por lo que no aparece representado en los gráficos siguientes. A continuación se muestran (figura 41) los resultados obtenidos del porcentaje de absorción del *ecoladrillo* en comparación con el ladrillo fabricado de referencia con cemento.



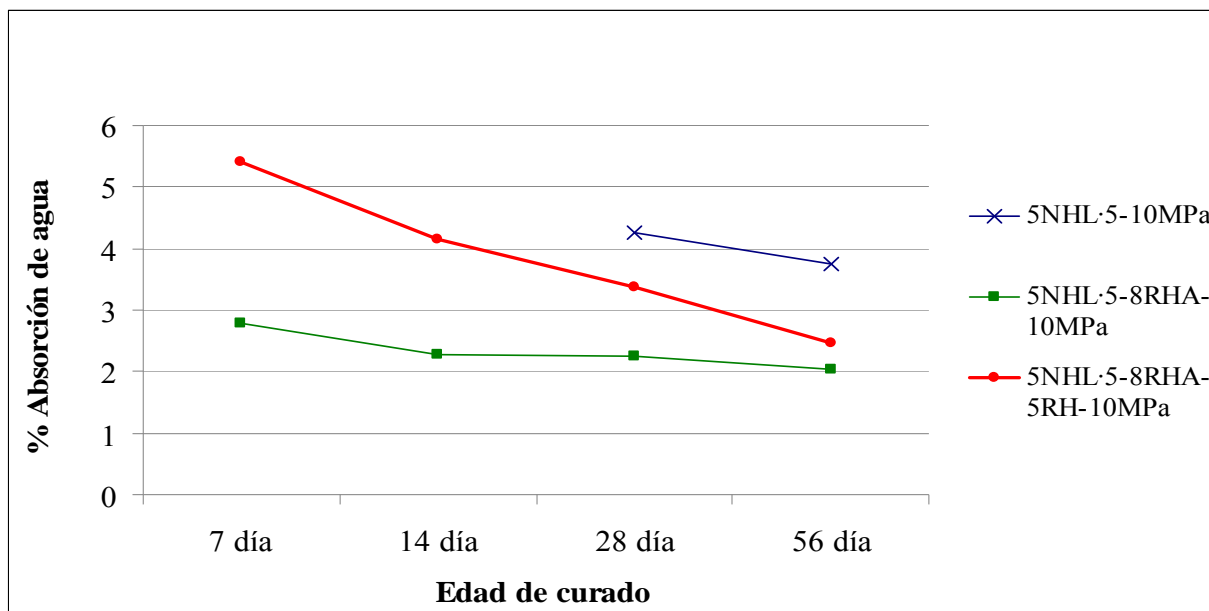
**Fig. 41. Porcentaje de absorción de agua conforme avanza el tiempo de curado del ecoladrillo y del ladrillo de referencia con cemento.**

La máxima diferencia existente entre la combinación definitiva y la de referencia se observa el día 7, siendo la absorción de 1% más la del *ecoladrillo*. No obstante, entre los 7 y 14 días, ese nivel disminuye en ambos hasta prácticamente igualarse a partir de los 14 días, manteniendo esta tendencia hasta el último de ensayo. A los 56 días ambas combinaciones registran un porcentaje de absorción entorno al 0,8%.

Es interesante resaltar las diferencias mínimas que hay a partir de los 14 días, y más aún a partir del mes de curado, entre las combinaciones con cemento y cal hidráulica ya que esto implica que para la cal son resultados muy buenos puesto que el cemento ha sido tomado como referencia por ser el aditivo comercial más usado por sus excelentes datos de resistencia. Como conclusión de este ensayo de absorción, se puede decir que la edad de curado de las probetas es clave para obtener mejores resultados; óptimos según el porcentaje de absorción de las piezas sea menor ya que significará que soportan mejor condiciones de inundación y que prácticamente, no se ven afectadas por las mismas ya que es importante que los ladrillos estén aislados del medio y no se ven afectados por ningún tipo de agente erosivo.

Destaca el poder de absorción que tienen las cascarillas de arroz ya que a 7 días, absorben casi un 15% más de agua que la misma combinación pero sin las cáscaras de arroz (ver figura 42). De hecho, el nivel de absorción es de los más altos registrados en todas las campañas, alcanzando prácticamente el 5,5%. No obstante, conforme avanza la edad de curado del *ecoladrillo* el porcentaje de absorción disminuye en gran medida (entre el primer día y el último de ensayo en un 0,82%) y se mantiene en niveles menores que los obtenidos en los ensayos de absorción de la misma combinación pero sin ningún tipo de aditivo residual añadido. Esto refleja que el *ecoladrillo*, a partir del mes de curado, mejora sus propiedades resistentes al agua ya que absorbe menos porcentaje de agua que si elaboráramos el ladrillo con solo aditivo comercial. Es más, en el caso del cemento, utilizado como referencia durante toda la campaña, el ladrillo elaborado con solo PC no aguantaba a ninguna edad de curado estudiada. Además, para este caso, no existen apenas diferencias entre la capacidad de absorción de agua del ladrillo con cemento, cenizas y cáscaras; y la misma pieza pero sin las cascarillas.

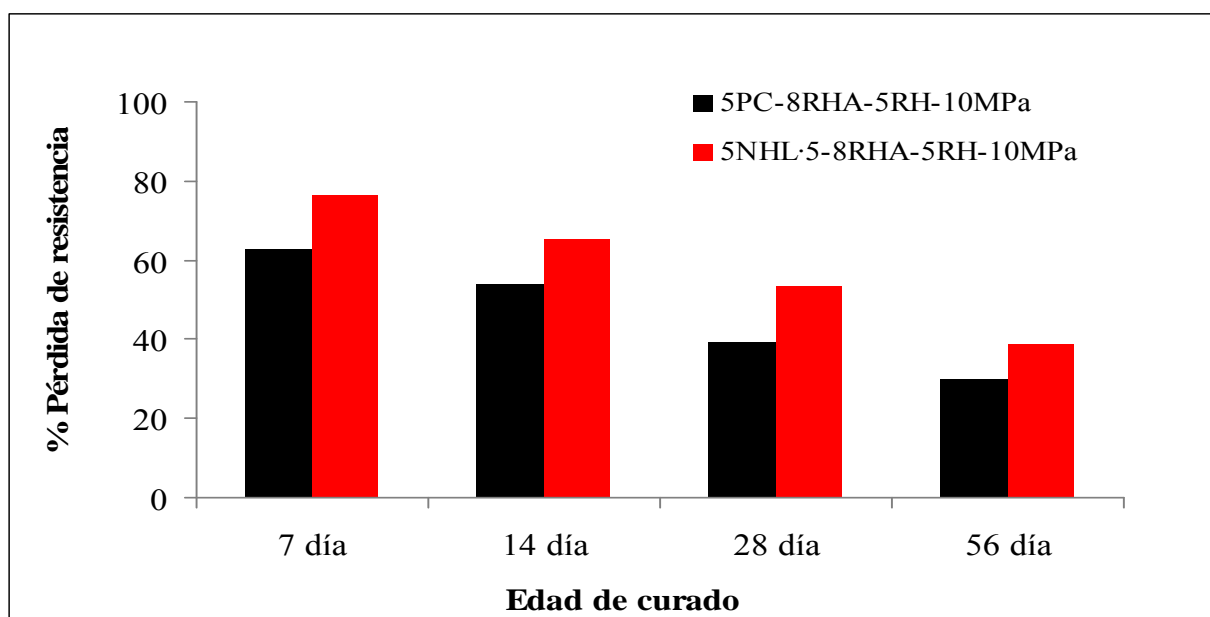
Hay que reiterar el hecho de que ninguna combinación ensayada a absorción supera el 6% de absorción de agua, dato que los fabricantes de mampostería cocida industrial marcan como límite máximo.



**Fig. 42. Variación de la absorción de agua según se va añadiendo a la mezcla el aditivo resistente (cenizas de cáscara de arroz) y el aditivo estructurante (cascarilla de arroz).**

## PÉRDIDA DE RESISTENCIA PRODUCIDA POR LA ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS PROBETAS

Esta prueba se realizó con un mínimo de 7 días de curado para garantizar un mínimo de cohesión entre partículas. Igualmente que en la fase anterior, el objetivo de este ensayo era comprobar que consecuencias tenía el sumergir las probetas durante 24 horas en agua sobre la capacidad de resistencia a compresión simple de las mezclas.



**Fig. 43. Pérdida de resistencia tras inmersión de las combinaciones de cemento y cal hidráulica con cenizas de cáscara de arroz y cascarillas de arroz a 10 MPa.**

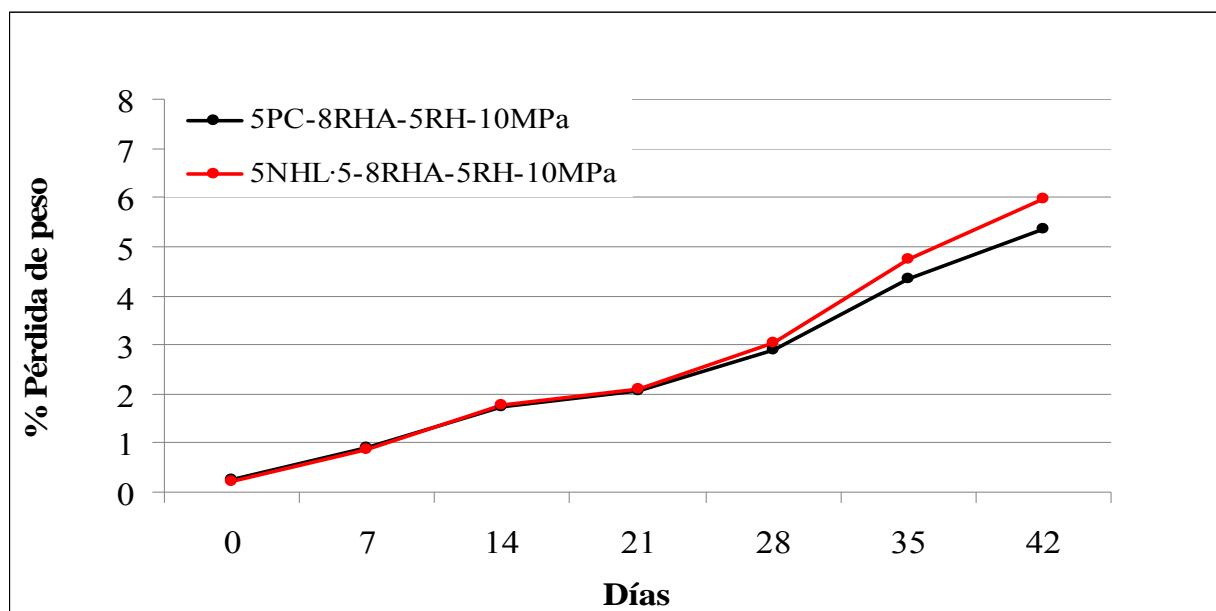
Entre la combinación de referencia y la combinación que conforma el *ecoladrillo*, en todas las edades ensayadas, existe una diferencia de un 13% de media. Estos resultados son lógicos ya que el cemento, como ya se ha comentado anteriormente, tiene una mayor capacidad de endurecimiento y, como hemos visto antes, su absorción de agua es menor, por tanto sus propiedades mecánicas se ven menos afectadas.

Al comparar estos resultados con los obtenidos en la fase III, se descubre que en el caso de las combinaciones de referencia existe, por mayoría, una diferencia del 10% de pérdidas entre las mezclas sin cascarillas y con ellas. En cuanto a las combinaciones de cal hidráulica, las diferencias entre una fase y otra son mayores, de un 30% más de

pérdidas registradas en las combinaciones que contienen el aditivo estructurante. Hay que resaltar que únicamente a partir de los 28 días de curado, las pérdidas de resistencia no superan el 50% de las mismas.

## DURABILIDAD FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO

A continuación se muestra el ensayo de heladicidad realizado a los ladrillos definitivos durante 21 ciclos de hielo/deshielo. No obstante, estas piezas quedan a disposición del Departamento de Ingeniería Rural de la UPNA para finalizar el seguimiento de las mismas hasta los 45 ciclos de hielo/deshielo. Matizar que en la fase II se muestran los resultados agrupados por el tipo de aditivo comercial empleado porque se observó, como ya se ha detallado en dicha fase, que las combinaciones con PC que estaban sin envoltura tenían otro comportamiento diferente a las de NHL·5 que fueron ensayadas con envoltura. Por ello, otra de las razones por las que se determinó la realización de este ensayo, era para comprobar como ensayando las probetas selladas el comportamiento entre la cal hidráulica y el cemento era el mismo durante todos los ciclos de hielo/deshielo.



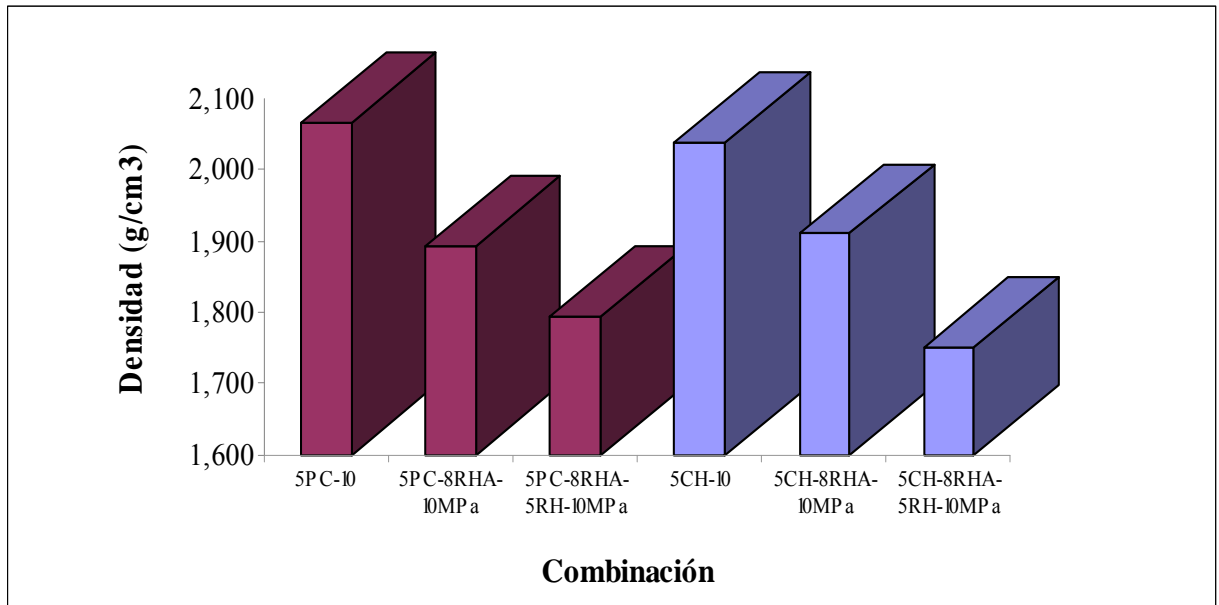
**Fig. 44.** Pérdida de peso durante 21 ciclos de hielo y deshielo de los ladrillos con un 5% de aditivo comercial, 8% de cenizas y 5% de cáscaras de arroz

Hay que tener en cuenta que el día 0 hace referencia a la pérdida de peso que ha registrado la probeta con 7 días previos de curando antes de empezar los ciclos de hielo-deshielo.

Como se observa en la figura 44, ambas combinaciones siguen la misma tendencia: conforme avanzan los ciclos de 48 horas de hielo/deshielo, la pérdida de peso que sufren las probetas es mayor. La mayor diferencia se registra a los 35 días, siendo 0,4% mayores las pérdidas que sufre el *ecoladrillo* que la combinación de referencia. Asimismo, los incrementos en la disminución de peso entre una semana y otra, conforme avanza el ensayo son prácticamente iguales para el cemento y la cal hidráulica. El incremento entre los días 0-7, 7-14 y 21-28 es de 0,8% aproximadamente. Entre las semanas 2 y 3 de ensayo las pérdidas prácticamente se mantienen. A partir del día 28 se produce un incremento en la disminución de peso de las probetas del 1,6% y en el último periodo ensayado las pérdidas de peso aumentan hasta alcanzar prácticamente el 6% de disminución de peso con respecto a la probeta en el momento de comenzar el ensayo.

## 5.5. RELACIONES DE DENSIDAD

A continuación se presentan las variaciones de densidades que se producen a lo largo de las diferentes fases de la campaña.



**Fig. 45. Variación de la densidad según la combinación realizada.**

Se observa claramente conforme se añaden a la mezcla los aditivos residuales seleccionados la densidad disminuye notablemente. Entre ambos aditivos principales, el cemento y la cal hidráulica natural, las densidades obtenidas son similares.

La diferencia que se produce entre la combinación con solo cemento y la que añade las cenizas de cáscaras de arroz es del 8%, la misma diferencia pero referente a la cal hidráulica supone un 6% de densidad menos en las combinaciones que incluyen las cenizas. Igualmente la diferencia de densidad entre la combinación con cenizas y el *ecoladrillo* es del 5% para las combinaciones con cemento, y del 8% para las de cal hidráulica.

Resultados realmente que justifican la adición de las cáscaras de arroz como aditivo estructurante. Esta propuesta totalmente innovadora pretende a la vez que mejorar las propiedades mecánicas del ladrillo, favorecer la estructura del mismo y minimizar la densidad en la medida de lo posible.



## 6. CONCLUSIONES

El producto final denominado “*ecoladrillo*” satisface completamente las expectativas de este trabajo. Este nuevo tipo de ladrillo puzolánico ecológico sin cocción, incrementa su valor ecológico al contener como componentes del mismo, aditivos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, sobre todo por el ahorro energético que se produce en el proceso de su fabricación. El *ecoladrillo* está hecho con un suelo arcilloso, marga gris, 5% de cal hidráulica natural, 8% de cenizas de cáscaras de arroz residuo de la industria de la biomasa, y un 5% de cascarillas de arroz subproducto de la cosecha del mismo. Es un producto con óptimas características mecánicas, obteniéndose buenos resultados de resistencia a compresión y a inmersión en agua, y excelente durabilidad frente a temperaturas extremas, además la apariencia del mismo es totalmente innovadora.

Las conclusiones derivadas del estudio y realización de las campañas experimentales son las siguientes:

- Las relaciones obtenidas de humedad y densidad máxima de compactación son los adecuados para cada combinación ensayada. De ellos se extrae que conforme el nivel de compactación de los ladrillos es menor y el porcentaje de aditivo añadido es mayor, las necesidades de agua para alcanzar el contenido óptimo de humedad para el curado son mayores y la densidad máxima de compactación es menor.
- Las densidades obtenidas para las combinaciones realizadas a 5 y a 10 MPa difieren menos entre ellas que entre 5 y 1 MPa. Esto es, incluso para el suelo solo las diferencias son del 3% entre 5 y 10 MPa, y del 7,5% entre 5 y 1 MPa.
- La cal hidráulica natural resulta un aditivo que tiene mayores necesidades de agua que el cemento, requiriendo un 0,9% más de agua que el cemento a 10 MPa, un 0,5% más a 5 MPa, y un 0,3% más a 1 MPa. En cuanto a las densidades, esta disminuye en mayor proporción que para el cemento.
- Es fundamental que la cantidad de agua añadida sea lo más cercana posible al contenido óptimo de humedad de la mezcla ya que es clave para el buen desarrollo

de las reacciones puzolánicas. De hecho, cualquier variación en este dato tiene gran repercusión en las propiedades mecánicas de la pieza.

- El buen sellado de las probetas garantiza que las pérdidas de peso que se producen durante el tiempo de curado sean debidas a la pérdida normal de humedad por desecación y al efecto cementante de los aditivos. Hay que tener en cuenta que de producirse una desecación acelerada, la resistencia y durabilidad de las probetas se ve claramente mermada.
- Con respecto a las variaciones de peso, según avanza la edad de curado de los ladrillos, las pérdidas de peso aumentan, siendo estas mayores si el nivel de compactación empleado es menor. Además, solo en el caso de las combinaciones con cenizas 10 MPa, a partir de los 56 días sufren mayores pérdidas de peso que sin ellas. En cambio, la adición a la combinación de las cascarillas de arroz no aumenta la pérdida de peso mas que las obtenidas con solo las cenizas.
- Con respecto a la resistencia, se ha comprobado que a mayor edad de curado de las piezas, la resistencia alcanzada es mayor. Conforme el nivel de compactación empleado es menor, las diferencias entre ambos aditivos estudiados es mayor. Los mayores incrementos de resistencia se producen a partir de los 56 días de curado, siendo especialmente clave el mes de curado.
- Con la adición de cenizas de cáscaras de arroz aumenta significativamente la resistencia mecánica de las probetas, incluso se reduce sustancialmente la diferencia de resistencia existente entre las combinaciones con cemento y cal hidráulica. Además, conforme la cantidad de cenizas es mayor, y mientras no se sature la mezcla, la resistencia alcanzada por el ladrillo es más alta. No obstante, las combinaciones realizadas con cenizas a 5 MPa, el empleo de un máximo de cenizas no garantiza la obtención de buenos resultados de resistencia a compresión simple.
- Las combinaciones seleccionadas con un 8% de cenizas a 10 MPa se consideran la óptima a 56 días de curado ya que mejoran en un 70% su resistencia con respecto a las mismas combinaciones pero a 5 MPa y en más de un 100% que las

combinaciones sin cenizas. Un 4% de cenizas no es suficiente para obtener los mejores resultados, aún así mejoran, a ambos niveles de presión, un máximo de 60% más de resistencia que sin cenizas.

- La resistencia obtenida por las combinaciones con cenizas se ve sustancialmente disminuida por la adición de las cascarillas de arroz. Esto se debe a que las cáscaras dañan la estructura interna de la pieza. No obstante, aunque prácticamente se anula el incremento de resistencia que se produce por las cenizas, se mantienen las resistencias alcanzadas por las combinaciones con el aditivo comercial, superando en ocasiones estas mismas marcas.
- El ensayo de absorción resulta muy restrictivo y ninguna de las combinaciones lo supera con 1 día. Se producen mayores resistencias a inmersión en agua conforme el nivel de compactación de las piezas es menor. Además, conforme avanza la edad de curado de las mismas y el porcentaje de aditivo cementante aumenta, el porcentaje de absorción de agua disminuye. En general, la cal hidráulica natural supera mejor el ensayo de absorción ya que, por mayoría, resisten más combinaciones de cal que de cemento y el porcentaje de absorción en las mezclas de cal hidráulica es menor.
- Sin embargo, conforme se le añaden las cenizas y las cáscaras de arroz, los ladrillos resisten mejor este ensayo. Cabe destacar también que ninguna de las combinaciones supera el 6% de absorción. Con la adición de cenizas a la mezcla se logra una disminución del 10% del aditivo cementante y se disminuye el porcentaje de absorción en un 1,1% en el caso del cemento, y en 1,5% menos en el caso de la cal hidráulica.
- La combinación óptima resultante del ensayo de absorción es la que contiene un 8% de cenizas ya que tiene una menor capacidad de absorción puesto que está más endurecida y así permite una menor entrada del agua. Las combinaciones realizadas a 5 MPa con cenizas quedan descartadas ya que no presentan mejoras en el ensayo de absorción con respecto a las mismas mezclas sin cenizas. La combinación que conforma el ladrillo final no presenta diferencias entre el

cemento y la cal, y además absorben menos agua que las primeras combinaciones con solo aditivos comerciales.

- La inmersión durante 24 horas en agua de las probetas modifica notablemente las propiedades mecánicas de las mismas. Es interesante como a pesar de ello, en las combinaciones con cenizas las pérdidas de resistencia con respecto a un curado estándar, no superan el 50%. Incluso a 56 días las pérdidas registradas son del 30%. En las combinaciones finales sometidas a rotura tras inmersión, se obtienen mayores pérdidas, entorno al 10% y al 30% con respecto a las combinaciones sin cascarilla de cemento y cal hidráulica respectivamente.
- En el ensayo de heladicidad es clave proteger los ladrillos con un buen sellado para evitar desecaciones bruscas y garantizar la propia humedad de la probeta. En este ensayo y cuanto el nivel de compactación y el porcentaje de aditivo menor, se producen mayores pérdidas de peso. Frente a los ciclos de hielo/deshielo el cemento y la cal hidráulica se comportan de la misma manera: conforme avanzan los días, las pérdidas de peso son mayores, en ningún caso superando el 8% de pérdida.
- Los ciclos de hielo/deshielo afectan a las propiedades mecánicas de los ladrillos. Es importante que tras el ensayo de heladicidad si se va a realizar una prueba de resistencia a compresión simple, se compruebe que el núcleo de la probeta no sigue helada ni que la misma ha sufrido una brusca desecación. En este ensayo no existen diferencias en la tendencia y el comportamiento de la cal hidráulica y el cemento, obteniéndose prácticamente las mismas pérdidas de peso para ambas.
- Cabe resaltar que las pérdidas de resistencia tras el ensayo de heladicidad no superan el 15%, interesante ya que han sufrido 1080 horas de temperaturas bajo cero, 5 veces más horas que las estipuladas por la norma.
- Con respecto a los niveles de densidad, ha quedado patente con este estudio que se obtiene una disminución máxima de la densidad de entorno a 13,5% menos con la adición de las cenizas y las cascarillas de arroz a la mezcla.

- Como conclusión final de este trabajo de experimentación cabe decir que es importante entender el producto diseñado según para qué se ha creado. Por eso, me gustaría añadir, que fase III de este proyecto ha demostrado que la elaboración de ladrillos con arcilla, cal hidráulica natural y cenizas de cáscara de arroz crean un material de mampostería con excelentes propiedades mecánicas por eso sirve como material portante. En cambio, el ecoladrillo estaría más destinado a tabiquería interna, ya que aunque su resistencia merma ligeramente posee excelentes ventajas como su baja densidad y se prevé como buen aislante.

## 7. VALORACIÓN PERSONAL

Con esta novedosa propuesta de fabricar ladrillos puzolánicos ecológicos sin cocción se abre un nuevo mercado. En Navarra no existen indicios de ladrilleras ecológicas.

La creación de los ladrillos ecológicos sin duda es una excelente opción de construcción sostenible, no sólo a nivel regional sino a nivel mundial. Además, teniendo en cuenta que el cultivo del arroz se extiende por todo el mundo, los subproductos residuales procedentes de su cosecha, las cáscaras de arroz, aunque gran parte se destinan a la producción de energía, se encuentran en forma de cenizas por millones de toneladas en los vertederos.

El hecho de incluir las cenizas y las cáscaras de arroz en los ladrillos ecológicos permite dar salida a uno de los residuos que se generan en mayor cantidad en todo el mundo. De esta forma, además de crear un nuevo material constructivo para su uso en bioconstrucción, disminuimos el impacto ambiental que las cenizas provocan.

El *ecoladrillo* es un material alternativo que permite una construcción más respetuosa con el medio ambiente y posiblemente más económica que otros sistemas constructivos tradicionales.

Por tanto sería interesante seguir investigando en esta línea para crear un nuevo mercado para la industria de la mampostería viable, sostenible y más comprometido con el medio ambiente.



## **8. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Tras la realización de este trabajo experimental se proponen como nuevas líneas de investigación las siguientes:

▪ **Estudio de las propiedades físicas del ecoladrillo:**

Realización de los ensayos térmicos y acústicos para determinar el nivel de aislamiento frente al fuego (Resistencia y Estabilidad REI), aislamiento acústico y a temperaturas extremas. Esto permitirá una caracterización más completa de este producto. Es esperable que probablemente la novedosa incorporación de la cáscara de arroz a los mismos resulte un excelente aditivo con grandes propiedades aislantes.

▪ **Ladrillo ecológico con lana de oveja:**

La lana de oveja ha sido un producto muy utilizado a lo largo de la historia por sus propiedades resistentes y aislantes, sin embargo en la actualidad apenas tiene mercado y muchos ganaderos simplemente la queman. El estudio de la adición de la lana al ladrillo ecológico realizados a niveles bajos de compactación se prevé una nueva alternativa a los materiales sintéticos. En este sentido, la autora de este trabajo, tras unas pruebas iniciales, prevé interesantísimos resultados.

▪ **Elaboración de un mortero ecológico con propiedades aislantes:**

Hoy en día, en muchas casas de nueva construcción se trabaja con piedra principalmente por estética. No obstante, a nivel de usuario tiene el inconveniente de que se transmiten fácilmente la humedad y dificultan el mantenimiento del calor en las casas. Por eso se propone realizar el rejunte entre piedras con cal hidráulica, material empleado en bioconstrucción, y un material con excelentes propiedades aislantes como son las arcillas.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

## Artículos consultados:

- Goktepe,A.B, Sezer, A., Sezer, G.I., Ramyar, K.,Classification of time-dependent unconfined strength of fly ash treated clay, *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 4, April 2008, Pages 675-683.
- Guney Y., Sari D., Cetin M., Tuncan M., Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 2, February 2007, Pages 681-688.
- Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J., 2009. Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology* 107 (2009) 130-139.
- Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J., 2008c. Development of innovative low carbon clay bricks. *Proceedings of the 2nd International Conference on Learning from Earthen Architecture in Climate Change 2008 (Kerpic'08)*, Cyprus International University, Lefkosa Northern Cyprus. ISBN: 978-975-6002-07-0, pp. 291–297.
- Raask. E. 1975. Pozzolanic activity of pulverized fule ash. *Cement and Research Concrete*. 5 (4), 363-375.
- Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J., 2008a. Developing unfired stabilised building materials in the UK, *Proceedings of ICE. Journal of Engineering Sustainability* 161 (4), 211–218. doi:10.1680/ensu.2008.161.4.211.
- Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J., 2008b. Using slag for unfired-clay masonry bricks. *Proceedings of ICE, Journal of Construction Materials* 161 (4) 147–155. doi:10.1680/coma.2008.161.4.147.

- Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J., 2008c. Development of innovative low carbon clay bricks. Proceedings of the 2nd International Conference on Learning from Earthen Architecture in Climate Change 2008 (Kerpic'08), Cyprus International University, Lefkosa Northern Cyprus. ISBN: 978-975-6002-07-0, pp. 291–297.
- Raask. E. 1975. Pozzolanic activity of pulverized fule ash. Cement and Research Concrete. 5 (4), 363-375.
- Yarbasi, N., Kalkan, E., Akbulut, S., Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives, Cold Regions Science and Technology, Volume 48, Issue 1, April 2007, Pages 44-54.
- C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, J.Petric. Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. Construction and Building Materials 24 (2010) 1462-1468.
- BDA, 2008. Brick Development Association. {online) accesses on the 28/7/2008 <http://www.brick.org.uk/industry-sustainability.html>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Estadísticas. <http://www.fao.org/>.

#### Normativa y documentos oficiales consultados:

- Mapa Geológico de Navarra. 1997. Departamento de Obras Públicas, Transporte y Comunicaciones.

- Internationa Centre for Diffraction Data (ICDD) <http://www.icdd.com/>.
- Bustos, G. 2001. Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes. (PG-3), Ediciones Liteam.
- Unificación de Normativas Españolas. 2003. Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería-Parte 1: Piezas de arcilla cocida, UNE EN 771-1.
- Unificación de Normativas Españolas. 2002. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería -Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión, UNE EN 772-1
- Unificación de Normativas Españolas. 2001. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería -Parte 13: Determinación de la densidad absoluta seca de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería (excepto piedra natural), UNE EN 772-13
- Unificación de Normativas Españolas. 2001. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería -Parte 1: Determinación de las dimensiones, UNE EN 772-16
- Unificación de Normativas Españolas.2000. Cemento-Parte 1:Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos, UNE EN 197-1.
- Unificación de Normativas Españolas. 2002. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad, UNE EN 459-1
- Unificación de Normativas Españolas. 1994. Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande, UNE EN 103103

- Unificación de Normativas Españolas. 1994. Determinación del límite plástico de un suelo, UNE EN 103104
- Unificación de Normativas Españolas. 1996. Ensayo de hinchamiento libre de un suelo en edometro, UNE EN 103601.
- Unificación de Normativas Españolas. 1997. Ladrillos cerámicos de arcilla cocida-Ensayo de heladicidad, UNE EN 67028 EX
- Unificación de Normativas Españolas. 2001. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería -Parte 11: Determinación de la absorción de agua, UNE EN 772-11.

## 10. ANEXOS



# ANEXO I

## NORMAS UNE

1. UNE-EN 772-1: Determinación de la resistencia a compresión.
2. UNE-EN 772-11: 2001/ A1. Determinación de la absorción de agua.
3. UNE 67028 EX: Ensayo de heladicidad.