



Universidad de Valladolid

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS,  
INGENIERÍA DEL TERRENO Y MECÁNICA DE LOS MEDIOS CONTINUOS  
Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

TESIS DOCTORAL

**INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL  
EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA  
A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO**

AUTOR:

ALFREDO LLORENTE ALVAREZ

DIRECTORES DE TESIS:  
JUAN MONJO CARRIÓ  
MARIA SOLEDAD CAMINO OLEA

**VOLUMEN I**  
TESIS DOCTORAL

Septiembre 2018

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

A mis padres

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

# AGRADECIMIENTOS

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

# ÍNDICE

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

# ÍNDICE

## 0. INTRODUCCIÓN

Introducción	13
Hipótesis	18
Objetivos	19

## 1. EL ESTADO DEL ARTE

1.1. Fundamentos físico-químicos que intervienen en el fenómeno de la capilaridad y la evaporación	27
1.1.1. El fenómeno de la capilaridad	27
1.1.2. El fenómeno de la evaporación	31
1.2. Referencias históricas al fenómeno de la humedad capilar	35
1.3. Estado actual de las investigaciones sobre el fenómeno de la capilaridad	42
1.4. Clasificación actual de los tratamientos de los problemas generados por la humedad capilar	56
1.4.1. Sistemas por aireación o ventilación	56
1.4.2. Sistemas eléctricos	59
1.4.3. Barreras de corte hídrico	61
1.4.4. Ocultación de anomalías	64
1.4.5. Drenajes	65
1.5. Lesiones relacionadas	67
1.6. Normativas	71
1.6.1. Normativas sobre fábricas de ladrillo	71
1.6.2. Normativas sobre ensayos	73

## 2. METODOLOGÍA

76

## 3. LOS MATERIALES Y LAS FÁBRICAS

90

3.1. El Ladrillo	92
3.1.1. Elaboración de ladrillos de tejar. Tipologías y características	92
3.1.2. Descripción de los ladrillos utilizados en la investigación	95
3.2. La argamasa	104
3.2.1. Componentes	106
3.2.1.1. La cal	107

3.2.1.2. La arena	113
3.2.1.3. El agua	114
3.2.1.4. Aditivos	115
3.3. Productos hidrofugantes	119
3.4. Fábricas	126
3.4.1. Descripción de las fábricas ejecutadas para los ensayos	128
<b>4. ENSAYOS DE LABORATORIO</b>	<b>132</b>
4.1. Preámbulo y justificación	133
4.2. Sobre las Probetas	137
4.2.1. Preámbulo y justificación	137
4.2.2. Clasificación	138
4.2.2.1. Probetas normalizadas	138
4.2.2.2. Probetas no normalizadas	141
4.3. Descripción de ensayos e interpretación de resultados	153
4.3.1. Listado y clasificación general de ensayos	159
4.3.2. Tabla resumen de ensayos	162
4.3.3. Descripción y desarrollo de ensayos	167
4.3.3.1. Ensayos normalizados	169
o Ensayo 1: Ensayo según norma UNE-EN 772-11	171
o Ensayo 2: Ensayo según norma UNE-EN 772-7	183
o Ensayo 3: Ensayo según norma UNE-EN 15801	192
o Ensayo 4: Ensayo según norma UNE 67027-84	211
o Ensayo 5: Ensayo según norma UNE-EN 1015-18	221
o Ensayo 6: Ensayos según norma UNE-EN 772-13 y norma UNE-EN 772-3	234
4.3.3.2. Ensayos no normalizados de diseño propio	
Ensayos de verificación de las sondas termohigrométricas	
o Ensayo 7	242
o Ensayo 8	248
Ensayo previo de observación del proceso de capilaridad y de comprobación de la eficacia de la barrera hidrófuga	
o Ensayo 9	254
Ensayo para observación del fenómeno de la capilaridad y de la influencia de la barrera hidrófuga	
o Ensayo 10	264

Ensayos específicos de comprobación de la influencia de las juntas de argamasa en la capilaridad	
o Ensayo 11	318
o Ensayo 12	328
o Ensayo 13	334
o Ensayo 14	339
Ensayo de absorción de humedad del ambiente	
o Ensayo 15	344
Ensayo simultaneo de capilaridad en probetas de argamasa y ladrillo	
o Ensayo 16	359
<b>5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>369</b>
5.1. Introducción	370
5.2. Análisis y discusión de resultados	372
5.2.1. Discusión de resultados sobre la interpretación de los datos del Instrumental	372
5.2.2. Discusión de resultados sobre el comportamiento de las Argamasas	381
5.2.3. Discusión de resultados sobre el comportamiento de los ladrillos	389
5.2.4. Discusión de resultados sobre el comportamiento de las fábricas	395
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>401</b>
<b>7. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>409</b>
<b>8. DIFUSIÓN CIENTÍFICA. ARTÍCULOS Y CONGRESOS</b>	<b>411</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>417</b>
<b>ANEXO. INSTRUMENTAL Y EQUIPAMIENTO</b>	<b>427</b>



## 0. INTRODUCCIÓN

La presencia de agua en las zonas inferiores o zócalos de los edificios antiguos ejecutados con fábricas de ladrillo de tejar y argamasa de cal, debido al fenómeno de la capilaridad, es un hecho muy frecuente y el causante de numerosas lesiones relacionadas con él.

De la observación de este fenómeno en las edificaciones tradicionales ejecutadas con este tipo de fábricas, y a raíz de las investigaciones que se han llevado a cabo dentro del proyecto de investigación **BIA 2010-19245 “Protección frente a la humedad de las fábricas antiguas de ladrillo al descubierto. Estudio del empleo de hidrofugantes en su restauración**, en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas IT MMC y TE en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid, se comienzan a plantear nuevas hipótesis de trabajo.

El germen de la investigación que va a dar lugar a esta tesis doctoral parte de una hipótesis principal, y es que, para este tipo de fábricas, **la retícula continua que conforman las llagas y los tendeles en las juntas de argamasa de cal tiene un papel preponderante en el fenómeno de la ascensión de la humedad por capilaridad en las fábricas de ladrillo**. A raíz de esta hipótesis principal van a surgir otras dos, una es que la interfase que se genera en la superficie de contacto entre el ladrillo y la argamasa ralentiza o dificulta sensiblemente dicho fenómeno; y otra es que al formar los tendeles de la retícula unas bandas continuas y sin interrupciones, su tratamiento, con productos hidrofugantes podría ser un sistema óptimo para generar una barrera que evite la ascensión de la humedad por capilaridad.

Planteadas estas hipótesis de partida el objetivo principal que propone esta tesis tiene una doble vertiente, por un lado, abordar el estudio en laboratorio, mediante el desarrollo de ensayos, del fenómeno de la capilaridad en las fábricas antiguas ejecutadas con ladrillos cerámicos de tejar macizos recibidos con argamasa de cal, y por otro, comprobar cuál es la influencia que en dicho fenómeno tiene la retícula continua que conforman las juntas de argamasa de cal compuesta por las llagas y los tendeles. Estudiando también cómo influye en el proceso de la ascensión capilar de la humedad el tratamiento de la argamasa con productos hidrofugantes, con el fin de comprobar si es un sistema efectivo capaz de funcionar como barrera química de corte hídrico.

Existen en la actualidad líneas de investigación y numerosas publicaciones que abordan el estudio de dicho fenómeno, además de cuantiosa documentación técnica que trata el problema de la ascensión capilar de la humedad tanto desde el punto de vista teórico como experimental, pero del análisis del Estado del Arte que se ha llevado a cabo no se

conoce ningún estudio que se refiera de un modo específico al comportamiento de la humedad capilar en este tipo de fábricas ejecutadas con ladrillos de tejar antiguos recibidos con juntas gruesas de argamasa de cal, y por supuesto cual es la influencia que tienen las juntas en este proceso. Es este vacío en el conocimiento el que justifica el desarrollo de esta tesis que intenta cubrir el vacío existente en este campo.

Uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de la tesis y para la elaboración de las conclusiones finales ha sido la ejecución de numerosos **ensayos** de laboratorio. Unos se han llevado a cabo siguiendo los procedimientos descritos en la normativa existente (normas UNE) y otros se han diseñado "ex profeso" en función de los objetivos que se deseaban conseguir. Con ellos se ha analizado el fenómeno tanto en el conjunto, es decir, sobre fábricas ejecutadas para tal fin, como sobre cada uno de los materiales por separado, la argamasa y el ladrillo. Aunque el estudio se centra principalmente en la influencia que tiene la junta de argamasa en la humedad capilar que afecta a las fábricas, se ha analizado de igual modo el comportamiento y la influencia que tiene en la humedad capilar el ladrillo, porque, como parece evidente, para conocer cuál es la influencia de la argamasa, hemos de hacerlo por comparación con el comportamiento del otro componente de las fábricas, el ladrillo. La investigación se ha llevado a cabo principalmente con ensayos desarrollados en laboratorio porque algunos de los procesos que se han estudiado, los relativos a la ascensión capilar de la humedad y al secado de las fábricas, son tan prolongados en el tiempo que hacían inviable una monitorización y seguimiento en edificios reales. Si bien las líneas de investigación que se han abierto, y en concreto el proyecto de investigación en que se está trabajando actualmente, **BIA 2015-68449R, "Propuesta de evaluación de la humedad que asciende por capilaridad en los muros de fábrica del patrimonio histórico mediante ensayos no destructivos"**, se está desarrollando sobre ensayos de laboratorio, pero también sobre edificios existentes también sobre temas relacionados con la humedad en las fábricas de este tipo. Ambos proyectos de investigación han estado, y están dirigidos por la codirectora de esta tesis, la profesora de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Valladolid, María Soledad Camino Olea.

La investigación se ha centrado en el ascenso de la humedad por capilaridad. Si bien la presencia de humedad en las fábricas puede tener otros orígenes:

- Agua de lluvia, que incide sobre los muros, ya sea de forma directa o por escorrentías debidas a soluciones constructivas inadecuadas o a deterioros del edificio.
- Humedades por condensación superficial exterior o intersticial, del vapor de agua tomado del ambiente o que proviene del interior del local.

- Humedades debidas a la presencia en las fábricas de sales higroscópicas que absorben la humedad del ambiente y lo fijan en ellas. Sales que, o bien están desde un origen en los componentes de las fábricas, o bien se han depositado en ellas al estar disueltas en el agua que ha penetrado en los muros.
- Fugas en instalaciones o hechos accidentales.

La presencia de humedad debida a la capilaridad en las fábricas de ladrillo antiguo ejecutadas con argamasa de cal no sería relevante si no fuese porque es la causante de numerosas lesiones, algunas de cierta importancia, en las edificaciones históricas (Imágenes 1 y 2), muchas de las cuales tienen un valor incuestionable. Algunas lesiones son estéticas y otras devienen en procesos de degradación de los materiales y de la propia fábrica.



**Imágenes 1 y 2. Ermita del Santo Cristo de la Expiración. Nava de la Asunción (Segovia). Se aprecian claramente los efectos estéticos y las lesiones provocadas por la presencia de agua capilar**

La capilaridad es un fenómeno físico ampliamente conocido y estudiado. Influyen en él muchos factores: la estructura interna del material, sobre todo en lo que a la disposición y dimensión de sus poros se refiere; la naturaleza del líquido (el agua en nuestro caso); y otros factores relacionados con la especificidad de las fábricas y del entorno como son: espesor y heterogeneidad del muro, orientación, ventilación de los recintos, temperatura y humedad del ambiente, agua del terreno, etc.

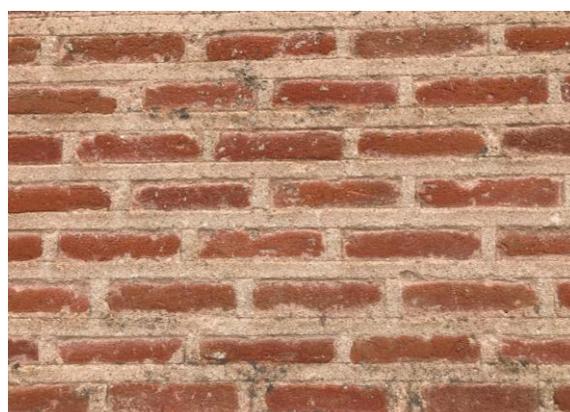
La presencia de agua en el interior de las fábricas, unida a fenómenos como los procesos de hielo-deshielo y la presencia y/o aporte de sales, entre otros, favorece la degradación de este tipo de fábricas.

Los numerosos ensayos realizados en el laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid, por el grupo de investigación del ladrillo, nos han permitido conocer experimentalmente cómo es el fenómeno de la ascensión de la

humedad por capilaridad en estas fábricas y cuál es la influencia de las juntas de argamasa de cal en el proceso. Este equipo de investigación tiene abiertas líneas de trabajo que estudian otras situaciones en las que se aporta humedad a las fábricas, como el agua proveniente de la humedad del ambiente y la que procede de la lluvia, bien por incidencia directa o bien por escorrentía. Todo ello con el fin de desarrollar propuestas de intervención en el patrimonio histórico construido con este tipo de fábricas.

La elección del instrumental necesario para la realización de los ensayos de esta tesis ha sido una decisión fundamental sobre todo por el tipo de datos que se querían obtener: principalmente temperatura, humedad, peso e imagen termográfica. Al estudiar un material, la **argamasa de cal**, que forma parte de un conjunto tan heterogéneo como son las fábricas y sujeto a múltiples factores difíciles de controlar, como son los materiales que lo componen, su dosificación, el amasado, la compactación y el tiempo de curado entre otros, se optó, principalmente pero no en exclusiva, por estudiar el fenómeno desde un punto de vista más cualitativo que cuantitativo, buscando sobre todo la manera de detectar y constatar los procesos de absorción y desorción de la humedad y su posible contención. El uso de las sondas termohigrométricas y de la cámara termográfica ha sido fundamental para comprobar la evolución de dichos procesos.

Por último, es necesario hacer constar que el estudio se ha realizado tomando como referencia las edificaciones, los sistemas constructivos y los materiales pertenecientes a la zona geográfica delimitada, aproximadamente, por el triángulo que forman los municipios de Medina del Campo, Arévalo y Cuéllar, en las provincias de Valladolid, Ávila y Segovia, y su entorno próximo, con el fin de centrar el estudio en un ámbito de características similares. Es ésta una zona llena de magníficos ejemplos de arquitectura histórica, mucha de estilo mudéjar, construida con ladrillo cerámico de tejar macizo y argamasa de cal. Además de las arquitecturas singulares y de mayor entidad, son numerosas las edificaciones de carácter más sencillo ejecutadas con tipologías similares (imágenes 3 y 4).



Imágenes 3 y 4. Ejemplos de fábricas sobre las que se ha realizado el estudio. (Serrada, Valladolid)

Ejemplos notables de este tipo de construcciones son el castillo de la Mota en Medina del Campo (Valladolid) (Imagen 5) y el castillo de Coca (Segovia) (Imagen 6). También existen innumerables muestras de una calidad excelente en iglesias, murallas, puertas y ermitas, entre otros muchos ejemplos edificatorios, en las propias capitales de provincia como en Valladolid, pero también en multitud de municipios como Coca en Segovia, Olmedo en Valladolid, pero también en multitud de municipios como Coca en Segovia, Olmedo en Valladolid, o incluso en otros de menor entidad como Serrada, Matapozuelos, La Seca, Rueda o Ventosa de la Cuesta, todos ellos de la provincia de Valladolid, y por supuesto, en otras muchas más localidades de este entorno geográfico.



Imágenes 5 y 6. Castillo de la Mota (Medina del Campo. Valladolid) y Castillo de Coca (Coca. Segovia). Ejecutados con ladrillos de tejar y argamasa de cal

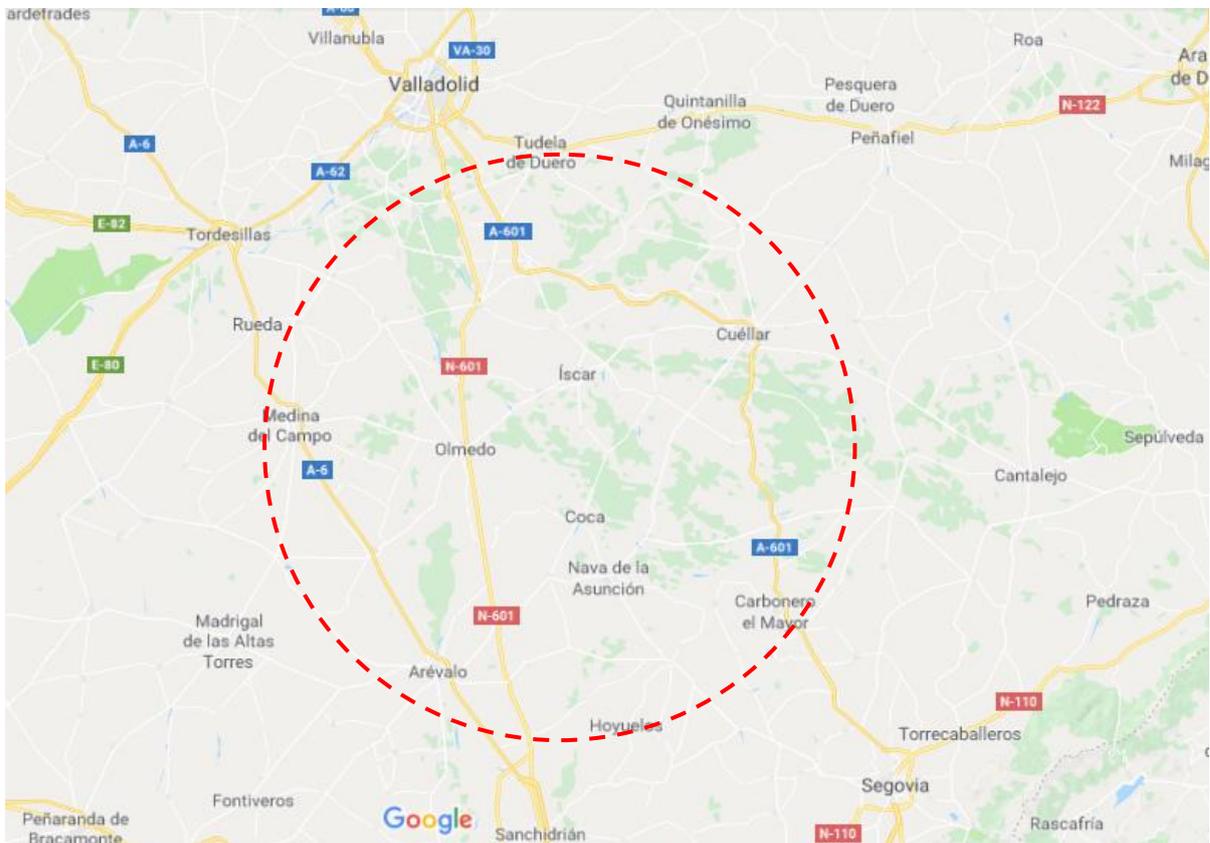


Imagen 7. Mapa de situación. Zona de Medina del Campo, Arévalo, Cuellar y su entorno próximo

## HIPÓTESIS

En las fábricas antiguas ejecutadas con ladrillos de tejar recibidos con argamasas de cal es muy común la entrada de agua debido al fenómeno de la capilaridad.

Si bien ladrillos y argamasas de cal forman parte de un mismo conjunto que denominamos fábricas, muy heterogéneo por cierto, el comportamiento de ambos materiales frente al fenómeno de la capilaridad parece diferir notablemente. Con la peculiaridad de que la argamasa conforma retículas continuas, mientras que el ladrillo es un elemento discontinuo.

A partir de estas premisas, la hipótesis principal de partida es que **las retículas continuas que conforman las llagas y los tendeles de argamasa de cal en las fábricas de ladrillo de tejar tienen un papel preponderante en el fenómeno de la ascensión capilar del agua, favoreciendo dicho fenómeno.**

De esta hipótesis principal se desprenden dos complementarias, -siendo el conjunto de ellas lo que va a dar cuerpo a la presente tesis-, una es que la **interfase** o discontinuidad que se genera en la superficie de contacto entre las caras del ladrillo y la argamasa **ralentiza y dificulta notablemente la ascensión capilar de la humedad.**

La otra hipótesis complementaria es que al conformarse esas retículas continuas, **el tratamiento de dichas juntas de argamasa con productos hidrofugantes mejora notablemente el comportamiento de éstas como barrera de corte hídrico**, impidiendo totalmente o ralentizando sustancialmente el ascenso de la humedad por capilaridad en las fábricas.

## OBJETIVOS

Existen estudios que intentan desarrollar fórmulas que puedan explicar o predecir el comportamiento del movimiento y la ascensión del agua debidas al fenómeno de la capilaridad. Algunos de ellos según parámetros que no tienen en cuenta la evaporación (ley de Jurin); otros añaden variables que relacionan esta altura con parámetros diversos como así lo demuestran las investigaciones de Hall y Hoff <sup>1</sup>, Guimarães<sup>2</sup>, Peixoto<sup>3</sup>, Risch<sup>4</sup>, Mason, y otros.

Pero todos ellos llegan a la conclusión de la dificultad de encontrar fórmulas que permitan predecir con exactitud el comportamiento de la humedad capilar en las fábricas de ladrillo, entendemos que debido a la gran heterogeneidad de las mismas. Heterogeneidad que se debe a varios factores:

- Diversidad en la configuración de las argamasas, ya que son muchos los factores que inciden como: proporción y estado inicial de los materiales en las mezclas, tiempo y forma de amasado, forma de compactado de las masas, tiempo de curado, condiciones medioambientales, tipo de arena y cantidad de humedad que contiene, presencia de finos, tipo de cal, etc.
- Diversidad de comportamiento de los propios ladrillos entre sí, debido tanto al proceso manual de elaboración, por el mezclado y amasado de las materias primas y su posterior manipulación; como al proceso de cocción en hornos de leña y otros compuestos de biomasa, en donde la distinta posición de las piezas dentro del horno, determina grados de cocción diferentes, y por ende, comportamientos diferentes.
- Diversidad en la ejecución de las fábricas, sujeta al saber hacer del operario, tanto en lo que se refiere a la ejecución de las masas, como a la forma de ejecutarlas. Dejando o no oquedades, colocando o no a restregón las piezas, humedeciendo o no los ladrillos antes de colocarlos, etc.

---

<sup>1</sup> HALL, C., HAMILTON, A., HOFF. "Rising damp: capillary rise dynamics in walls". Proceedings of a Royal Society. 2007  
<sup>2</sup> GUIMARÃES, A.S., DELGADO, J.M., FREITAS, V.P. "Mathematical analysis of the evaporative process of a new technological treatment of rising damp in historic buildings". Building and Environment". 2010  
<sup>3</sup> PEIXOTO, V.; TORRES M.I.; GUIMARÃES, A.S.: "Humidade Ascensional". Coleção Documentos Técnicos. Porto, 2008  
<sup>4</sup> RISCH, E., ZHANG, Z.: "Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties", Construction and Building Materials, 24, (2010), pp. 1815-1820. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.024

- A estos factores hay que sumar los ambientales, que complican sobremanera las teorías que intentan predecir el comportamiento de la humedad capilar, como son, ventilación de los recintos, el viento incidente, la orientación y el soleamiento, la temperatura y la humedad ambiente, entre otros.

Por estos motivos y con el fin de analizar desde un punto de vista sobre todo experimental el fenómeno del movimiento del agua en las fábricas por capilaridad y la influencia de las juntas en este proceso, es por lo que la tesis utiliza una **metodología de trabajo basada principalmente en el desarrollo de numerosos ensayos realizados en laboratorio** que tienen en cuenta los datos de humedad y temperatura obtenidos de las fábricas mediante instrumentos de medida, como sondas termohigrométricas y cámaras termográficas, e instrumentos de pesada como básculas de precisión. Los datos procedentes de las fábricas se han complementado con el estudio individualizado del comportamiento de la humedad en los dos componentes que conforman las fábricas, la argamasa y el ladrillo.

Expuestas estas consideraciones y tras constatar que el estudio de este tipo específico de fábricas no ha sido abordado en profundidad por las investigaciones actuales, y con el fin de demostrar las hipótesis de partida se plantean los siguientes objetivos:

#### **Objetivo principal**

1. Estudiar y evaluar cuál es la influencia que en el proceso del ascenso de la humedad por capilaridad tienen las **retículas de argamasas de cal** que conforman las llagas y los tendeles, en las fábricas antiguas ejecutadas con ladrillo de tejar. Con el fin de saber si actúa como barrera o no, ralentizando o dificultando el proceso, o si por el contrario lo facilita.

#### **Objetivos asociados al principal**

2. Estudiar y analizar experimentalmente el fenómeno de la **capilaridad** sobre los ladrillos, la argamasa y las fábricas, con el fin de conocer la cantidad de agua que es capaz de almacenar cualquiera de los materiales antes citados, qué altura alcanza la humedad en cada uno de ellos, a qué velocidad se absorbe y se evapora el agua y, finalmente, cómo afectan las condiciones del entorno a este proceso.
3. Comprobar cómo influye en el proceso de absorción capilar de la argamasa el tratamiento de las retículas con **productos hidrofugantes**. Analizando la eficacia que ello puede suponer a la hora de generar una barrera química de corte hídrico como solución para evitar la entrada de agua.

### Objetivos complementarios

4. Comprobar la eficacia y la validez de los datos obtenidos de diferentes **instrumentos** de la humedad en las fábricas. En concreto analizando el funcionamiento de las sondas termohigrométricas y de la cámara termográfica.
5. Analizar los resultados de los ensayos realizados bajo **normas UNE**, y comprobar cuáles son las normas que mejor sirven para predecir el comportamiento real del fenómeno de la capilaridad principalmente en la argamasa, aunque también en ladrillos y fábricas.



# 1. EL ESTADO DEL ARTE



## INTRODUCCIÓN

En toda investigación es imprescindible saber cuál es el estado actual del conocimiento que existe sobre el tema. Por lo tanto una de las primeras tareas a las que hubo que dedicar un periodo amplio de investigación fue a dicho trabajo.

Al ser las humedades en la edificación, un problema que viene de muy antiguo, pareció interesante hacer un barrido por algunos tratados históricos con el fin de saber qué referencias había sobre el tema, descubriendo que son muchas las que existen al respecto, tanto acerca de los materiales (argamasas, ladrillos o fábricas), como acerca de los sistemas constructivos, o sobre los procesos de construcción e incluso sobre las lesiones que la humedad ocasiona a las edificaciones y las propuestas para intentar evitarlas.

Pero el principal interés era conocer el estado actual de las investigaciones sobre este asunto. Para ello se ha hecho por una parte una recopilación de libros y manuales que tratan sobre ello, y por otra se ha hecho un barrido amplio y exhaustivo sobre los artículos publicados en revistas especializadas, que dan una idea muy certera de cuál es el estado del conocimiento en la actualidad. Para ello han sido fundamentales y de gran ayuda dos artículos<sup>56</sup> que llevan a cabo un repaso muy interesante, minucioso y analítico, de todas las publicaciones que existen sobre el tema. Estos dos artículos son: *A review of rising damp in masonry buildings*, y *Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge*, que son un excelente compendio actualizado del estado del arte sobre las investigaciones y publicaciones actuales relacionadas con el estudio del fenómeno de la capilaridad en las edificaciones.

Con toda la información recogida sobre los conocimientos tanto antiguos como actuales se ha podido desarrollar una visión amplia y completa acerca del conocimiento que existe sobre la capilaridad en las fábricas antiguas.

Dentro de la investigación que se ha llevado a cabo del estado del arte también pareció interesante desarrollar el conocimiento de los dos fenómenos físicos que más influyen en nuestro tema, como son la capilaridad y la evaporación, a los que se han dedicado unos capítulos.

Existen publicaciones que desarrollan textos con la descripción tanto de las lesiones debidas a la presencia de la humedad capilar en las edificaciones, como de sus causas y de los

---

<sup>5</sup> ZHANG Z. *A review of rising damp in masonry buildings*. Advanced polymer and composite research group. Department of Mechanical and Design Engineering, University of Portsmouth, Anglesea Building, Portsmouth, Hampshire. (<http://www.wykamol.com/images/pictures/damproofing/lectros/a-review-of-rising-damp-in-masonry-buildings.pdf>).

<sup>6</sup> ELISA FRANZONI: "Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge", *Construction and Building Materials* 2014; 54:123-136.

sistemas que en la actualidad se aplican con el fin de intentar paliar sus efectos. Dado que uno de los objetivos de esta tesis es conocer precisamente el funcionamiento del fenómeno de la capilaridad, entre otras cosas con el fin de estudiar la eficacia de sistemas que puedan paliar sus daños, pareció interesante exponer el conocimiento que hay sobre ello, como así se ha hecho, y fruto de esas consultas son las referencias que aparecen en la tesis a libros de autores varios que desarrollan estos apartados en profundidad y con criterios científicos bien fundamentados.

Dentro de este capítulo también se ha hecho un barrido de la normativa vinculada directamente con el tema de la humedad capilar. El análisis de la misma nos ha permitido conocer cuál es la metodología de los ensayos actuales y los datos más relevantes que se estudian en aras de conocer los mecanismos que rigen el fenómeno de la humedad capilar en los materiales y en los sistemas constructivos descritos en esta investigación.

A modo de conclusión comentar que han sido muchos los tratados que a lo largo de la historia de la construcción han dedicado escritos destinados a describir las fábricas de ladrillo, su modo de construcción, cómo debían ser fabricados y manipulados los materiales y cuáles debían de ser los procedimientos que permitiesen la correcta ejecución de las obras de albañilería. Son también muchas las descripciones que existen sobre los procesos de elaboración de los ladrillos y las diferentes maneras de aparejarlos o trabarlos; igualmente se describen los tipos de mezclas y los procesos de preparación de la argamasa, permitiéndonos conocer los distintos tipos de cales, sus proporciones y las precauciones y cuidados a tener en cuenta para su uso como material de construcción. Y curiosamente, en estos textos, también se encuentran algunas referencias a los problemas derivados de la presencia de humedades en las fábricas.



Los yesos ordinarios suelen secar más lentamente y aún no logran secar del todo si el tiempo es húmedo, de donde resulta la ventaja de emplear el yeso en tiempo seco.

198. MORTEROS DE CAL Ó ARGAMASAS.—Aunque las cales pueden emplearse reduciéndolas á pasta por medio de la adición de agua, como el yeso, no sucede así sin embargo porque se resquebrajan al secarse, á consecuencia de la contracción que experimentan, perdiendo por lo tanto su trabazón, y los morteros son generalmente mezclas en diversas proporciones de la cal con otras sustancias.

El que más ordinariamente se emplea es la arena, materia inerte, cuyo objeto es el de dividir la cal haciéndola porosa para que pueda absorber el ácido carbónico que la endurece.

En la cal reducida á polvo, el amasado produce una contracción de 0,62 á 0,80 de pasta por un metro cúbico de polvo; y mezclada con arena, como la cal ocupa los huecos de aquella, resulta que al mezclar estas dos sustancias hay una disminución considerable de volumen, considerando el que tienen aisladamente las dos sustancias. Esta disminución varía según la cal y arena que se empleen, pero puede admitirse que es la cuarta parte de la suma de los dos volúmenes.

199. También se mezcla la cal con tierra que, si es arenosa, da buenos resultados con la cal grasa. En algunas partes produce buen efecto el mortero compuesto de dos partes de argamasa de cal y arena y una de tierra procedente de derribos y llamada *morteriza*, y también mezclando 0,300 metros cúbicos de cal con 0,400 de arena y 0,432 de tierra.



Imagen 8. Reproducciones de portadas y textos de tratados de construcción antiguos.

## 1.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS Y QUÍMICOS QUE INTERVIENEN EN EL FENÓMENO DE LA CAPILARIDAD Y LA EVAPORACION

### 1.1.1. EL FENÓMENO DE LA CAPILARIDAD

La **capilaridad** es una propiedad que poseen los líquidos y que depende de su tensión superficial, la cual a su vez depende de la cohesión del líquido, y le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar. Otra definición muy acertada es la que encontramos en el libro de A. Lozano: *La capilaridad es el proceso por el que la tensión existente entre el agua y el interior de los conductos capilares provoca la ascensión del fluido hasta equilibrarse las presiones entre la superficie libre y la base de la columna*<sup>7</sup>. Ocurre cuando las fuerzas intermoleculares adhesivas entre el líquido y el sólido son mayores que las fuerzas intermoleculares cohesivas del líquido. Es un fenómeno en el que el diámetro del tubo capilar o poro tiene mucha influencia. Este efecto es la causa de que los materiales porosos, como por ejemplo ladrillos y argamasas, absorban agua desde las caras exteriores, que están en contacto con el líquido, hacia el interior.

Para comprender este fenómeno podemos analizar un experimento clásico:

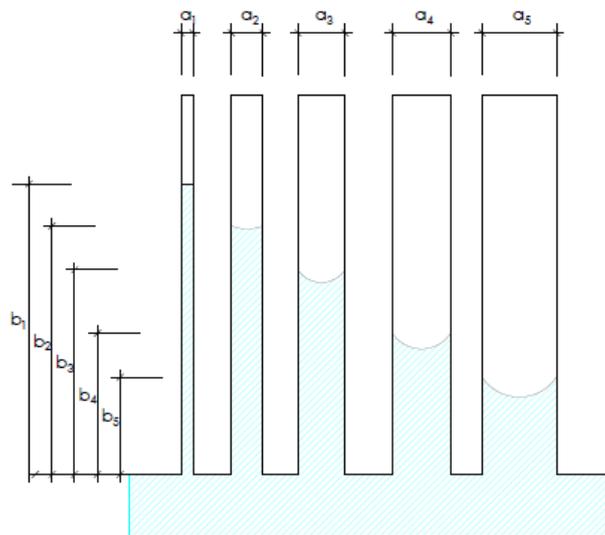


Figura 1. Ascensión de un líquido en función del diámetro del tubo. A menor diámetro cota más elevada

Se vierte en un recipiente agua, mejor que esté coloreada para poder apreciar con más claridad el efecto que se produce.

<sup>7</sup> LOZANO, A.; LOZANO, G.; DEL COZ, J.J.: "Curso: Síndrome, patología, y terapéutica de las humedades". Tomo 1. Lozano y Asociados. Consultores Técnicos de Construcción, S.L. Gijón, 2006, pág. 20.

Se introduce en el recipiente un tubo de cristal alargado y estrecho. Inmediatamente parte de agua del recipiente ascenderá por el tubo hasta alcanzar una altura determinada, esta altura será tal que el peso del líquido que quede dentro del tubo sea igual a la tensión superficial de dicho líquido.

Si cogemos un tubo con un mayor diámetro el agua que ascenderá por él llegará a menor altura pero el peso del líquido que queda dentro del tubo también es igual a la tensión superficial de dicho líquido.

A este fenómeno se le conoce como capilaridad líquida.

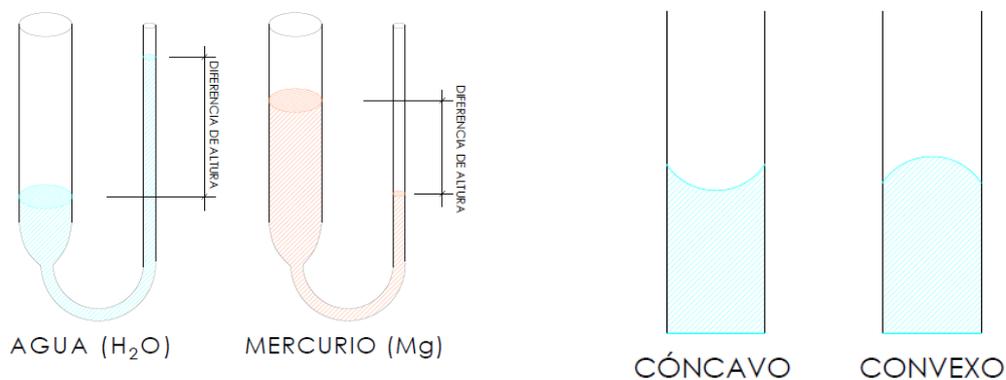


Figura 2. Ascensión de un líquido y configuración del “menisco” en función del tipo de fluido

Si tomamos un tubo de cristal grueso comunicado con uno fino y echamos agua en él, se verá cómo en el tubo grueso el agua alcanza menos altura que en el fino, como se ilustra en la figura a la izquierda.

Si hacemos la misma prueba con mercurio en vez de con agua (tal como se compara en la misma figura) resultará que en el tubo grueso el mercurio alcanza más altura que en el fino.

Además, en el primer caso, se puede ver que el agua se une con la pared del tubo (menisco) de forma cóncava, mientras que con el mercurio lo hace de forma convexa.

Cuando un líquido sube por un tubo capilar, es debido a que la fuerza intermolecular (o cohesión intermolecular) entre sus moléculas es menor a la adhesión del líquido con el material del tubo (es decir, es un líquido que moja).

En palabras más sencillas, cuando se introduce un *capilar* en un recipiente con agua, ésta asciende por el capilar como si trepase agarrándose por las paredes, hasta alcanzar un nivel superior al del recipiente.

El líquido sube hasta que la tensión superficial es equilibrada por el peso del líquido que llena

el tubo. Éste es el caso del agua, y ésta propiedad es la que regula parcialmente su ascenso dentro de las plantas, sin gastar energía para vencer la gravedad.

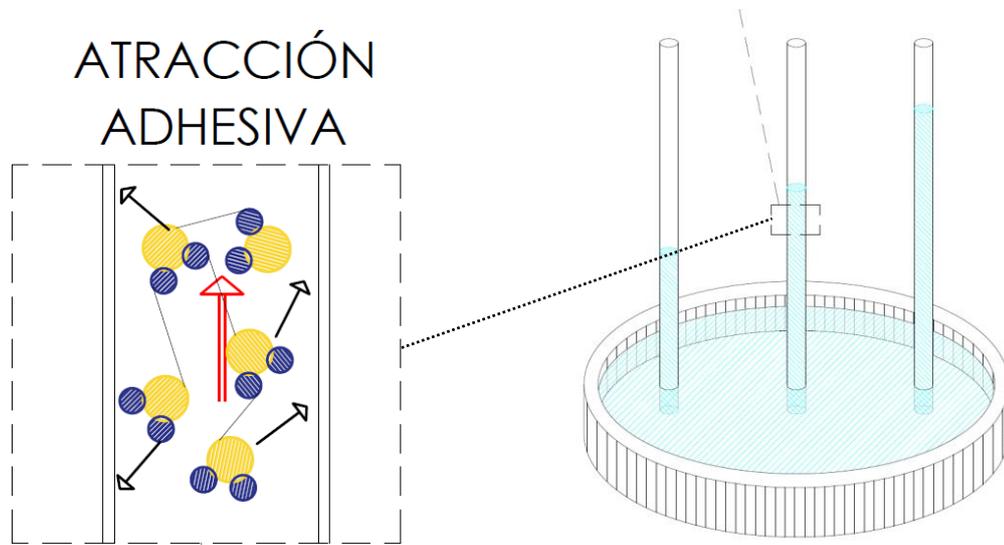


Figura 3. Ascensión del líquido en función de las características moleculares del fluido

Sin embargo, cuando la cohesión entre las moléculas de un líquido es más potente que la adhesión a las paredes del capilar (como el caso del mercurio), la tensión superficial hace que el líquido llegue a un nivel inferior, y su superficie es convexa<sup>8</sup>.

La masa líquida es proporcional al cuadrado del diámetro del tubo, por lo que un tubo angosto succionará el líquido en una longitud mayor que un tubo ancho. Así, un tubo de vidrio de 0,1 mm de diámetro levantará una columna de agua de 30 cm. Cuanto más pequeño es el diámetro del tubo capilar mayor será la presión capilar y la altura alcanzada. En capilares de 1  $\mu\text{m}$  (micrómetro) de radio, con una presión de succión  $1,5 \times 10^3$  hPa (hectopascal = hPa = 1,5 atm), corresponde a una altura de columna de agua de 14 a 15 m.

Dos placas de vidrio que están separadas por una película de agua de 1  $\mu\text{m}$  de espesor, se mantienen unidas por una presión de succión de 1,5 atm. Por ello se rompen los portaobjetos humedecidos al intentar separarlos.

Entre algunos materiales, como el mercurio y el vidrio, las fuerzas intermoleculares del líquido exceden a las existentes entre el líquido y el sólido, por lo que se forma un menisco convexo y la capilaridad trabaja en sentido inverso.

Las plantas succionan agua del terreno por capilaridad, aunque las plantas más grandes requieren de la transpiración para desplazar la cantidad necesaria.

<sup>8</sup> <http://www.profesorenlinea.cl/fisica/Capilaridad.html>

La ley de Jurin define la altura que se alcanza cuando se equilibra el peso de la columna de líquido y la fuerza de ascensión por capilaridad. La altura  $h$  en metros de una columna líquida está dada por la ecuación:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$$

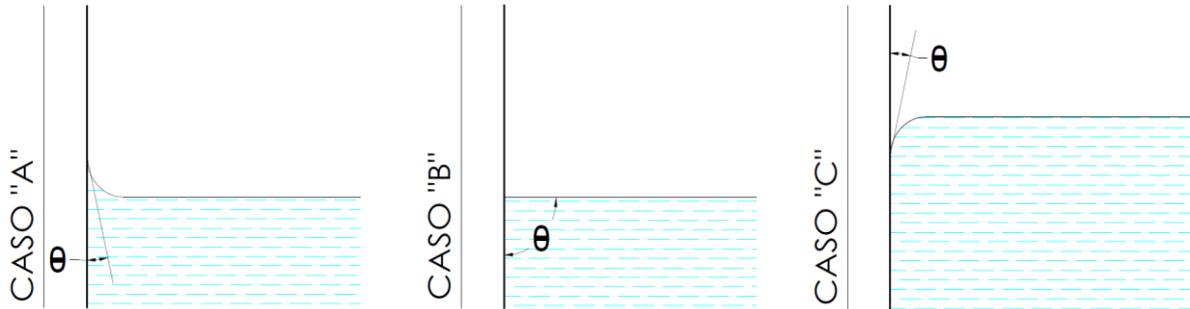


Figura 4. Gráficos que muestran ejemplos distintos del ángulo de contacto

donde:

$\gamma$  = tensión superficial interfacial (N/m)

$\theta$  = ángulo de contacto

$\rho$  = densidad del líquido (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = aceleración debida a la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$r$  = radio del tubo (m)

Para un tubo de vidrio en el aire a nivel del mar y lleno de agua,

$\gamma = 0,0728$  N/m a 20 °C

$\theta = 20^\circ$

$\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>

$g = 9,80665$  m/s<sup>2</sup>

Entonces, la altura de la columna de agua, en metros, será:

$$h \approx \frac{1,4 \times 10^{-5}}{r} m$$

Por ejemplo, en un tubo de 1 mm de radio, el agua ascenderá por capilaridad unos 14 mm<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> <https://es.wikipedia.org/wiki/Capilaridad>

## 1.1.2. EL FENÓMENO DE LA EVAPORACIÓN

De la realización de los numerosos ensayos, y de la recopilación de la documentación técnica que aborda la temática de esta tesis, queda clara la importancia que tiene el fenómeno de la evaporación en la presencia de la humedad capilar en las fábricas. El nivel que alcanza el frente húmedo se estabiliza cuando se equilibran los aportes de agua que asciende por capilaridad con las pérdidas debidas a la evaporación. Si bien es cierto que influyen en estos dos fenómenos, capilaridad y evaporación, muchos más factores que analizaremos más adelante. Es por esto por lo que se ha dedicado el siguiente apartado a describir el proceso físico de dicho fenómeno.

La evaporación es un proceso físico que consiste en el paso de un estado líquido hacia un estado gaseoso de forma lenta y gradual, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial.

La diferencia con el proceso de ebullición es que la evaporación se puede producir a cualquier temperatura, siendo ésta más rápido cuanto más elevada sea la temperatura.

Este proceso físico se produce al existir un espacio libre encima de un líquido, cuando una parte de sus moléculas está en forma gaseosa. Al equilibrarse, la cantidad de materia gaseosa define la presión de vapor saturante, la cual no depende del volumen, pero varía según la naturaleza del líquido y la temperatura. Si la cantidad de gas es inferior a la presión de vapor de saturación, una parte de las moléculas pasan de la fase líquida a la gaseosa: eso es la evaporación. Cuando la presión de vapor iguala a la atmosférica, se produce la ebullición.<sup>10</sup>

La explicación física del fenómeno de la evaporación, es la siguiente: el movimiento térmico de una molécula de líquido debe ser suficiente para vencer la tensión superficial y evaporar, esto es, su energía cinética debe exceder el trabajo de cohesión aplicado por la tensión superficial a la superficie del líquido. Esta es la razón por la que la evaporación acontece más rápidamente a altas temperaturas, a altos caudales entre las fases líquida y vapor y en líquidos con bajas tensiones superficiales (esto es, con presión de vapor más elevadas).

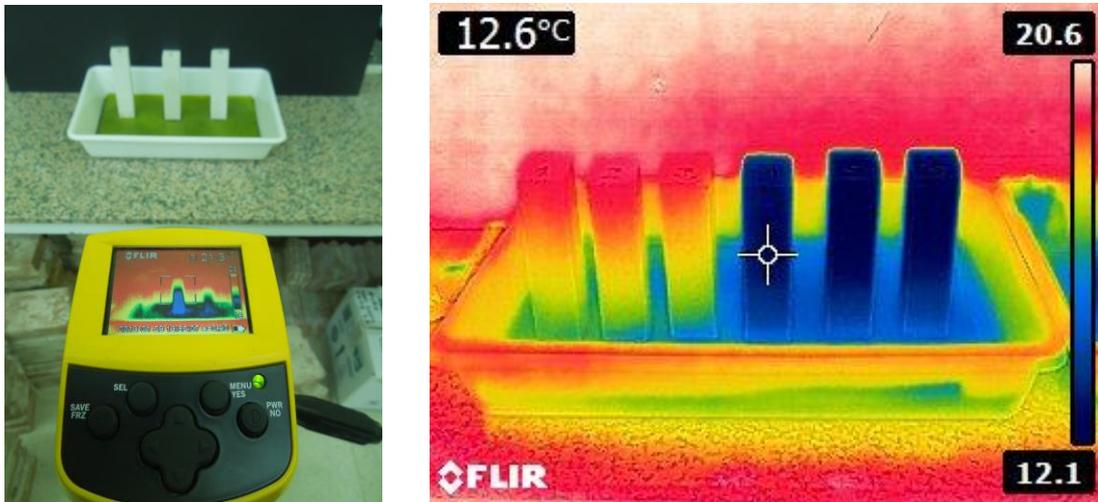
Como es sabido, la evaporación es un fenómeno físico endotérmico (absorbe calor del ambiente, lo que nos permite la detección del agua con ayuda de las cámaras termográficas) (Imagen 9), este fenómeno es llamado enfriamiento evaporativo. Este fenómeno se explica, ya que con una proporción pequeña de moléculas cerca de la super-

---

<sup>10</sup> Operaciones Básicas: Evaporación, fundamento de la técnica, Universidad de Barcelona.



ficie del líquido, y moviéndose en la dirección correcta para escapar del líquido en un cierto instante, la tasa de evaporación es limitada. Además, como las moléculas de mayor energía escapan y las que quedan tienen menor energía cinética media, como consecuencia, la temperatura del líquido se reduce.



**Imagen 9. Imágenes tomadas con cámara termográfica que muestran claramente la presencia de agua (en las zonas de color azul) en probetas de argamasa de cal. El proceso de evaporación enfría la superficie y la cámara detecta la diferencia de temperatura.**

El concepto de equilibrio evaporativo, ocurre cuando la evaporación se produce dentro de un ambiente/recipiente cerrado, las moléculas que escapan del líquido se acumulan en forma de vapor en el aire que hay sobre dicho líquido y muchas de esas moléculas vuelven al estado líquido. Cuando el proceso de escape y vuelta al estado líquido alcanza un equilibrio, se alcanza un estado de saturación del aire y como consecuencia, no ocurren cambios adicionales en la presión de vapor o en la temperatura del líquido debido a este proceso.

La tasa de evaporación (mm/día o mm/mes) está condicionada por una serie de factores, a saber, por un lado, los que caracterizan el estado de la atmósfera en contacto con la superficie evaporante (como la humedad relativa y la temperatura, por ejemplo) y, por el otro, los factores que caracterizan la naturaleza y el estado de la superficie evaporante.

Como una forma de correlación entre la evaporación y otros factores meteorológicos que influyen en ambos medios (agua y aire), Dalton<sup>11</sup> propone la siguiente formulación que expresa la tasa de evaporación  $E$  en forma directamente proporcional a la diferencia entre la presión de vapor saturado ( $p_s$ ) a la temperatura del agua, y la presión de vapor ( $p_v$ ) existente en el aire circundante:

---

<sup>11</sup> Dalton, 1802. Experiments and observations to determine whether the quantity of rain and dew is equal to the quantity of water carried off by rivers and raised by evaporation; with an inquiry into the origin of springs. (Cited by Brutsaert, 1982, p. 31)

$$E = K \times (p_s - p_v)$$

La diferencia  $(p_s - p_v)$  se denomina déficit higrométrico. La presión de vapor  $p_v$ , y por ende, la evaporación  $E$ , depende entonces tanto de la temperatura del agua como del aire.<sup>12</sup>

Por otro lado, la razón entre la pérdida de calor de una superficie de agua por evaporación y la pérdida de calor debido a la convección, independiente de la velocidad del viento viene dada por la fórmula:

$$\frac{Q_{c,pa}}{Q_e} = \frac{pi0.46(T_p - T_a) p}{P_{wp} - P_a} \frac{p}{760}$$

Donde:

- $Q_{c,pa}$  es la pérdida de calor de una superficie de agua por convección  $W/(m^2 \cdot K)$ .
- $Q_e$  es la pérdida de calor de una superficie de agua por evaporación  $W/(m^2 \cdot K)$ .
- $T_p$  y  $T_a$  son las temperaturas del agua y del aire en Kelvin (o Celsius).
- $P_{wp}$  y  $P_a$  son las presiones del vapor de la superficie del agua y del aire.
- $P$  es la presión barométrica, con todas presiones en mmHg (Bowen, 1926).

La ecuación de Bowen fue modificada por Sartori (1987)<sup>13</sup> que introdujo un parámetro que permite el cálculo de los tres casos de flujo de masa que pueden ocurrir cuando una superficie libre de agua es expuesta al aire, cuyas situaciones no pueden ser calculadas solamente con la ecuación de Bowen. Así, la ecuación de Bowen-Sartori queda:

$$\frac{Q_{c,pa}}{Q_e} = \frac{0.46(T_p - T_a) p}{P_{wp} - (rh.P_a)} \frac{p}{760}$$

Donde:

$rh$  es la humedad relativa.

<sup>12</sup> UNIDAD 3: Evaporación y Evapotranspiración. UNICEN - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. pág. 2.

<sup>13</sup> Sartori, E. "A mathematical model for predicting heat and mass transfer from a free water surface". Proc. ISES Solar World Congress, Germany (1987).

Sartori, E. "Solar still versus solar evaporator: a comparative study between their thermal behaviors". Solar Energy, 56/2 (1996).

Sartori, E. "A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from a free water surface". Solar Energy, 68/1 (2000).

Sartori, E. "Letter to the Editor", Solar Energy Journal, 73/6, 2003.

Bureau of Plant Industri (BPI); Colorado Sunken Pan; 20 m Tank; M.O. Tank (Symons Tank)

## 1.2. REFERENCIAS HISTÓRICAS AL FENÓMENO DE LA HUMEDAD CAPILAR

Ya desde muy antiguo, la cal y las argamasas con ella elaboradas, eran conocidas y usadas, y se tenían conocimientos, que si bien no eran muy técnicos, estaban basados en la observación y la experiencia y procuraban establecer pautas acerca de cómo se realizaba la preparación de la argamasa o de cuáles eran las mezclas más apropiadas para la ejecución de las edificaciones entre otras cosas. De igual manera el saber abarcaba temas relacionados con los ladrillos y con la puesta en obra de los mismos, recibidos con las argamasas de cal con el fin de conformar todo tipo de fábricas o paramentos.

Es interesante constatar que el agua, y las lesiones o daños derivados de su presencia no controlada en las edificaciones, siempre ha sido un problema desde los orígenes de la arquitectura. Resulta también interesante ver cómo desde épocas antiguas y hasta nuestros días, todos aquellos que participaban del proceso constructivo han intentado, primero detectar el problema, luego preguntarse por las causas, y después proponer soluciones que evitasen la aparición de lesiones, en este caso, causadas por la presencia incontrolada del líquido en los edificios. Decimos incontrolada porque el agua está presente, en mayor o menor grado en todos los materiales de construcción.

En los siguientes escritos se muestran algunos de los tratados históricos donde se hacen referencias o se citan textos en los que se exponen problemas, comentarios, soluciones o simplemente apreciaciones sobre temas o aspectos relacionados con la ejecución de argamasas de cal, de fábricas ejecutadas con ellas, o con la presencia de la humedad en las edificaciones.

Se expone a continuación, de un modo cronológico, una recopilación de tratados históricos en donde se pueden encontrar referencias a lo expuesto anteriormente.

- Alberti<sup>14</sup> en los Diez Libros de la Arquitectura, en la página 55 de su Libro Segundo: *Algunas cosas dignas de memoria de las piedras de que hicieron memoria los antiguos. Capítulo IX*, hablaba sobre cómo ya los romanos se enfrentaban al problema que las humedades causaban sobre la cal:

*“...En la campaña de Roma ay vna piedra femejante mucho a vna ceniza afea, que te pareccra que tiene mezclados y entremetidos carbones, y ehta es más de lo que fe puede de penfar liuiana, y que fe puede dolar, y de todo punto tenaz y tambien conftante, y no de poca fuerça contra los fuegos y tempeftades, pero tan feca y*

---

<sup>14</sup> ALBERTI, LEÓN BAPTISTA. *Los Diez Libros de Architectura de Leon Baptista Alberto. Traduzidos del Latin en Romance. [por Francisco Loçano]* Madrid: Casa de Alfonso Gomez, 1582. (Ed. facs. Colegios Oficiales de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1975)

*fedietta q fubitamente y quema las humedades de la cal y la dexa fin vir tud y vaciaa manera de polao, y de aquí ...”.*

- San Nicolas<sup>15</sup> en la página 75 en el capítulo XLVIII titulado *Trata del levantamiento del edificio, y en que tiempos convenga y el asiento de las cornisas*, habla de su experiencia con los yesos y la cal en este caso en las cornisas de ladrillo y como se ven afectadas por la humedad:

*“...Su sientto afsi defta, como las demas, ha de defera nivel. Siendo de ladrillo la cornisa, fe affentara con cal, dando a las molduras de entrega en la pared, dos vezestanto como fu buelo. Ninguna cornifa afsientes con yeso, aunque effe texada, que la texa defpide de fi huemdad, y tomo el yefo es porofo, recibe la humedad, y a effe paffo menos fuerça, y afsi vemos algunas que fe caen. Yo tengo fentadas hartas con cal, con harto buelo, y oy están como el primer dia, y temo las que tengo hechas ....”,* en este mismo libro hace referencia el propio San Nicolas a Vitrubio y sus estudios sobre la cal y las humedades.

- Perrault<sup>16</sup>, en la página 45 de su compendio de los Diez Libros de la Arquitectura de Vitrubio habla sobre cómo evitar el ascenso de la humedad a los suelos:

*“...y despues de haber estendido sobre él una capa llamada Statumen por los antiguos, que se componía de Guijarros gruesos como el puño, unidos con Mezcla de Cal y Arena, se ha de poner otra capa que llamaban rudus, y se disponía de Guijo mas menudo quebrantado, del qual, si es nuevo, se han de poner tres partes y una de Cal; pero si es de derribos ó demoliciones, serán necesarias cinco partes de Guijo y dos de Cal. Los Griegos tenian un metodo de hacer suelos en sitios baxos, donde reynan ordinariamente la humedad y el frio, con que los libertaban de estas incomodidades...”*

- Ch. Rieger<sup>17</sup> en su capítulo II de la Primera Constitución y Norma de los Edificios del Libro de Elementos de toda la Arquitectura Civil en la página 15 habla del problema de las humedades que encontraba el hombre a la hora de resguardarse de la intemperie.

---

<sup>15</sup> SAN NICOLAS, Fr. Laurencio de. *Arte y Uso de Architectura. Compuesto por Fr. Laurencio de S Nicolas, Agustino Descalço, Maestro de obras*. S. l., s.f. [1639]. (Edición facs. Valencia: Colección Juan de Herrera dirigida por Luis Cervera Vera, Albatros Ediciones, 1981).

<sup>16</sup> PERRAULT, CLAUDE. *Compendio de los Diez Libros de Arquitectura de Vitruvio. Escrito en francés por Claudio Perrault. Traducido al castellano por Don Joseph Castañeda*. Madrid: Imprenta de D. Gabriel Ramírez, 1761. (Edición facs. Murcia: Comisión de cultura del CO de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, Galería-Librería Yebra, Consejería de cultura del consejo regional, 1981).

<sup>17</sup> RIEGER, CHRISTIANO. *Elementos de Toda la Architectura Civil, con las más singulares observaciones de los modernos, impressos en latín por el P. Christiano Rieger, los cuales aumentados por el mismo, da traducidos al castellano por el P. Miguel Benavente*. Madrid: Impreso por Joachin Ibarra, 1763. (Edición fasc. Zaragoza: Colección Arquitecturas de los Precursores, COA de Aragón, 1985).

*"Las Cuevas, y concavidades de los rificos, defendian a los hombres de las lluvias, y vientos; pero no de las humedades, y tinieblas: el defecto de piedras lo fupieron muchas veces con una efpeciede betún firme, y muy pegadizo) y con un barro, que fe llama Argilla, o con Ladrillo cocidá."*

- D. Villanueva<sup>18</sup> en la página 119 de su libro, en el que hace continuas referencias al trabajo previo de Vitruvio, habla sobre como a lo largo de la historia los griegos y posteriormente los romanos se encontraron con el problema del ascenso de la humedad por sus columnas de madera al disponerlas directamente sobre el suelo, y como comenzaron a resolver el problema con tablas de madera y posteriormente con plintos de piedra:

*"...pero bien prefto conocieron los inconvenientes que fe feguian de efta practica, como el undirfe en la tierra por el pefo fuperior, y la ruina que caufaba la humedad, por lo qual determinaron fentar fobre el terreno una tabla quadrada..."* De igual forma plantea de nuevo la madera de evitar el ascenso de la humedad del terreno a los suelos de sus edificios *"....Pero bolviendo a los principios, los hombres para defender los fuelos de fus habitaciones de la humedad, o por defigualdades del terreno, plantaron fus Edifios con alguna altura fobre maderos fueftos unos fobre otros..."*

- J.Ortiz y Sanz<sup>19</sup> en la versión comentada que hace de los Diez Libros de Arquitectura de M. Vitruvio Polión comenta cómo rellenando las juntas con cal mezclada con aceite se consigue una masilla impermeable al paso de la humedad, eso sí, referido a los pavimentos. Con esto consigue que al no entrar la humedad, las heladas no los dañarán.

*"...Para que las heladas no perjudiquen al material de las' juntas, se cubrirá con heces de aceyte todos los años antes que entre el invierno; pues con esto no se podrán introducir las escarchas. Pero queriendo asegurarlo mas, sobre la ruderacion se sentarán con mortero ladrillos de dos pies de magnitud, bien unidos por los lados, donde tendrán una canalita ancha un dedo, la qual se llenará de cal amasada con aceyte y al sentados se confricarán bien por los cantos, para que unan con la pasta. Esta, metida en las canalitas, y endurecida en ellas, no dexará paso al agua ni á humedad alguna. ..."*

---

<sup>18</sup> VILLANUEVA, DIEGO DE. *Colección de Diferentes Papeles Críticos de Arquitectura, remitidos por un professor de este Arte fuera del Reyno, à otro establecido en una de nuestras provincias. Da los a la Luz D. Diego de Villanueva.* Valencia: Impreso por Benito Monfort, 1766. (Edición facs. Valencia: Publicaciones de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Artes Gráficas Soler, 1979).

<sup>19</sup> VITUBIO POLIÓN, MARCO. *Los Diez Libros de Arquitectura de M. Vitruvio Polión. Traducidos del latín, y comentados por Don Joseph Ortíz y Sanz.* Madrid: Imprenta Real, 1787. (Edición facs. Barcelona: Serie Arte y Arquitectura, Editorial Alta Fulla, 1987).

- Benito Bails<sup>20</sup> en su libro sobre Arquitectura Civil hace constantes referencias a la humedad y cómo afecta a la vida y a las construcciones. En su página 154 habla de cómo la humedad en general afecta a los materiales de las fábricas, y en determinados apartados se centra en la humedad de la tierra y de los cimientos:

*"...Defectos de la edificación. Será defecto capital de una fábrica, y muy contrario á su perpetuidad gastar yeso, para labrar sus paredes principales, y sobre todo las obras subterráneas, quales son los cimientos, los sótanos. Este material, aunque exquisito para obras interiores, como son cañones de chimenea, cielos rasos. Es muy perjudicial en los parages subterráneos, y expuestos á la humedad. La razón de esto es muy obvia; como el yeso es de suyo un cuerpo facticio, no puede formar sino un enlace aparente; nunca llega á calar los poros de las piedras para trabadas con tenacidad, no hace mas que llenar los huecos que entre ellas quedan. Al considerar cómo obra el yeso quando se asienta una piedra, se echa de ver que luego fragua, se hincha, y al instante se seca; pero á medida que se levanta la pared, particularmente quando se ha gastado el yeso en los cimientos, las hiladas de piedra que se van asentando hasta la corona..."* *"...Otro defecto de la fábrica será hacerle con sillares ó sillarejos de mala calidad. Es por lo común el sillarejo, segun se declarará más adelante, una piedra medio formada, sin consistencia y llena de blandura; y aunque los oficiales procuran quitarle esta blandura gastando el sillarejo labrado á picon, se tiene experimentado que lejos de endurecerse, se pudre en la humedad. Si se echasen muchos de estos sillarejos en los cimientos, sería todavía mucho mayor el daño..."* *"...Es dificultoso decidir de repente quales son los ladrillos buenos. «Será preciso observar (Vitr. lib. 2. cap. B) "quales son los que aguantan el invierno y el verano, porque estos serán los buenos; siendo así que los que no fueren de greda buena, ó fueren mal cocidos, manifiestan sus defectos con el yelo; por consiguiente las paredes hechas de ladrillos añejos serán las mejores." Resulta, pues; de estas palabras de Vitruvio que para probar el ladrillo bueno es menester dexarle todo un invierno por 10 menos á la humedad y á los yelos; el que aguantáre esta prueba será excelente para fabricar, y aguantará tambien mucha carga. Estas dos circunstancias penden principalmente de su buena cochura. Tambien se tiene por de buena calidad el ladrillo quando al darle con un martillo arroja un sonido agudo; si fuere de color ni muy claro, ni muy obscuro, y tuviere el grano apretado y compacto..."*

Más adelante en la página 231 haciendo referencia a Alberti habla de la humedad de la tierra *"Finalmente, para asegurar quanto cabe" la perpetuidad de una pared*

---

<sup>20</sup> BAILS, BENITO. *Elementos de Matemática. Por D. Benito Bails. Tom. IX. Parte I. Que trata de la Arquitectura Civil. Segunda Edición corregida por el autor.* Madrid: Imprenta de la viuda de D. Joaquin Ibarra, 1796. (Edición facs. Murcia: CO Aparejadores y Arquitectos de técnicos de Murcia, Artes Gráficas Soler, 1983)

1º se tirarán las primeras carreras del piso del suelo (Alberti lib. 3. cap. 6 ) de piedra dura que aguanta mejor la humedad de la tierra, la de las lluvias, y la carga del muro; 2º se pondrá cuidado en que las piedras dras de cada hilada sean de una misma especie, porque siendo todas de igual resistencia, el peso que han de sustentar no ocasionará hendeduras, desplomos, ni otros vicios; 3º se asentarán todos los sillares y sillarejos en buena trabazón, esto es, á juntas encontradas, y en llave ó á soga y tizon, trabándolo todo con mezcla de cal y arena; 4º quando se labraren paredes de poca importancia de sillarejos ó mampostería trabada con yeso, se dexará donde corresponda una holgura, por la cazan apuntada, cuya holgura se llenará al tiempo de recorrer las juntas, ó del revoco general de la pared..." "...No hay duda en que puede haber embasamentos de diferente especie, segun la variedad de los casos, por cuyo motivo tambien varían las circunstancias de estos poyos. Porque puede el embasamento servir de zócalo á un quarto baxo ó á un quarto principal, y sobre que en ambos casos resguarda el edificio del daño que le causaría la humedad, contribuye á dar ..."

- M. Formes Gurrea<sup>21</sup>, en su libro, Practica del Arte para Edificar, en la página 6 habla de las mejores argamasas para impedir los problemas de la humedad en los edificios:

"...Obsérvese lo que se nota cuando se trata de abrir un agujero en una pared recién construida con esta clase de mezcla, amasada de dos partes de argamasa blanca y otra de tierra de los derribos de paredes antiguas, y se verá qué resistencia opone tan tenaz, y cuán diferente de la que se observa en las que se construyen solo con argamasa blanca, bien sea de ladrillo ó piedra. Esto proviene de la amalgama de las tres especies de que se compone dicha mezcla; pues la fogosidad que adquiere la piedra de cal calcinada , solo las materias areniscas la pueden neutralizar, redociéndola á tina calidad de mezcla, que cuanto mas humedad percibe, mas se endurece; sucediendo lo contrario con la sequedad. Por tanto debemos convenir en que la parte de tierra morteriza que se le añade, contribuye á promediar los extremos indicados, dándole firmeza en la misma sequedad, segun se observa de ordinario en las paredes construidas de mortero blanco, en las que no percibiéndose humedad, se deshacen con los dedos, al paso que en otra de mortero negro de las circunstancias prescritas, se necesitan buenas herramientas para agujerearla. Infiérese, pues, son buenas y aun preferibles las paredes construidas con la indicada mezcla, con la cual no puede contraer humedad..."

---

<sup>21</sup> FORNES y GURREA, MANUEL. Observaciones sobre la Practica del Arte de Edificar. Segunda edición, aumentada con las Ordenanzas de Madrid relativas al mismo arte. Valencia: Imprenta de Mariano de Cabrerizo, 1857. (Edición facs. Madrid: Colección Geómetras, Ediciones Poniente, 1982.)

- En el Tratado Construcción Civil de D. Florencio Ger y Lobe<sup>22</sup> encontramos referencias claras a la humedad en las fábricas, aquí, expresamente se habla ya de capilaridad y ascenso de humedad de los cimientos a través de las fábricas como vemos en las siguiente líneas a partir de la página 158:

*"...Medios de prevenir la humedad en los cimientos.-Casi siempre se descuida oponer un obstáculo á la absorción de la humedad del terreno que por efecto de la capilaridad asciende por las paredes y las hace salitrosas. Lo primero que debe hacerse al empezar una edificación, es enterarse de la naturaleza del suelo y asegurarse del escurrimiento natural de las aguas canalizándolas..."* *"...En todos casos, cuando se quiere evitar que la humedad suba por las paredes por efecto de la capilaridad, se emplean lechos aisladores de asfalto, betún, pizarra, morteros hidráulicos y cementos..."* *"...Las fachadas tienen por lo general un zócalo o basamento Z (fig. 269) que se procura construir de materiales escogidos especialmente impermeables como la sillería para que no dejen pasar la humedad del terreno que por efecto de la capilaridad tiende á subir por las paredes arriba..."*. Concretamente en la página 183 habla sobre el tipo de mortero que conviene utilizar en el caso de las fábrica: *"...El mortero con viene que sea hidráulico de fraguado lento para que dé lugar á las operaciones del asiento de los sillares antes de que la mezcla fragüe, no ex tendiendo más que la necesaria para un sillar con objeto de que, hallándose blanda, la compresión de éste no produzca grietas ni pelos por donde la humedad pudiera penetrar después fácilmente y subir por la capilaridad..."*

- Florencio Ger y Lobe<sup>23</sup> en una 2ª edición de Tratado de Construcción Civil en la página 367 en el punto 897 habla de la capilaridad y del ascenso de humedad del terreno por las fabricas:

*"897. La higiene que debe observarse en la construcción de casas exige que los materiales sean impermeables, especialmente en la parte inferior de las paredes para que no permitan' el paso de la humedad atmosférica que las atraviesa, y en los cimientos porque la del terreno sube por capilaridad acompañada de substancias en descomposición que inficionan el aire de. las habitaciones."*

- E. Barberot <sup>24</sup>, en su Tratado Práctico de Edificación hace continuas referencias al problema de la capilaridad tanto en las tejas y elementos de cubierta como en el resto de elementos de la edificación, además de los problemas que la humedad

---

<sup>22</sup> GER y LÓBEZ, FLORENCIO. *Tratado de Construcción Civil por Florencio Ger y Lóbez*. Texto. Badajoz: Est. Tip. La Minerva Extremeña, 1898. (Edición facs. Badajoz: Diputación General de Badajoz, 2001).

<sup>23</sup> GER y LÓBEZ, FLORENCIO. *Tratado de Construcción Civil por Florencio Ger y Lóbez*. Atlas de 68 láminas con 2.079 figuras. Badajoz: Imprenta de Minerva Extremeña, 1915.

<sup>24</sup> BARBEROT, E. *Tratado Práctico de Edificación por E. Barberot*. Traducido de la 5ª edición francesa por Lino Álvarez Valdés. Segunda edición. Barcelona: Gustavo Gili Editor, 1927.

genera en los materiales de construcción y en especial en los morteros. En su página 152 por ejemplo en el apartado de aislamientos:

*“todos los enlucidos contra la humedad sólo tienen razón de ser porque, en las construcciones, se olvida casi siempre el poner un obstáculo a la humedad que sube del terreno y asciende por capilaridad hasta cierta altura de los edificios, altura que varía con la naturaleza de los materiales....”*

Es ciertamente interesante comprobar cómo ya desde muy antiguo se hacían propuestas, muy acertadas desde el punto de vista constructivo, acerca de intervenciones cuyo fin era ejecutar convenientemente las obras para evitar o minimizar los problemas relacionados con la presencia de humedad en las obras de construcción. También se comprueba, como se puede apreciar en este resumen de tratados históricos, que siempre ha sido un fenómeno que ha generado problemas, de no ejecutarse las obras correctamente. Quizás el tratado más técnico y avanzado sea el de Ger y Lobe.

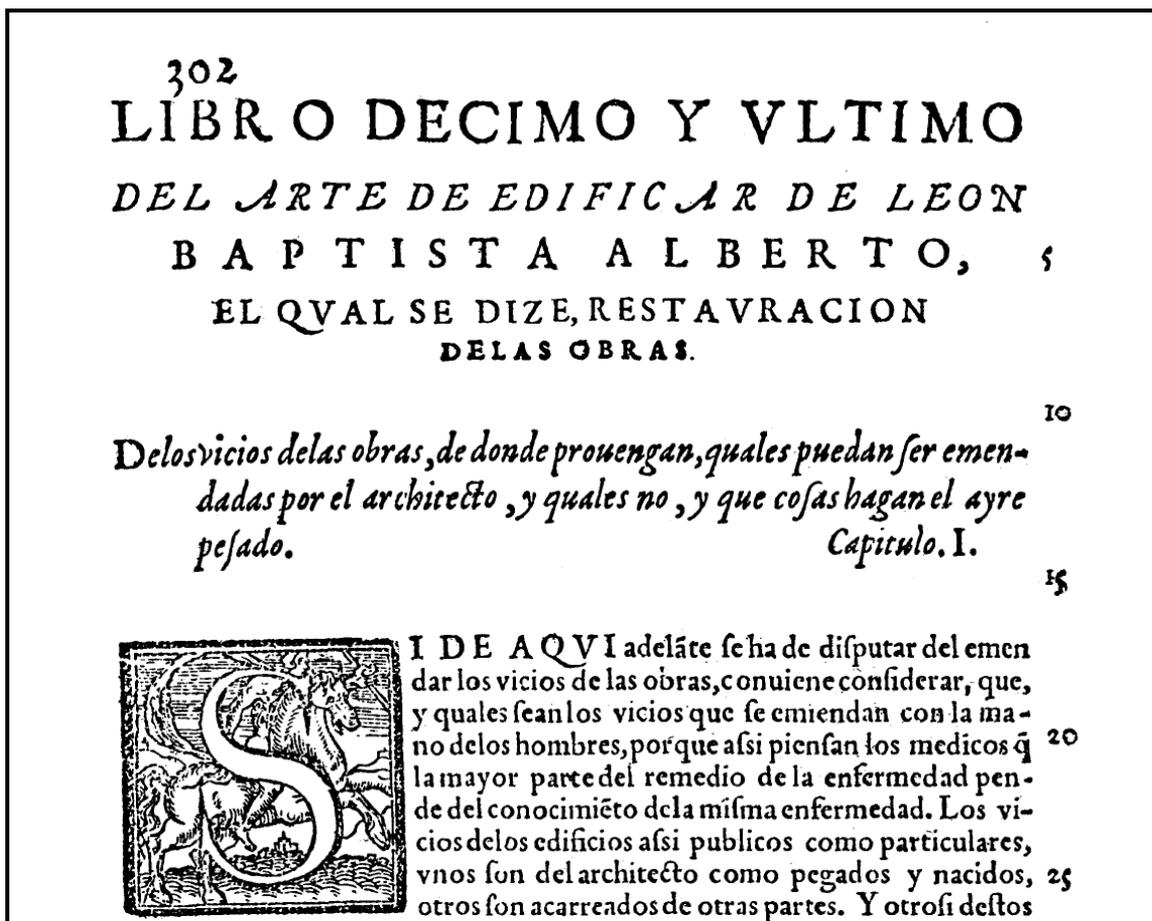


Imagen 10. Imagen de un fragmento de uno de Los Diez Libros de Arquitectura de León Battista Alberti

### 1.3. ESTADO ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE EL FENÓMENO DE LA CAPILARIDAD.

Los análisis teóricos que estudian la ascensión del agua por capilaridad pueden servir para conocer el proceso cuando se trata, sobre todo, de elementos constructivos homogéneos. No es el caso de las fábricas de ladrillo formadas por dos materiales: ladrillos y argamasa, con características diferentes, lo que provoca que este ascenso no sea lineal ni uniforme. Por otro lado el fenómeno de la subida de agua por capilaridad no es un fenómeno aislado en sí mismo ya que está influenciado además por otros factores, entre los que destaca la higroscopicidad de los materiales, esto es, la capacidad de evaporar agua cuando el balance de humedad interior/exterior es favorable, o de captarla cuando el contenido de humedad de la fábrica es menor que el del ambiente.

Este proceso de la ascensión del agua por capilaridad es un fenómeno que se ha abordado en muchos casos desde el punto de vista teórico. La expresión más clásica del ascenso capilar es la de Jurin, por la que la altura alcanzada dentro de un tubo capilar depende de la tensión superficial, de la mojabilidad o ángulo que forma la superficie del líquido con la pared del tubo, del radio del capilar, de la densidad del líquido y de la gravedad.

Sin embargo, la consideración de un muro real obliga a un planteamiento que permita valorar otros factores que pueden determinar con mayor claridad el alcance del fenómeno. En este sentido, Mason,<sup>25</sup> desarrolló un modelo en que la altura de ascenso capilar está condicionada por la naturaleza de los poros capilares, el espesor de la pared y la tasa de evaporación. Además, a partir de una serie de comprobaciones, relacionó la influencia de la antigüedad en el mayor grado de absorción/permeabilidad del mortero de las fábricas.

- a) En 2007, Hall y Hoff<sup>26</sup> propusieron un nuevo modelo en el que planteaban que la altura del ascenso capilar en un muro es proporcional a la succión de agua por el mortero, y a la raíz cuadrada de la razón entre el espesor de la pared y el doble del producto de la tasa de evaporación por unidad de área mojada y del volumen de agua por unidad de volumen del material. También consideraron otro parámetro, la influencia de la presencia de sales higroscópicas en el agua y en los materiales, que puede modificar el nivel de ascenso capilar al afectar a la tasa de evaporación. La fórmula  $H = S(b/2e\theta)^{1/2}$ , resulta muy complicada de aplicar en el caso de las fábricas de ladrillo con gruesas juntas de argamasa. Salvo "b", que es el grosor de la fábrica, en el caso de las probetas y los muros levantados por nosotros, de medio pie, un pie y un pie y medio, el resto de variables es difícil de evaluar ya que afectan a dos materiales diferentes en circunstancias ambientales imprecisas.

---

<sup>25</sup>MASON, G.: "Rising damp", Build Sci n°9 (1974), pp. 227-231.

<sup>26</sup>HALL, C., HOFF, W.D.: "Rising damp: capillary rise dynamics in walls", Proc. R. Soc. A, 463, (2007), pp. 1871-1884. doi:10.1098/rspa.2007.1885

- b) Posteriormente, Risch<sup>27</sup>, en un estimable intento de aproximación a una situación más real, puso en evidencia la dificultad de obtener datos reales mediante medidas directas en las fábricas para comprobar entonces la validez de las formulaciones teóricas. El modelo de Hall y Hoff basado en la teoría de flujo insaturado, tal como sucede en la estructura porosa de un cuerpo complejo como la fábrica de ladrillo, predice situaciones teóricas que son más o menos consistentes con observaciones de campo. Sin embargo, el mismo trabajo pone de manifiesto la dificultad de llevar a cabo las mediciones que permitan comprobar la aproximación a esas predicciones teóricas. También constata la indeterminación que resulta de introducir el parámetro *sortividad*<sup>28</sup> (coeficiente de absorción), dada la diferente permeabilidad del ladrillo y el mortero, su antigüedad y la posible presencia de sales. En sus ensayos emplea diferentes tipos de mortero y las fábricas son de junta delgada de mortero y ladrillos de espesor considerable, porque busca verificar (como ocurre en nuestro caso) la importancia del mortero en los procesos de absorción. Una de las conclusiones a las que llega es que hay una gran diferencia entre los resultados de las fórmulas empleadas para calcular el nivel hasta el que puede subir la humedad, el frente húmedo, y los ensayos reales sobre fábricas.
- c) Mas modernamente Peixoto<sup>29</sup> señala que debido a la complejidad del problema es extremadamente difícil presentar explicaciones científicas para las diversas formas de humedad ascensional y junto con los estudios teóricos realiza diversos ensayos, principalmente, con muros de piedra y hormigón con diferentes revestimientos, y llega a conclusiones sobre el proceso de absorción y de secado de las fábricas. Establece los factores de los que depende la humedad ascensional: condiciones climáticas ambientales, soleamiento, presencia de sales, porosidad y porosimetría del material y espesor de la pared y material de revestimiento, y define una técnica de intervención para rehabilitar edificios históricos que ya se ha empleado en diversas obras de restauración. Está basada principalmente en impedir que suba la humedad al edificio con barreras y construir una red de cámaras bufas con ventilación controlada en función de la humedad para regular el proceso de secado en la base de los muros, ya que llega a la conclusión que la densidad de flujo se calcula en función del coeficiente de transferencia superficial de humedad y las

---

<sup>27</sup> RISCH, E., ZHANG, Z.: "Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties", *Construction and Building Materials*, 24, (2010), pp. 1815-1820. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.024

<sup>28</sup> Si bien el término "sortividad" no está recogido en el diccionario de la Real Academia, en el Diccionario de la Real Academia de Ingeniería, viene definido como: "*Parámetro S en la ecuación de la absorción de PHILIP; cociente de proporcionalidad entre el volumen de agua que absorbe la unidad de superficie de un suelo y la raíz cuadrada del tiempo durante el que esto ocurre, cuando los efectos de la gravedad son despreciables.*" Que se aproxima mucho al concepto que se maneja en esta tesis.

<sup>29</sup> PEIXOTO, V.; TORRES M.I.; GUIMARÃES, A.S.: "*Humidade Ascensional*". Coleção Documentos Técnicos. Porto, 2008

concentraciones de vapor de agua de la superficie y del aire

$$g = \beta(C'_s - C'_a) [kg(m^2 \cdot s)],^{3031}$$

- d) En su libro *Humidade Ascensional*<sup>32</sup>, Vasco Peixoto, lleva a cabo un excelente recorrido por las diferentes formas que tiene el agua para acceder al interior de las fábricas y de los diferentes sistemas de control de la humedad en las mismas. Si bien hace referencia a los sistemas matemáticos que existen para predecir la altura del frente húmedo, acaba concluyendo que su grado de exactitud es muy relativo, ya que nos encontramos con sistemas constructivos de una gran heterogeneidad. Diferencia los sistemas de corte hídrico en función de si son para ejecutar en edificios modernos o antiguos, y para estos últimos apunta que la ventilación de las bases y las barreras hidrófugas son soluciones bastante adecuadas, siempre que se realicen después de un exhaustivo estudio del edificio y de las causas de la humedad. Es importante mencionar que sus investigaciones se centran sobre fábricas que diferentes a las que son objeto de esta tesis, haciendo especial hincapié en las ejecutadas con piedra.
- e) Por su parte, Anson, S.J. y Hoff, W. D.<sup>33</sup>, exponen un interesante análisis teórico sobre el equilibrio que se establece entre la pérdida de agua por evaporación y el aporte de agua por ascenso de la humedad por capilaridad. El análisis es capaz de predecir alturas de ascenso capilar de acuerdo con lo observado en la práctica realizada en muros. Concluyeron con una teoría sencilla que describe el efecto de secado por evaporación en el equilibrio con el ascenso capilar. A pesar de las simplificaciones hechas en el análisis, el modelo es capaz de predecir alturas de equilibrio de ascenso capilar en los muros reales sometidos a secado por evaporación y esto concuerda con las observaciones de la humedad capilar analizadas en la práctica.

El análisis sugiere, además, que el contenido de agua tiene niveles más bajos a medida que sobrepasamos la altura de equilibrio prevista, esto también se confirmaba en las observaciones prácticas<sup>34</sup>. Sobre la base de este análisis, también llegaron a concluir que, si están presentes determinadas condiciones de secado, el problema de la humedad puede reducirse, y para tal acción de secado, se pueden llevar a cabo varias medidas prácticas. De todas ellas, la ventilación a ambos lados de la base un muro es la que puede tener un efecto más significativo. Por el

<sup>30</sup> PEIXOTO, V.: "Tratamiento da humidade ascensional em edificios antigos", 4º Congreso de patología y rehabilitación de edificios. *PATORREB 2012*, (2012), pp. 40.

<sup>31</sup> CAMINO, M.S.; LEÓN, F.J.; LLORENTE, A.; OLIVAR, J.M. (2014). Evaluation of the behavior of brick tile masonry and mortar due to capillary rise of moisture *Mater. Construcc.* 64 [314], e020 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.02513>.

<sup>32</sup> PEIXOTO, V.; TORRES M.I.; GUIMARÃES, A.S.: "*Humidade Ascensional*". Colecção Documentos Técnicos. Porto, 2008

<sup>33</sup> ANSON, S.J., HOFF W.D.: Water movement in porous building materials – VIII. Effects of evaporative drying on height of capillary rise equilibrium in walls. *Building Environment* 1986;21:195–200.

<sup>34</sup> Está conclusión coincide plenamente con los datos obtenidos en nuestros ensayos sobre muros reales. Ver Ensayo 10.1

contrario, los sistemas que reducen el secado por evaporación, tales como el uso de ciertos acabados decorativos, pueden suponer un aumento del problema.

- f) En 1988, S. J. l'Anson y W. D. Hoff<sup>35</sup> analizan algunos de los factores que afectan a la interacción de los fluidos hidrofugantes en medios porosos. Los procedimientos experimentales que se describen en el artículo permiten conocer la distribución del tratamiento con el fin de poder ser evaluados y poder estimar los tiempos de curado.

Se investigaron dos tipos de líquidos hidrofugantes, una solución acuosa de metil silicinato de sodio y la otra una solución de disolvente orgánico de estearato de polioxido de aluminio. Ninguno de los dos fluidos mostró una redistribución significativa una vez pasado el proceso de la impregnación. Pero para ambos tipos de líquidos se encontró que la impregnación era suficientemente rápida. En términos prácticos se concluyó que para los tipos de líquidos investigados la inyección debía realizarse durante el tiempo suficiente para que en cada punto de inyección se formase una banda continua de mampostería tratada al nivel elegido. Ni las fuerzas capilares, ni la redistribución posterior de la inyección extendieron significativamente el volumen de mampostería tratada. Es decir, una vez terminado el proceso de inyección no se mejoran significativamente los resultados si se vuelve a introducir de nuevo el producto hidrofugante.

- g) En 1990, S. J. l'Anson, W. D. Hoff<sup>36</sup> presentaron un análisis sobre los procesos por los cuales el agua de los poros es reemplazado durante la inyección del líquido hidrofugante. Su trabajo les permitió calcular los tiempos de inyección a partir de un conocimiento previo de los parámetros básicos que definen la permeabilidad y la porosidad del material de mampostería que iba a ser tratado.

Estos experimentos se llevaron a cabo utilizando dos tipos de líquidos hidrofugantes. Uno era una solución acuosa de metil silicinato de sodio y la otra una solución de disolvente orgánico de estearato de polioxido de aluminio.

Los resultados de sus cálculos para una gama de ladrillos y de piedra de construcción apuntaban que para la inyección a alta presión era poco probable que se necesiten menos de cinco minutos por perforación pero que incluso podría llegar a exceder de 20 minutos para materiales relativamente permeables y porosos. Para el caso de esta tesis no es un estudio muy significativo, ya que el sistema de

---

<sup>35</sup> l'ANSON SJ, HOFF W.D. *Chemical injection remedial treatments for rising damp – I. The interaction of damp-proofing fluids with porous building materials*. Build Environ 1988; 23(3):171–8.

<sup>36</sup> l'ANSON SJ, HOFF WD. *Chemical injection remedial treatments for rising damp – II. Calculation of injection times*. Build Environ 1990;25 (1):63–70.

inyección que se ha utilizado es por gravedad, aun así es un estudio que merece la pena tenerse en cuenta, sobre todo para futuras líneas de investigación.

h) En el año 1995, Moira A. Wilson, W. D. Hoff, Christopher Hall,<sup>37 38</sup> presentan un estudio interesante y muy relacionado con nuestras investigaciones. El ensayo lo llevaron a cabo sobre probetas, en las que se hacen dos partes compuestas por varias mezclas de yeso/arena, con diferente sortividad de tal manera que  $S_A < S_B$ , es decir el primer material tiene menos sortividad que el segundo y las conclusiones a las que llegaron fueron las siguientes:

1. En el caso de que  $S_A < S_B$  los estudios realizados basados en el modelo del "sharp wet" (frente húmedo) son satisfactorios en el caso de que ambos materiales, los dos que componen las probetas, tengan propiedades hidráulicas similares. Y de este modo los datos de absorción, obtenidos de predicciones teóricas y los de determinaciones experimentales son bastante próximos. (No es el caso de esta investigación)
2. Se llegó a la conclusión de que la absorción de agua en materiales compuestos de dos capas se controla en última instancia por las propiedades del segundo material. El que más absorción tiene.
3. El análisis es menos satisfactorio cuantitativamente cuando las dos capas tienen diferentes propiedades hidráulicas, o cuando el primer material del compuesto es de más longitud o espesor.
4. El volumen acumulado de agua absorbida por unidad de área en el material compuesto depende de las propiedades hidráulicas del segundo material.
5. Por lo tanto, la conclusión general que obtuvieron en sus estudios, en relación con la absorción de agua en materiales compuestos de dos capas, es que la absorción está controlada en última instancia por las propiedades del segundo material, el que presenta una sortividad más elevada.

El por qué es muy interesante esta investigación para nuestros estudios se sustenta con los siguientes argumentos:

1. Este estudio demuestra la dificultad de predecir empíricamente no sólo alturas de humedad por capilaridad, sino también cantidades de agua, ya que nuestros materiales, los que forman las probetas, y los muros reales sobre los que ensayamos, tienen propiedades hídricas diferentes.

---

<sup>37</sup> WILSON, MOIRA A. HOFF, W. D. HALL, CHRISTOPHER. "Water Movement in Porous Building Materials -XIV. Absorption into a Two-Layer Composite ( $S_A < S_B$ )" *Building and Environment*, Vol. 30, No. 2, pp. 221-227, 1995

<sup>38</sup> El estudio presentado en este artículo es tenido en cuenta en las conclusiones del ensayo E-10.1, realizado sobre cuatro muros, y en las conclusiones finales.

2. En los ensayos se habla de probetas en las cuales uno de los materiales funciona como inicio del proceso de absorción capilar, pero en nuestro caso, en los ensayos de laboratorio y en los casos de edificaciones reales no es así. Los arranques de nuestras probetas, como los arranques de los muros de los edificios reales que intentamos imitar, sobre los que hemos observado el efecto y sobre los que vamos a actuar, tienen en la mayoría de los casos ambas fases (ladrillo y argamasa) en contacto directo con la base húmeda. Si bien es cierto, que una vez superada esa cota, el conjunto comienza a funcionar como se describe el ensayo.
- i) En el año 2003, G. Cultrone, M.J. de la Torre, E. Sebastian y O. Cazalla<sup>39</sup> concluyen, en base a los ensayos realizados, el comportamiento de diferentes productos hidrofugantes, aplicados sobre ladrillos macizos, permitiendo una aproximación a los criterios de selección en función de la composición polimérica de los mismos. Difiere ligeramente de esta investigación, ya que el producto usado en ella es en base a silicatos y siliconatos de potasio. Las principales conclusiones se resumen a continuación:

Concretamente, afirman que *"el éster de sílice favorece una buena cohesión entre las partículas del ladrillo debido a la polimerización del gel de sílice, sin embargo, permite la entrada de agua en el interior de las muestras dado que no tiene prácticamente ningún efecto protector"*, por otro lado se concluye que *"el copolímero de etilo metacrilato ha sido el producto menos eficaz: no ha penetrado significativamente y únicamente ha conseguido consolidar de forma parcial la superficie de los ladrillos"*. *"El oligómero siloxano etoxifuncional, cumple perfectamente con su papel de resina hidrorrepelente, ya que la película superficial que forma impide la entrada del agua y de las sales disueltas en ella al interior de los ladrillos. Ese hecho le permite alcanzar los mejores resultados"*. *"Incluso, se puede añadir que los 10 ciclos de ensayo de envejecimiento acelerado no han sido suficientes para dañar los ladrillos tratados con este producto"*.

Por último, *"el éster etílico del ácido silícico y polisiloxano oligomérico que se supone debería proporcionar la cohesión de un consolidante con la protección de un hidrofugante, no llega a alcanzar los mismos logros del oligómero siloxano etoxifuncional"*.

---

<sup>39</sup> G. CULTRONE, M. J. DE LA TORRE, E. SEBASTIÁN, O. CAZALLA, Mater Construcc, Vol. 53, nº 269, pp. 41-59, 2003

- j) Aunque se sale un poco de la línea de nuestra investigación es interesante el estudio que en 2002 publican Vasco Fassina, Monica Favaro, Andrea Naccari y Marta Pigo<sup>40</sup>, donde analizan la eficacia de un nuevo yeso macroporoso diseñado para resistir la cristalización de sales y poder evitar los fenómenos de cristalización que dañan la mampostería en los muros de ladrillo de los edificios históricos de Venecia debido al proceso de la humedad capilar. Y sirve como ejemplo de los sistemas a utilizar para contrarrestar las lesiones generadas por la presencia de la humedad.

Para entender esta influencia del aumento de la humedad y la cristalización de la sal en la durabilidad de un yeso, se realizaron varios trabajos de campo perforando los núcleos de los muros a diferentes alturas y diferentes profundidades, antes y después de la aplicación del yeso macroporoso, con el fin de obtener una distribución vertical y horizontal de la humedad así como de sales solubles. Desde los primeros datos se apreció una reducción de la humedad y del cloruro.

Algunas de las conclusiones, coincidentes con algunos de los resultados obtenidos en nuestra investigación, fueron las siguientes:

1. El aumento de la humedad se caracteriza por una tendencia decreciente con la altura desde la planta baja, así como el desplazamiento desde el interior de la pared hacia la superficie externa.
2. El aumento de la humedad depende generalmente, por un lado, de la presión de succión de agua que migra de los cimientos de mampostería de ladrillo, y por otro lado, de la tasa de evaporación de agua en la superficie de la pared, que depende de la temperatura, humedad relativa y ventilación a la que se encuentra sometido. Como queda demostrado, la piel superficial de la pared es altamente dependiente de las condiciones ambientales externas, como la tasa de evaporación de agua y los eventos pluviales. Por esta razón, es más significativo considerar el contenido de humedad de la parte interior de la pared. Razón por la cual las sondas termohigrométricas utilizadas en los ensayos llevados a cabo en esta tesis están introducidas en perforaciones realizadas en las probetas y muros ejecutados, y separadas o alejadas suficientemente de la superficie exterior de los paramentos.
3. El contenido de cloruro en ambas áreas muestra un descenso después de la aplicación de yeso. El contenido de sales solubles en el yeso es menor con respecto a la mampostería de ladrillo y generalmente disminuye hacia la superficie.

---

<sup>40</sup> FASSINA V, FAVARO M, NACCARI A, PIGO M. *Evaluation of compatibility and durability of a hydraulic lime-based plaster applied on brick wall masonry of historical buildings affected by rising damp phenomena*. J Cult Herit 2002; 3:45-51.

- k) En 2006, Franco Sandrolini junto con Elisa Franzoni <sup>41</sup>, partían del hecho de que las técnicas más comunes para detectar la humedad en elementos constructivos solamente suelen proporcionar datos cualitativos, o resultados no completamente repetibles, lo cual, representa un problema grave cuando se requiere una monitorización continua de los sistemas contra la humedad. Por ello proponen un protocolo operativo para la medición de la humedad en elementos constructivos, el cual se basa en el método gravimétrico que proporciona cierta fiabilidad en los datos, especialmente cuando se realizan mediciones periódicas para evaluar la acción de tratamientos de deshumidificación para edificios históricos. Este protocolo operativo que desarrollan, proporciona datos fiables y reproducibles en la medición de humedad en los materiales de las antiguas estructuras arquitectónicas y ha tenido éxito en varios casos reales en edificios históricos, en Italia (San Marco), la Basílica en Venecia, el Palazzo Pio en Carpi, la iglesia de San Francesco en Correggio, y Malta (iglesia St. Caterina d'Italia en La Valeta). Concluyen una serie de ventajas del método, que lo hacen adecuado siempre que hay que evaluar la eficacia de sistemas de deshumidificación en edificios antiguos.
- l) Una de las investigaciones actuales más relevantes sobre el fenómeno de la humedad por capilaridad, con propuestas de solución al problema, es la que se ha llevado a cabo por el profesor Vasco Peixoto de Freitas, con M. Isabel M. Torres, <sup>42</sup> en 2007. Analizan como la intervención en edificios antiguos requiere cada vez un conocimiento más amplio ya que esta labor tiende a abarcar un número creciente de especialidades, poniendo especial énfasis en el estudio de las causas de los problemas que afectan a estos edificios y de los posibles tratamientos que pueden resolverlos. Así pues, la transferencia de humedad en los muros de edificios antiguos que están en contacto directo con el suelo, conlleva en muchos casos una migración de las sales solubles al interior de los muros, responsable de muchas lesiones en los mismos.

Ante la creencia de que muchas de las técnicas que se utilizan actualmente para minimizar la humedad ascendente no son eficaces, en especial cuando se trata de muros de gran espesor y materiales heterogéneos, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto se ha llevado a cabo un proyecto, desarrollado en el Laboratorio de Física de Construcción (LFC), el cual se centra en experimentos para validar una tecnología para el tratamiento de la humedad ascendente por capilaridad en los muros de estos edificios históricos: la ventilación en la base del

---

<sup>41</sup> SANDROLINI F, FRANZONI E. An operative protocol for reliable measurement of moisture in porous materials of ancient buildings. *Build Environ* 2006 ;41:1372-80.

<sup>42</sup> TORRES, M.I.M., DE FREITAS, V.P.: *Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation*. *Build Environ* 2007;42:424-435.

muro. También presenta algunos de los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas realizadas.

Este estudio concluyó con resultados que permitían afirmar que, en los edificios históricos, las técnicas tradicionales de tratamiento de la humedad ascendente llevadas a cabo no son eficaces, y la ventilación de la pared es una tecnología sencilla que aún tiene un gran potencial. Los resultados experimentales muestran que la implementación de esta técnica de tratamiento (ventilación en la base del muro) reducía el nivel de humedad ascendente. Los resultados de simulación numérica son similares a los obtenidos experimentalmente, lo cual proporcionan una validación cualitativa del programa de cálculo.

m) En 2010, A.S. Guimarães,<sup>43</sup> justifica la necesidad de dar un nuevo enfoque en los estudios ante las ineficaces técnicas tradicionales empleadas hasta el momento para tratar el complejo problema de la humedad ascendente en los gruesos y heterogéneos muros de edificios históricos. Los resultados de los estudios experimentales en el tema de la humedad ascendente validan la eficacia de la utilización de un sistema de ventilación en la base del muro en ambos lados, que evita que el frente húmedo supere una altura de aproximadamente unos 60 cm. En este trabajo también se describe el proceso de transferencia de humedad entre un flujo de aire en movimiento y una pared saturada.

Una de las conclusiones aportadas en el estudio es que los mecanismos de transferencia de humedad son muy complejos, particularmente en lo que se refiere al aumento de la humedad en los edificios históricos. Una vez aceptado que el aumento de la humedad es una de las principales causas de la degradación de estos edificios, se concluyó la importancia de estudiar los factores relacionados con este fenómeno.

En sus estudios comprueba que la colocación de capas impermeables al vapor en la superficie de la pared aumenta el nivel alcanzado por la humedad ascendente. Así pues, una de las conclusiones más importantes de estas investigaciones es que la ventilación en la base de la pared, o muros, es una técnica sencilla que tiene un gran potencial práctico y los resultados experimentales realizados en LFCFEUP demostraron que la colocación de un sistema de ventilación en la base de una pared o muro, y a ambos lados de la misma, reduce significativamente el nivel de la cota alcanzada por la humedad debida al fenómeno de la capilaridad.

---

<sup>43</sup> GUIMARAES, A.S., DELGADO, JMPQ, de FREITAS, V.P. Mathematical analysis of the evaporative process of a new technological treatment of rising damp in historic buildings. *Build Environ* 2010 ;45:2414–20.

El problema de la transferencia de humedad entre la superficie de una pared saturada y el aire que fluye a lo largo de ella se presta a un análisis teórico complejo, debido a un conjunto complejo de condiciones. Las ecuaciones elípticas de equilibrio resultantes han sido resueltas numéricamente con un amplio rango de valores de parámetros relevantes.

- n) En 2010, Eric Rirsch y Zhongyi Zhang<sup>44</sup> analizan el fenómeno de la humedad, basándose en los mecanismos que la controlan y los factores que contribuyen, como el efecto de la capilaridad, la absorción de agua, la evaporación, y las formaciones de sal. Todo esto acompañado por los resultados de un estudio sobre el aumento de la humedad ascendente en base a un caso práctico estudiado durante un año.

Se realizaron mediciones de la humedad ascendente en las paredes de muros hechos con diferentes morteros y las observaciones se compararon con modelos teóricos.

Se observó en ellos que las características de los morteros afectaban significativamente a la altura de la humedad ascendente. Además, se comprobó que había una gran correlación entre el aumento de la humedad y el frente húmedo (Modelo Sharp), y la tasa de absorción de agua en el mortero fue un factor clave en la determinación de la altura del frente húmedo.

Además se comprobó que las paredes con tratamientos contra la humedad se encuentran más calientes que sus homólogas debido al enfriamiento que el proceso evaporativo produce en la superficie<sup>45</sup>. Esto concuerda plenamente con los valores obtenidos en nuestro ensayo sobre los cuatro muros (E-10.1), en los que la temperatura está directamente relacionada con la humedad del muro.

Como conclusiones a las mediciones de humedad y a los estudios realizados dedujeron que las características del mortero son un factor clave en el control de la altura de la humedad ascendente y la cantidad de evaporación posterior, en la línea de la investigación que acomete esta tesis.

Por otro lado, se comprobó que el uso del método de la resistencia eléctrica para medir la humedad en la pared no era fiable, posiblemente debido a las variaciones de las características de los ladrillos y el efecto de las sales solubles en la conductividad. El método de perforación genera resultados más fiables. Esta

---

<sup>44</sup> RIRSCH E, ZHANG Z. Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties. *Construction and Building Materials* 2010; 24:1815–20.

<sup>45</sup> Ver datos y gráficas obtenidas en el Ensayo E-10.1, que coinciden en esta afirmación.

diferencia podría ser atribuible al calor generado por el primer método al causar evaporación.

Por último, señalan que el estudio está limitado a un año de trabajo práctico con muros sometidos a una fuente de agua artificial en lugar de unas condiciones de campo, en las que un muro que pueda estar sometido a la presencia de agua muchos años y con agua subterránea natural como fuente de humedad. Alguno de los ensayos llevados a cabo en esta tesis sobre muros superan este periodo de tiempo.

- o) En 2013, Coronado J.A., García A. y Padiál J.F.<sup>46</sup>, publican los resultados de un ensayo, que tenía por objeto estudiar la alteración que se produce en la cerámica porosa cara vista extrusionada al ser tratada superficialmente con productos hidrofugantes, estudiando la succión de dicha cerámica porosa, en comparación con la cerámica sin hidrofugar, en concreto analizando dos parámetros: tasa de absorción inicial y nivel de agua superficial. Para poder cuantificar el grado de alteración que produce cada hidrofugante en la superficie de la cerámica porosa, se obtuvieron imágenes con el microscopio electrónico de barrido (MEB) a 3000 aumentos, pudiéndose observar cómo afecta el grado de alteración de la superficie a los resultados obtenidos en la succión de la cerámica. Concluyen que todos los productos hidrofugantes reducen sensiblemente los parámetros de tasa de absorción inicial y nivel de agua superficial de la cerámica porosa cara vista, respecto de la cerámica sin hidrofugar. La variación de dichos parámetros está determinada por el tipo de hidrofugante, reduciendo en todos los casos la tasa de absorción inicial en más de un 92,31 % (la media de los 5 productos ensayados se situó en el 94,49 %) y el nivel de agua superficial en más de un 73,67 % (la media de los 5 productos ensayados se situó en el 78,89 %). Asimismo, todos los productos hidrofugantes al ser aplicados sobre una base cerámica porosa alteran, como se aprecia en las imágenes de microscopía, su superficie en mayor o menor grado, dependiendo de la composición del hidrofugante aplicado. Este estudio, como se comenta en el apartado 3.3. de esta tesis, nos ha sido de suma utilidad ya que valida el uso del hidrofugante elegido en la investigación llevada a cabo, de entre los que hay en el mercado, al confirmar que todos consiguen unos porcentajes de protección sensiblemente similares y altamente eficaces. Ya que una de las dudas que se tenían al inicio de las investigaciones era qué producto hidrofugante elegir, al ser inviable, por limitaciones de espacio, de tiempo y de materiales, ensayar probetas con diferentes productos.

---

<sup>46</sup> CORONADO, J.A, GARCÍA, A. PADIAL, J.F.: "Análisis mediante microscopio electrónico de barrido de la succión del ladrillo visto de fabricación industrial extrusionada hidrofugado". AXIOMA. Volumen 2, Nº 11, pp: 27-23. 2013

p) Uno de las publicaciones más interesantes y útiles para el desarrollo de esta tesis, es el artículo de Zhongyi Zhang<sup>47</sup> en su estudio titulado "A Review of Rising Damp in Masonry Buildings" que tiene como propósito, revisar todos los estudios publicados sobre el tema del ascenso de la humedad por capilaridad mediante la búsqueda de artículos científicos de las bases de datos. Hace un exhaustivo recorrido por la bibliografía más importante que se ha publicado sobre el fenómeno de la capilaridad y sobre los problemas que ocasiona. De un modo sencillo y asequible, expone y comenta las aportaciones que sobre el tema han ido haciendo los autores más importantes del tema: Hall, C., Hoff, WD., Mason, G., l'Anson, SJ., Rirsch, E., Zhang, Z., Guimaraes, AS., de Freitas, VP., Torres, I. y otros.

Tras una magnífica exposición del tema, termina con la enumeración de conclusiones que se exponen a continuación:

- La ascensión de la humedad por capilaridad es un problema que viene de muy antiguo, y lo ha sido en muchos lugares distintos del planeta. Ha sido el causante de cuantiosos daños en las construcciones de fábricas, que a su vez han acarreado problemas graves de salud, ambientales, sociales y económicos.
- Los registros de observaciones y descripciones de este fenómeno se remontan a tiempos antiguos. Llegando a ser identificado como un problema de salud pública en la segunda mitad del siglo XIX.
- Hoy en día el problema de la humedad ascendente por capilaridad es conocida y comprendida. Mason y, más recientemente, Hall y Hoff han desarrollado modelos que describen el equilibrio entre las fuerzas capilares con la gravedad y la evaporación.
- La clave que controla las propiedades del material es la "sortividad" o capacidad de absorción (tasa de succión) del agua en el mortero o argamasa. Los morteros modernos tienen sortividades inferiores a los encontrados en los edificios más antiguos y por lo tanto difieren significativamente en su comportamiento de la humedad ascendente por capilaridad.
- Las paredes o fábricas más gruesas presentan más humedad ascendente de capilaridad. Esto es porque como el espesor de la pared aumenta, la cantidad relativa de evaporación se reduce. Cualquier adición a la superficie de la pared

---

<sup>47</sup> ZHANG Z. *A review of rising damp in masonry buildings*. Advanced polymer and composite research group. Department of Mechanical and Design Engineering, University of Portsmouth, Anglesea Building, Portsmouth, Hampshire. (<http://www.wykamol.com/images/pictures/damproofing/lectros/a-review-of-rising-damp-in-masonry-buildings.pdf>)

con revestimientos o pinturas tiene tendencia a aumentar la humedad ascendente al reducir la evaporación.

- Un hecho subrayado por algunos entendidos es el de los largos periodos de tiempo que puede tomar la humedad ascendente antes de alcanzar un nivel de estado estacionario o de equilibrio. Existe la evidencia de que estos procesos son realmente así, lo que aumenta la capacidad de absorción del mortero con el tiempo y por lo tanto desplaza el frente húmedo hacia cotas más elevadas.
  - Construcciones de muros de ladrillos recibidos con argamasas de cal muestran rápidamente la presencia de humedad capilar en cotas situadas entre los 0,5 y 1 metro.
  - El aumento de potenciales zonas húmedas en los edificios, unido a los pobres aislamientos de los mismos tienen como resultado un consumo de energía elevado y poco eficiente, con pérdidas económicas y daños ambientales.
  - Se han hecho esfuerzos importantes para intentar establecer correctas interpretaciones del ascenso de la humedad, con el fin de desarrollar productos y técnicas o sistemas que proporcionen apoyos en la búsqueda de soluciones frente este problema.
- q) Con una intención similar al anterior artículo, en 2014, Elisa Franzoni<sup>48</sup>, publica: *"Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge"*, en donde expone que la ascensión de la humedad capilar es uno de los principales problemas que afectan a las estructuras de mampostería históricas en todo el mundo, ya que pone en peligro la integridad de los materiales, la salud de sus habitantes y el rendimiento energético de la envolvente del edificio. A pesar del gran esfuerzo invertido más allá del siglo pasado para intentar comprender el fenómeno de la capilaridad, el problema de la extracción de la humedad de las fábricas sigue estando abierto. Este documento tiene como objetivo proporcionar, a través de una revisión de la literatura internacional, una imagen coherente de las tecnologías hasta ahora propuestas para la eliminación de la humedad de capilaridad y los resultados obtenidos, tanto en laboratorio como en trabajo de campo. Se presenta al final de este artículo una bibliografía sumamente completa e interesante que engloba la mayor parte de los trabajos que sobre el tema se han publicado.

---

<sup>48</sup> FRANZONI, E.: "Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge", *Construction and Building Materials* 2014; 54:123-136.

Del análisis de los escritos, estudios e investigaciones expuestos se pueden extraer algunas conclusiones de las que destacamos como más significativas y vinculadas con este estudio las siguientes:

- El fenómeno de la humedad que asciende por capilaridad en las construcciones arquitectónicas ha sido observado desde muy antiguo por todos los agentes intervinientes en el proceso edificatorio. Ha generado desde siempre interés en la búsqueda de las causas y de las posibles soluciones con el fin de mitigar los problemas que generaba.
- En la actualidad hay abiertas líneas de investigación sobre el tema, con numerosas publicaciones que lo abordan, siendo varios los autores que han intentado acercarse al problema desde un punto de vista teórico. Poniendo de manifiesto la gran dificultad para elaborar teorías que permitan predecir el comportamiento de la ascensión capilar de la humedad en las fábricas.
- Lo más importante ha sido constatar el vacío que existe en el estado de las investigaciones actuales en el estudio del fenómeno de la capilaridad para sistemas constructivos de fábricas ejecutadas con ladrillos de tejar de elaboración manual, cocidos en hornos de biomasa, y recibidos con argamasas de cal de juntas gruesas. Vacío que se debe principalmente a dos factores, por una parte la especificidad de estas fábricas, vinculadas a una zona geográfica concreta, y por otra, a la gran cantidad de variables existentes que hacen muy difícil sistematizar teóricamente un estudio con múltiples factores que influyen en la dispersión de datos de partida, como son la heterogeneidad de los ladrillos utilizados y el elevado componente manual de la ejecución de las argamasas y las fábricas entre otros.

## 1.4. CLASIFICACIÓN ACTUAL DE LOS TRATAMIENTOS DE LOS PROBLEMAS GENERADOS POR LA HUMEDAD CAPILAR.

Existen en la actualidad diferentes sistemas que intentan solucionar el problema de la presencia de agua en las fábricas debido a la ascensión capilar. Hay publicaciones que muestran tales técnicas, con bastante consenso sobre los tipos de intervención, si bien con algunas diferencias en su clasificación.<sup>49505152</sup>

Unos procedimientos intentan hacer descender el frente húmedo, si es posible, por debajo de la cota del terreno, bien mejorando la ventilación y evaporación de las fábricas en la base, o mediante sistemas eléctricos. Con esto se consigue por un lado evitar el mal efecto estético que provocan las marcas que deja la humedad, y por otro los daños provocados por la conjunción de la presencia de humedad con la climatología, sobre todo por los ciclos hielo-deshielo. Entre ellos estarían la cámara bufa, la inclusión de aireadores en las fábricas y los sistemas eléctricos basados en la electroósmosis normal y la inalámbrica.

Otros sistemas intentan impedir, minimizar o dificultar la entrada de agua creando barreras de corte hídrico bien de tipo químico, bien de tipo físico.

Y por último, otros dejan el problema, pero intentan disimularlo, bien creando un paramento que lo oculta, o bien aplicando recubrimientos superficiales a base de morteros porógenos.

Sistemas que describimos a continuación:

### 1.4.1. SISTEMAS POR AIREACIÓN O VENTILACIÓN

Históricamente se han empleado procedimientos que intentaban regular y limitar la acción de la humedad por capilaridad tratando de generar en la base de los muros y fábricas una corriente de aire. Estos sistemas tienen diversas modalidades, siendo los dos sistemas más comunes los siguientes:

---

<sup>49</sup> LOZANO, A.; LOZANO, G.; DEL COZ, J.J.: "Curso: Síndrome, patología, y terapéutica de las humedades". Tomo 1. Lozano y Asociados. Consultores Técnicos de Construcción, S.L. Gijón, 2006. Algunos de los criterios de clasificación, de las denominaciones y descripciones provienen del capítulo correspondiente de esta publicación, donde se exponen de un modo sistemático y exhaustivo. También se ha cogido información del libro ya citado "Humidade Ascensional" del profesor PEIXOTO, V.

<sup>50</sup> LOZANO, G.; LOZANO, A.; SANTOLARIA, C.: "Curso de Tipología, Patología y Terapéutica de las Humedades". Consultores Técnicos de Construcción, C.B. Oviedo, 1993.

<sup>51</sup> ORTEGA, F.: "Humedades en la edificación". Sevilla, 1994. Se han seguido igualmente criterios expuestos en esta publicación.

<sup>52</sup> MONJO, J.: "Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos". Madrid, 2010.

### 1.4.1.1. Cámara bufa

Este sistema se basa en la ejecución de cámaras de aire adosadas longitudinalmente en la base de los cimientos o arranques de los muros con el fin de favorecer y potenciar la evaporación de la humedad del muro, antes de que llegue a la cota superior del terreno. Dichas cámaras disponen de conductos que las conectan con el ambiente exterior con el fin de eliminar de este modo la humedad proveniente del terreno. Las cámaras bufas se pueden ejecutar bien por el exterior del edificio, o bien por el interior del mismo. O incluso por ambos lados.

Puede presentar el peligro potencial de afectar a la cimentación del edificio debilitándola, o de generar variaciones importantes en las condiciones higrotérmicas del muro y del terreno. Si bien es cierto que las incidencias de este tipo en las edificaciones son prácticamente irrelevantes.

Lo habitual es que la ventilación de la cámara se produzca de forma pasiva, es decir sin apoyo de sistemas mecánicos, como extractores. Ello no quiere decir que no se produzca una renovación de aire, ya que por diferencia de presión o por efecto *Venturi*, los conductos que conectan las cámaras con el exterior son capaces de extraer y renovar el aire de su interior, eliminando de este modo la humedad de los arranques de los muros que ha pasado de ellos al ambiente por evaporación.



Imagen 11. Detalle de la ejecución de una cámara bufa, y estado final antes de proceder a su cubrición<sup>53</sup>

<sup>53</sup> BASTERRA, A. Imágenes de los apuntes de la asignatura de Rehabilitación, conservación y construcción de los edificios antiguos, de la ETSA de Valladolid.

Sin embargo se están comenzando a llevar a cabo instalaciones de cámaras bufas dotadas con sensores que detectan niveles de humedad, de modo que cuando estos superan determinados límites ponen en funcionamiento extractores que renuevan el aire que se encuentra dentro de las canalizaciones enterradas. Hay que destacar en este sentido las investigaciones y actuaciones llevadas a cabo por el profesor Vasco Peixoto<sup>54</sup>, donde tras la ejecución de un sistema como el descrito, la mejora en la disminución de las humedades de capilaridad ha sido altamente satisfactoria. Uno de los inconvenientes de este sistema es su elevado coste y lo invasivo de la intervención en lo que se refiere a la ejecución de la cámara bufa, con obras que afectan a entornos y elementos existentes, sobre todo si se realizan por el interior. Si bien, es una actuación que requiere de poco mantenimiento, prácticamente nulo si la ventilación en vez de ser forzada es natural, y que en general obtiene resultados bastante satisfactorios.

#### **1.4.1.2. Perforaciones inclinadas en muros**

En este sistema, también llamado sistema Knapen y que está basado en la ejecución de los denominados sifones atmosféricos, se trata de realizar perforaciones en los muros a una cierta distancia unas de otras, normalmente en hiladas horizontales y al tresbolillo, en las que normalmente se introducen unos tubos de plástico o cerámicos llamados higoconvectores. Las perforaciones son inclinadas y van en caída hacia el exterior del muro. En dichos tubos u oquedades se crea un flujo natural de manera que el aire cargado sale con la humedad del muro.

Su funcionamiento se basa en el principio físico por el cual el aire caliente va hacia arriba y el frío hacia abajo. Así, se crea un flujo de aire donde el aire húmedo es reemplazado por aire seco. El objetivo es secar la pared al hacer evaporar la humedad que proviene del suelo. No contienen ningún tipo de producto químico y no necesitan mantenimiento de ningún tipo.

La colocación de los tubos se hace con una profundidad aproximada de 2/3 del espesor de la pared, y una inclinación hacia arriba de entre 25° y 30°.

Parece que hay un consenso generalizado en que es una solución que no proporciona resultados muy satisfactorios. Su utilización ha sido muy escasa, ya que genera un impacto visual importante y además supone una actuación muy agresiva, prohibida en muchos de los edificios históricos sobre los que se deberían de

---

<sup>54</sup> PEIXOTO, V.; TORRES M.I.; GUIMARÃES, A.S.: "*Humidade Ascensional*". Coleção Documentos Técnicos. Porto, 2008. Sistema descrito con todo detalle en este libro.

acometer intervenciones de este tipo. Este sistema pertenece al grupo de los que conocemos como intervenciones destructivas.



Imagen 12. Detalle de un higroconvector colocado en un muro de mampostería. Archivo Histórico de Simancas (Valladolid)

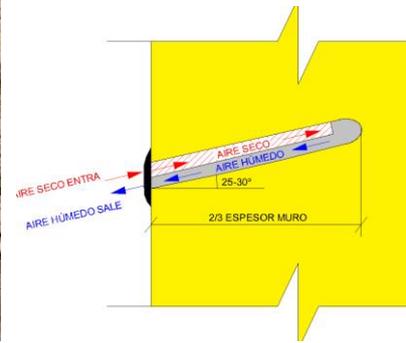


Imagen 13. Esquema<sup>55</sup> de funcionamiento

### 1.4.1.3. Reducción de la sección capilar activa

Este tratamiento consiste en la ejecución sobre un muro existente de huecos, normalmente en forma de arcos de descarga, de forma que la sección horizontal del muro se reduce, consiguiéndose, por una parte, reducir la sección por la que asciende la capilaridad y por otra, aumentar la superficie evaporativa. Se conoce como método de Kock, en razón de que fue dicho arquitecto el que lo puso en práctica.

Llevarlo a cabo es complicado por la magnitud de la intervención y aunque es un sistema eficiente su puesta en práctica es prácticamente nula.

## 1.4.2. SISTEMAS ELÉCTRICOS

La aplicación de métodos eléctricos está basada en el fenómeno de la electroósmosis, que es el fenómeno por medio del cual se produce un movimiento de las moléculas de agua inducido por un campo eléctrico en un medio poroso. Cada poro del material se considera como un capilar que está en contacto con una solución de agua que contiene iones, las superficies porosas de los materiales del terreno así como los utilizados en la construcción de la edificación suelen estar cargados con carga negativa, pero en la proximidad de los muros se encuentran iones positivos o cationes, por lo que se forma una doble capa, que se compone de una fija correspondiente a cationes absorbidos por la superficie (el muro) y de otra móvil o difusa. Si se introducen unos electrodos y se aplica potencia diferencial, la capa móvil se trasladará hacia el electrodo negativo o cátodo, llevando consigo las

<sup>55</sup>[http://stshumedades.es/index.php?id\\_cms=1&controller=cms](http://stshumedades.es/index.php?id_cms=1&controller=cms). 2016

moléculas de agua, y este movimiento de transporte del agua es lo que se denomina electroósmosis<sup>56</sup>.

Hay dos sistemas claramente diferenciados que se exponen a continuación:

#### **1.4.2.1. ELECTROFORESIS o ELECTRO-ÓSMOSIS**

Estos sistemas están basados en la diferencia de potencial que se genera al aplicar en dos zonas separadas electrodos eléctricos. Esto genera una migración eléctrica que desplaza la humedad de la zona con signo positivo a la de signo negativo. Lo que se busca es hacer descender la humedad del muro usando un campo eléctrico.

La descripción del sistema es sencilla. Se disponen una serie de electrodos, unos colocados en el muro que se desea secar y otros que se introducen en el terreno. Posteriormente a la colocación de dichos electrodos se aplica una diferencia de potencial, que puede ser continua o en forma de pulsos intermitentes, que es la que va a producir la migración de la humedad de los electrodos colocados en la pared a los que están introducidos en el terreno.

Los electrodos instalados en la pared son puestos uno a uno mediante perforaciones que generalmente tienen como profundidad la mitad de la pared, mientras que los electrodos colocados en el terreno se introducen una profundidad de aproximadamente 1,30 metros.<sup>57</sup>

Este sistema es muy invasivo, interfiere mucho en la edificación, necesita de una obra considerable y no suele ser de una efectividad total, por lo que no hay un acuerdo generalizado por el conjunto de los técnicos acerca de su uso e idoneidad.

#### **1.4.2.2. ELECTRO-ÓSMOSIS INALÁMBRICA**

Se trata de dispositivos electrónicos que emiten una onda eléctrica que anula el campo electrostático del muro y permite invertir la polaridad existente entre la superficie y el interior de los muros o los suelos y hace descender las humedades capilares.

La mayor parte de las variantes de este sistema de eliminación de humedades no tiene necesidad de obra. Se instala de forma rápida y limpia y no debilita la estructura del edificio. Otra de sus ventajas es la acción sobre suelos y pavimentos. Normalmente para su mejor funcionamiento y para mejorar el proceso de

---

<sup>56</sup> <http://canalconstruccion.com/electroosmosis-humedad-capilaridad.html>. 2016

<sup>57</sup> <http://canalconstruccion.com/electroosmosis-humedad-capilaridad.html>. 2016

eliminación de la humedad se suele completar con un revoco de mortero microporoso.

Esta deshumidificación electrofísica se realiza a través de unas centralitas electrónicas de reducidas dimensiones que una vez instaladas en las zonas afectadas cargan positivamente a los muros evitando así que la humedad remonte nuevamente, con lo que se detiene la absorción capilar.

Las unidades de deshumidificación electrofísica no utilizan ondas de radio del tipo de alta o baja frecuencia ni utilizan el principio de resonancia magnética sino que se basan en el conocido principio de la inducción electromagnética. Los equipos son totalmente inofensivos para la salud de las personas, animales y vegetales. Tampoco producen ningún tipo de interferencia con los aparatos eléctricos y el consumo de energía es muy bajo. La instalación es rápida y, lo más importante, es que no requieren prácticamente ninguna obra. Basta con instalar la centralita directamente sobre la pared a una altura previamente estudiada y ser luego conectada a la red eléctrica.<sup>58</sup>

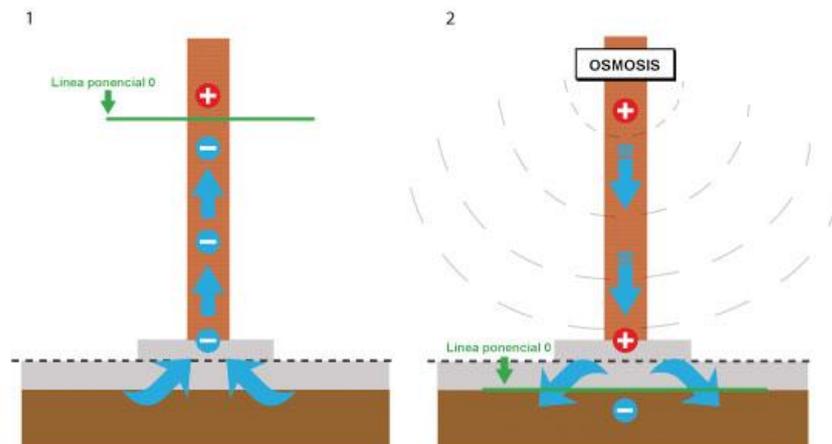


Imagen 14. Esquema del funcionamiento del sistema de electro-ósmosis inalámbrica<sup>59</sup>

### 1.4.3. BARRERAS DE CORTE HÍDRICO

#### 1.4.3.1. SISTEMAS QUÍMICOS

Estos se basan en la inyección de productos líquidos o geles a través de perforaciones que se realizan en los muros. Estos productos generan unas barreras

<sup>58</sup> [http://www.humicontrol.com/humicontrol/Humedades\\_capilaridad/Humedades\\_capilaridad\\_mursec\\_eco.htm](http://www.humicontrol.com/humicontrol/Humedades_capilaridad/Humedades_capilaridad_mursec_eco.htm). 2016

<sup>59</sup> [https://www.google.es/search?hl=es&site=img&tbm=isch&source=hp&biw=1301&bih=641&q=electroosmosis+humedad&oq=electroos&gs\\_l=img.1.5.0i3j0i30i7](https://www.google.es/search?hl=es&site=img&tbm=isch&source=hp&biw=1301&bih=641&q=electroosmosis+humedad&oq=electroos&gs_l=img.1.5.0i3j0i30i7). 2016

hidrófugas que si bien no impiden totalmente la ascensión de la humedad por capilaridad si la dificultan y retardan notablemente.

Uno de los principales problemas que tiene este sistema es que, en algunos casos, la gran heterogeneidad de los muros y las fábricas impide la correcta distribución del producto, bien sea por la presencia, muy frecuente por cierto, de numerosas oquedades dentro de los muros, bien por la dispersión de los diferentes materiales que componen las fábricas antiguas: ladrillo, argamasa, adobe, tapial y piedra. Esto hace que en muchos casos sea imprevisible saber a ciencia cierta cuál es la eficacia del producto que se está aplicando, y si el procedimiento de inyección ha colmatado en su totalidad las capas que se desean tratar.

La introducción de estos productos en los muros se produce bien por gravedad o bien por presión dependiendo del producto o de las prescripciones de las casas comerciales.

Uno de los principales problemas, es que es un sistema ligeramente destructivo ya que exige la ejecución de un número considerable de taladros o perforaciones. Los productos más habituales son aquellos basados en componentes silicatos, silanos, siloxanos o a base de nanopartículas, de potasio o sodio, si bien existen más productos en el mercado.

Este método de barrera hídrica ha sido el estudiado en esta tesis y se desarrollará con mucho más detalle a lo largo de la misma. Si la configuración del muro es homogénea, y la introducción del líquido se hace correctamente su eficacia es muy elevada.



**Imagen 15. Ejemplo de introducción de producto hidrofugante por gravedad para generar una barrera de corte hídrico en dos de los ensayos realizados**

### **1.4.3.2. BARRERAS FÍSICAS**

Las barreras físicas son otros de los sistemas usados para evitar la ascensión capilar de la humedad. Estas barreras son láminas, normalmente de materiales metálicos, plásticos o bituminosos, que se colocan en las zonas bajas de los muros.

El principal problema de estos sistemas es que es muy difícil o prácticamente imposible su colocación en edificios existentes o una vez ejecutada la obra. Su aplicación es una actuación destructiva que presupone cortes, demoliciones y en muchos casos eliminación de material original.

Si dicha barrera se coloca durante el proceso constructivo la eficacia es total, pero como es obvio, esto no es posible cuando estamos hablando de edificaciones antiguas, en las que las fábricas funcionan como muros de carga.

Hay cuatro tipos principales de soluciones

#### **a) Sustitución parcial de hiladas de ladrillos**

Consiste en ir eliminando hiladas que se van reemplazando por otras. La sustitución se realiza por bataches para no descalzar el muro totalmente, colocando dentro de la nueva hilada horizontal, un material que impida el paso de la humedad: láminas bituminosas, de polietileno, u otras similares. Una vez colocada la lámina se reponen los ladrillos que se retiraron previamente. Este sistema, muy poco usado, presenta, como es lógico, graves problemas de estabilidad en su ejecución y en muchos de los casos, su ejecución es inviable.

#### **b) Metodo Massari**

Método desarrollado en la década de los 60 por Giovanni Massari. Consiste en realizar una serie de perforaciones o taladros pasantes al muro y tangentes entre sí, posteriormente se hacen otras perforaciones cuyo centro se sitúa en el punto de tangencia de los taladros anteriores. Una vez realizadas se rellenan de material que impida el paso de la humedad a su través y de una resistencia y dureza que permita soportar las cargas del muro. La intervención se va ejecutando en tramos alternos, para posteriormente colmatar los que han quedado entre ellos, con lo que se consigue una barrera continua. Los problemas de su realización son similares a los del sistema anterior. Es una intervención muy agresiva con el edificio.

### **c) Método del corte del muro**

Otra variante del sistema anterior consiste en hacer un corte del muro, bien con una sierra de cadena (sistema Comer), o bien con un alambre o cable acerado que discurre a gran velocidad, con un método similar al que se usa en las canteras para el corte de piedras. En el corte que se va generando se introducen láminas metálicas o bituminosas, morteros especiales, resinas u otros productos capaces de impedir el paso de humedad a su través.

Es un procedimiento que ha tenido poca implantación y que en la actualidad está prácticamente en desuso.

### **d) Método de Schöner Turn**

Consiste en la colocación en las juntas del muro de unas láminas onduladas de acero inoxidable o de aluminio que han de ser introducidas con ayuda de martillos neumáticos. Esto implica que su uso estaría limitado a fábricas con las juntas suficientemente anchas y bien delimitadas espacialmente. Los problemas de su colocación son similares a los de ejemplos anteriores de ahí su escasa aceptación.

## **1.4.4. OCULTACIÓN DE ANOMALÍAS**

Puede ocurrir que eliminar las causas de la humedad por capilaridad sea tarea casi imposible por motivos técnicos, estéticos, económicos o de otro tipo, y hay que optar por soluciones en las que se debe asumir que la humedad va a estar presente en las fábricas y lo único que se pueda hacer sea "disimular" su presencia u ocultarla y ventilarla.

Básicamente hay dos posibilidades, una ocultar las lesiones bajo un nuevo paramento, o bien revestirlo con un mortero adecuado.

### **1.4.4.1. EJECUCIÓN DE NUEVO PARAMENTO**

Consiste en levantar, normalmente por el interior del edificio, una pared que oculte las lesiones o los defectos estéticos ocasionados por la humedad. Se debe en todo caso dejar perfectamente ventilada, superior e inferiormente, la cámara que queda entre ambos paramentos, el antiguo dañado y el nuevo. Hay que tener cuidado con el arranque del nuevo paramento con el fin de que tampoco a él le afecte la humedad existente. Para ello es bueno colocar láminas antihumedad en el apoyo. Es una técnica similar a la que se desarrolla con la ejecución de las cámaras bufas al

conseguirse una cámara de aire que permite a la vez la evaporación de la humedad y ocultar el frente húmedo. En el caso de las cámaras bufas lo que se consigue es que dicho frente húmedo se quede por debajo de la cota del pavimento y con este sistema el frente húmedo puede situarse por encima de dicha cota pero oculto tras el nuevo paramento ejecutado.

Este trasdosado se puede realizar bien con tabiques de fábrica de ladrillo, o bien con sistemas a base de PYL (Placa de Yeso Laminado) o de sistemas similares a base de montantes autoportantes. Colocando por ejemplo rasteles metálicos sobre los que se atornillan posteriormente placas de fibro-cemento de celulosa, dejando una abertura continua por debajo y por encima para asegurar la ventilación de la cámara.

#### **1.4.4.2. REVESTIMIENTO A BASE DE MORTEROS PORÓGENOS**

Consiste en revestir los paramentos afectados con morteros porógenos, es decir con gran capacidad de transpiración y eliminación de humedad. Se trata de morteros de estructura macroporosa constituida por poros intercomunicados que ponen en contacto el paramento con el aire exterior, aumentando la velocidad de evaporación y con ello la desecación superficial del muro<sup>60</sup>. Lo más habitual es que se trate de morteros "de sacrificio", es decir que se aplican con el fin de ser eliminados de nuevo cuando hayan recogido en el espesor de su capa las sales o impurezas arrastradas por la humedad en su proceso de ascensión y salida al exterior por evaporación.

#### **1.4.5. DRENAJES**

El drenaje es un método que se aplica frecuentemente como solución complementaria con el resto de los sistemas. Es decir que se aplica en combinación con otros. Por ejemplo, es normal que a un sistema de barrera de corte hídrico a base de productos hidrofugantes se le complemente con la colocación de un sistema drenante.

Los drenajes se llevan a cabo con el fin de eliminar el agua líquida del terreno, por lo común la que pueda circular cerca de la base de los muros, bien por el exterior o bien por el interior de la edificación. El procedimiento para que el agua descienda hasta el conducto de evacuación del agua puede ser colocando una capa de grava o dejando una cámara de aire, normalmente de poca anchura. Con esto se

---

<sup>60</sup> LOZANO, A.; LOZANO, G.; DEL COZ, J.J.: "Curso: Síndrome, patología, y terapéutica de las humedades". Tomo 1. Lozano y Asociados. Consultores Técnicos de Construcción, S.L. Gijón, 2006, pág. 118.

consigue que el agua no sólo no entre en contacto con el muro, sino que descienda con facilidad hasta la cota del drenaje. En el fondo de la excavación se coloca normalmente un tubo drenante, también podría ser una canaleta de obra, que debería estar recubierto de un geotextil o similar para evitar la entrada de finos que obture y colmate el conducto. Dicho tubo presenta unas perforaciones de pequeñas dimensiones por las que se recoge el agua líquida para posteriormente conducirlo hasta arquetas con sistemas de bombeo que eliminen dicho agua lejos de las edificaciones o la viertan por gravedad a las redes de saneamiento.

## 1.5. LESIONES RELACIONADAS

La presencia de humedad por capilaridad proveniente del terreno en las fábricas no sería un problema si no generase cierto tipo de lesiones. Pero la realidad es que esta presencia de agua, en determinadas circunstancias, cuando supera ciertos niveles y en combinación con algunos fenómenos añadidos (ciclos hielo-deshielo, por ejemplo), es la causa de un número importante de defectos estéticos y de lesiones constructivas, que en algunos casos pueden llegar a provocar deterioros importantes que comprometen incluso, la estabilidad del edificio o de algunas de sus partes.

Existen publicaciones que abordan de un modo sistemático la casuística de las lesiones. En la documentación consultada sobre los cursos de humedades impartidos por Alfonso Lozano Martínez-Luengas<sup>61</sup><sup>62</sup> en colaboración con Gerónimo Lozano Apolo, Juan José del Coz Díaz y Carlos Santolaría Morros, se muestran de una forma sistemática y exhaustiva descripciones sobre las lesiones relacionadas con la humedad capilar. También se han consultado otras publicaciones que abordan en alguno de sus capítulos temas sobre la humedad capilar y sus consecuencias: *Humedades en la Edificación* y *Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*<sup>63</sup><sup>64</sup>. De igual modo las publicaciones de Juan Monjo Carrió<sup>65</sup><sup>66</sup> presentan una acertada exposición del tema describiendo las lesiones y abordando su intervención desde la diagnosis, la reparación y la prevención.

Enumeramos y desarrollamos a continuación las lesiones que están relacionadas directamente con la humedad proveniente del terreno por efecto de la capilaridad. Nos centramos en las lesiones debidas a la humedad que tienen este origen ya que la presencia de agua debida a otros orígenes (lluvia, condensaciones, rotura de instalaciones, etc.) en las edificaciones provoca a mayores otro tipo de deterioros. Las lesiones debidas a la humedad de capilaridad, como es obvio, se localizan por norma general en las zonas bajas y zócalos de las edificaciones.

En algunos casos es difícil conocer con exactitud cuál es la causa que ha provocado la lesión, ya que el aspecto externo que presentan a veces es muy parecido.

---

<sup>61</sup> LOZANO, A.; LOZANO, G.; DEL COZ, J.J.: "*Curso: Síndrome, patología, y terapéutica de las humedades*". Tomo 1. Lozano y Asociados. Consultores Técnicos de Construcción, S.L. Gijón, 2006.

<sup>62</sup> LOZANO, G.; LOZANO, A.; SANTOLARIA, C.: "*Curso de Tipología, Patología y Terapéutica de las Humedades*". Consultores Técnicos de Construcción, C.B. Oviedo, 1993.

<sup>63</sup> ORTEGA, F.: "*Humedades en la edificación*". Sevilla, 1994.

<sup>64</sup> ESBERT, R.M.; ORDAZ, J; ALONSO, F.J.; MONTORO, M.: "*Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*". Barcelona, 1997.

<sup>65</sup> MONJO, J.: "*Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos*". Madrid, 2010.

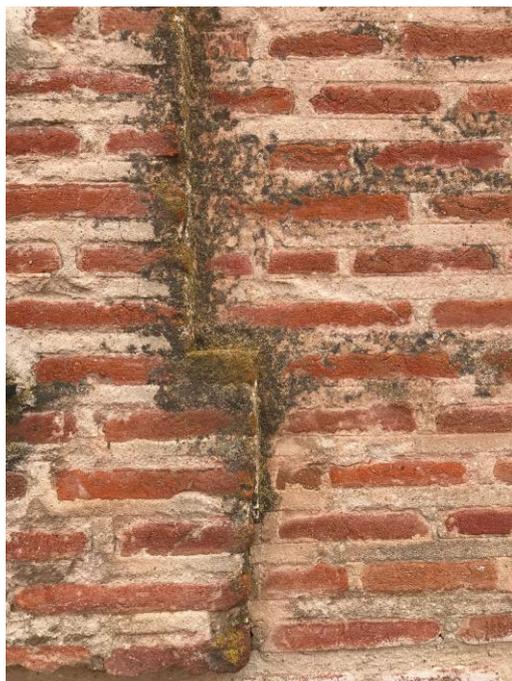
<sup>66</sup> MONJO, J.: "*Tratado de rehabilitación. Tomo 4. Patología y técnicas de intervención, fachadas y cubiertas*". Madrid, 1999.

- **Rotura o exfoliación de la cara superficial** de las fábricas, por el aumento del volumen del agua presente en las mismas debido a las heladas. El proceso se ve agravado por la sucesión de ciclos de hielo-deshielo, que acaban por reventar la superficie de los materiales de construcción. Esta quizá sea una de las lesiones más frecuentes debida a la presencia de la humedad de capilaridad.



Imagen 16. Detalles de degradación de ladrillos de tejar por procesos de hielo-deshielo

- **Haloclastia o rotura de la cara superficial** de las fábricas por aumentos volumétricos debidos a la cristalización de sales. La razón por la que las sales hacen su presencia en las fábricas tiene causas variadas: pueden estar aportadas por la argamasa o pueden proceder de las materias primas con las que se elaboraron los ladrillos. Pero lo más frecuente es que las sales estén presentes en el terreno y sean arrastradas, disueltas en el agua y por capilaridad, hasta el interior de las fábricas. El agua, al evaporarse, va depositando las sales en los poros de las fábricas hasta que el exceso de material cristalizado revienta la superficie del material.
- **Colonización de vegetación y/o degradación bioquímica.** Debido a la presencia de humedad que se aporta por la capilaridad a las fábricas es muy frecuente la presencia de plantas, musgos o líquenes, que acaban por deteriorar las fábricas, bien por la erosión que provocan las raíces o bien por la acción de los ácidos orgánicos procedentes de la descomposición de dichos materiales biológicos. Esta colonización se da normalmente cuando el agua es de "microcapilaridad", es decir, que no viene del terreno, sino de la misma acera y que se filtra por la junta entre la pared y la propia acera o por encima del rodapié.



Imágenes 17 y 18. Detalle de colonización de fábricas por líquenes y plantas

- **Depósitos de suciedad.** La existencia de humedad sobre los paramentos exteriores de los muros, en muchos casos favorece que sobre ellos se acumulen y se fijen depósitos de suciedad, que si bien es una lesión de carácter estético y no constructivo, en muchos casos influye negativamente en el aspecto externo y en la percepción de la edificación afectada. Es muy frecuente que dicha suciedad, junto con la presencia de musgos o líquenes antes citados, marque la cota que el frente húmedo alcanza en las fábricas.
- **Hidrólisis** o rotura de la estructura de algunos minerales por la acción de los iones de  $H^+$  y  $OH$  del agua. Sucede, por ejemplo, en la meteorización del feldespato, que se transforma en arcillas, y en el caso del granito puede llegar a la caolinización. Este tipo de lesión también puede estar provocado por agua proveniente de otras fuentes.

Hay otros deterioros, menos vinculados específicamente con las fábricas objeto de la tesis, y que no están directamente ligados a la humedad de capilaridad. Son más bien consecuencia de la presencia genérica de agua en las fábricas y muros, como son:

- **Oxidación:** proceso que puede deteriorar ciertos materiales metálicos al reaccionar estos con el oxígeno atmosférico. Este fenómeno provoca el aumento de volumen de las piezas metálicas sometidas al proceso de oxidación lo que a su vez puede ocasionar roturas de las fábricas a las que están recibidas.

- **Disolución:** fenómeno por el cual algunos materiales se pueden disolver en presencia de agua. Este proceso afecta a minerales solubles que están presentes en algunas rocas, como la caliza, dolomía, aljez, etc., y que en muchos casos van a formar parte de las fábricas.
- **Carbonatación:** proceso que ocurre cuando reacciona el hidróxido de calcio con el dióxido de carbono del gas atmosférico y forma el carbonato cálcico, que puede transformarse en bicarbonato, soluble el agua y susceptible de ser arrastrado por ella, lo que da lugar a la disolución de ciertas rocas y materiales.
- **Hidratación:** por la que el agua es incorporada a la estructura de algunos minerales, en ocasiones aumentando su volumen, como el sulfato de calcio hidratado. Este aumento de volumen provoca la rotura de la capa superficial si estos materiales forman gránulos de una cierta dimensión y están cercanos a la cara exterior. Como ocurre cuando granos suficientemente grandes de cal comúnmente conocidos como "caliches", están cerca de la superficie de los ladrillos.

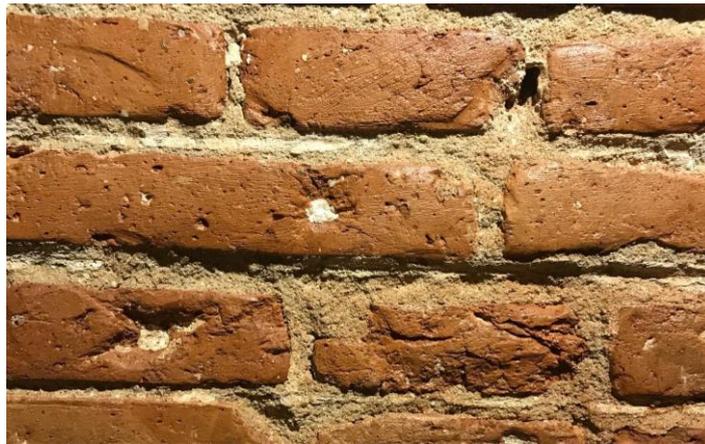


Imagen 19. Detalle de exfoliación de ladrillo de tejar por presencia de caliches superficiales

## 1.6. NORMATIVA

La influencia que tiene la presencia del agua en los materiales y en los sistemas constructivos es un tema tratado frecuentemente en la documentación y en la normativa relacionada con la edificación. Así pues se pueden encontrar en los apartados correspondientes de los documentos técnicos de materiales y en las propias normas de edificación referencias a aspectos como: tasas de absorción de agua, heladicidad, expansión por humedad y otros. La presencia de agua, si no está controlada o su cantidad no es la adecuada, deviene con frecuencia en lesiones, razón por la cual la normativa regula y determina cuales son los rangos de valores que se pueden alcanzar en los sistemas y materiales de construcción de modo que no se generen daños en los mismos. Para ello los documentos proponen métodos de ensayo que permiten determinar y cuantificar dicha presencia de agua.

Por este motivo se procedió al estudio de la normativa actual que existe sobre el tema con el fin de conocer cuál era la importancia y extensión que la misma daba a dicho fenómeno. Para ello se consultaron todas las normas de edificación que de una u otra forma abordasen el tema de la presencia del agua en las fábricas o en sus componentes y más concretamente la debida al fenómeno de la capilaridad y que describiesen ensayos relacionados con él. Se realizó un barrido de la documentación analizando por un lado las normas específicas de edificación, y por otro las normas UNE-EN. Tanto de las unas como de las otras se estudiaron únicamente las que tenían alguna relación con las fábricas de ladrillo y sus componentes.

Una primera clasificación es la que agrupa por un lado las normas que establecen recomendaciones sobre como ejecutar las fábricas en el proceso edificatorio, y otro grupo que engloba aquellas normas que describen y desarrollan ensayos.

### 1.6.1. NORMAS DE EDIFICACIÓN SOBRE FÁBRICAS DE LADRILLO

Respecto a éstas primeras, son normas que hacen referencia sobre todo a fábricas de ladrillo. Se han consultado las siguientes normas:

- *“MV 201-1972. Muros resistentes de fábrica de ladrillo”.*
- *“RL 88. Pliego general de condiciones para la recepción de los ladrillos cerámicos en las obras de construcción”.*
- *“NBE FL-90. Muros resistentes de fábrica de ladrillo”.*
- CTE

En general estas normas no aportan datos o procedimientos de mucho valor para la investigación que nos ocupa. A continuación se muestran los apartados expuestos en ellas que incluyen referencias relacionadas con el comportamiento de los materiales ante la presencia del agua:

- La norma MV 201-1972, en lo que al tema de la humedad se refiere, únicamente define los siguientes parámetros o procedimientos:

Absorción: Absorción de una clase de ladrillo es una medida de su capacidad de apropiación de agua, por inmersión total a largo plazo, obtenida en el ensayo definido en la norma UNE 7061.

Succión: Succión de una clase de ladrillo es una medida de su capacidad de apropiación de agua por inmersión parcial de corta duración, obtenida en el ensayo definido en la norma UNE 7268.

Estas normas UNE, y la propia norma MV 201, ya están derogadas y por lo tanto no han sido tenidas en cuenta para esta tesis.

- La norma RL 88 define los siguientes parámetros o procedimientos:

Succión: El pliego de condiciones técnicas particulares podrá fijar el límite de succión de agua de los ladrillos. En ningún caso deberá ser superior a 0,45 g/cm<sup>2</sup> por minuto.

Succión: Es la capacidad de imbibición de agua por capilaridad mediante inmersión parcial del ladrillo en un período corto de tiempo. La práctica de sumergir brevemente en agua los ladrillos antes de su colocación es aconsejable en cualquier caso e imprescindible si la succión es mayor de 0,15 g/cm<sup>2</sup> por minuto, para evitar la deshidratación del mortero que puede ocasionar problemas de penetración de agua a través de las fábricas.

- La norma NBE FL-90, no aporta nada sobre el tema, únicamente hace referencia a la humectación de los ladrillos antes de su puesta en obra.

- En el CTE (Código Técnico de la Edificación) si existen referencias al tema de la capilaridad o a los métodos para evitar sus efectos, pero básicamente se reducen a proponer la ejecución de barreras físicas mediante la colocación de láminas impermeables que eviten la entrada de agua por incidencia directa o por la ascensión de humedad por capilaridad en muros y otros elementos constructivos. En todo caso las recomendaciones son para obra nueva y no se hace referencia alguna a actuaciones en fábricas antiguas.

En el DB-HS (Documento Básico-Salubridad), concretamente en los apartados 2.1.Muros, 2.2. Suelos y 2.3 Fachadas, y más en concreto en los subapartados primeros, Grado de impermeabilidad, se definen las soluciones constructivas

destinadas a garantizar la impermeabilidad de los muros, diferenciando incluso entre los que son de hormigón de los que son de fábrica. Para ello propone la colocación de barreras impermeables con distintos tipos de materiales; detalla la colocación de drenajes y sistemas de evacuación de las aguas del terreno; describe cómo ha de ser la ventilación de las cámaras y aborda la resolución constructiva de los encuentros singulares, entre otros aspectos.

Del estudio de estas normas de edificación, se puede deducir que no aportan nada significativo al tema y que por supuesto no afrontan el problema de la capilaridad en edificios existentes en ninguna de sus vertientes. Las únicas referencias son dedicadas a obra nueva.

## 1.6.2. NORMAS SOBRE ENSAYOS

Las normas UNE-EN seleccionadas definen y describen sobre todo **ensayos** y los procedimientos que los desarrollan. Estos ensayos permiten conocer aspectos relacionados con el comportamiento de la humedad capilar en ladrillos y argamasas.

Respecto de estas **normas UNE-EN**, en una de las primeras fases de la investigación se llevó a cabo un extenso trabajo de recopilación y análisis de las mismas con el fin de elaborar un listado de aquellas que pudieran estar relacionados con el fenómeno de la capilaridad y de la absorción de agua, tanto por parte de las fábricas como de argamasas y ladrillos. Algunos de los datos o valores que se obtienen siguiendo los ensayos descritos por estas normas son utilizados con el fin de caracterizar materiales y productos de edificación de modo que sean óptimos para ser usados en el proceso constructivo, siempre y cuando estén dentro de los valores definidos por las normas. En nuestro caso estos ensayos, más que para saber si los materiales estudiados en esta tesis cumplen o no los estándares permitidos, han servido sobre todo para conocer el comportamiento del agua en los materiales estudiados y sobre todo para comparar entre sí los comportamientos de unos materiales respecto de otros. De entre todas las normas analizadas se hizo una selección de aquellas que realmente aportaban datos relevantes para la investigación.

El análisis de los resultados obtenidos en los primeros ensayos y la observación del comportamiento del agua sobre los materiales en los mismos hizo ver la necesidad de llevar a cabo otros ensayos no reglados con el fin de completar la información obtenida con los primeros. Estos nuevos ensayos, de diseño propio, han sido elaborados e ideados con el fin de adaptarse principalmente a la especificidad de los materiales sobre los que versa esta investigación y también con el fin de adecuarse a los tiempos necesarios para intentar recrear el proceso de la capilaridad, que normalmente son muy extensos. Pero la razón

fundamental por la que se han diseñado estos nuevos ensayos es porque si se desarrollaban únicamente los ensayos normalizados se generaban serias lagunas en la investigación, y algunos de los comportamientos que se deseaban estudiar no se podían hacer con el rigor y la profundidad requerida.

Dentro del listado elaborado con las normas seleccionadas hay algunas que están derogadas actualmente, como la UNE-EN 67027-84 que ha sido reemplazada por la UNE-EN 772-21, ambas determinan la absorción de agua por inmersión en agua fría. Sin embargo se han llevado a cabo varios ensayos bajo el procedimiento descrito por la norma derogada porque se ha comprobado que para determinadas condiciones de ensayo, los datos obtenidos con esa norma estaban más próximos al comportamiento real de los materiales, que los datos obtenidos con la norma vigente.

En el apartado 4.3.3. *Descripción y desarrollo de ensayos* se exponen más extensamente los seleccionados. En la tabla siguiente se muestra una parte de los que se han analizado, señalando aquellos que han sido seleccionados y los que no. De estos últimos se enumeran algunos a modo de ejemplo, ya que el número de normativas analizadas ha sido evidentemente mucho más amplio.

Este grupo de ensayos se pueden clasificar a su vez en dos grupos, los que están relacionados con la conservación del patrimonio, y los que hacen referencia a ensayos sobre materiales.

DENOMINACIÓN DEL ENSAYO	MATERIAL SOBRE EL QUE SE REALIZÓ EL ENSAYO			SE ACEPTO
	LADRILLO	ARGAMASA	FÁBRICA	SI/NO
<b>Ensayos normalizados según normas UNE-EN</b>				
<b><i>Ensayos sobre conservación del patrimonio</i></b>				
<b>UNE-EN 15801:2009.</b> Conservación del patrimonio. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.	SI	SI	SI	SI
<b><i>Ensayos sobre materiales</i></b>				
<b>UNE-EN 1015-18:2003.</b> Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.		SI		SI
<b>UNE-EN 67019:1966.</b> Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Definiciones, clasificaciones y especificaciones.	SI			SI

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

<b>UNE-EN 67027:1984</b> (Derogada). Ladrillos de arcilla cocida. Determinación de la absorción de agua por inmersión total en agua fría.	SI	SI	SI	SI
<b>UNE-EN 771-1:2003/A1</b> . Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1. Piezas de arcilla cocida.	SI			SI
<b>UNE-EN 772-3:1999</b> . Determinación del volumen neto y del porcentaje de huecos por pesada hidrostática de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.	SI	SI		SI
<b>UNE-EN 772-7:1999</b> . Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Determinación de la absorción de agua por inmersión en agua hirviendo de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería que sirven de barrera de vapor por capilaridad.	SI			SI
<b>UNE-EN 772-11:2001</b> . Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11. Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción inicial de las piezas de arcilla cocida para fábricas de albañilería.	SI	SI		SI
<b>UNE-EN 772-13:2001</b> . Determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería (excepto piedra nat.)	SI	SI		SI
<b>UNE-EN 772-16:2001</b> . Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 16. Determinación de las dimensiones.	SI			SI
<b>UNE-EN 772-21:2011</b> . Determinación de la absorción de agua de piezas para fábrica de albañilería de arcilla cocida y silicocalcáreas por absorción de agua fría.	SI	SI		SI
<b>UNE-EN 772-20:2001</b> . Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 20. Determinación de la planeidad de las caras de piezas para fábrica de albañilería de hormigón, piedra artificial y piedra natural.	SI			SI
<b>UNE-EN 772-2:1999</b> . Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Determinación del porcentaje de superficie de huecos en piezas de hormigón para fábrica de albañilería.				NO
<b>UNE-EN 772-9:1999/A1</b> . Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Determinación del volumen y porcentaje de huecos y del volumen neto, de piezas silicocalcáreas para fábrica de albañilería, mediante relleno de arena.				NO

**Tabla 1. Ensayos normalizados analizados**

## 2. METODOLOGÍA

## INTRODUCCIÓN

Comprobar cuál es la influencia que las juntas de argamasa tienen en el fenómeno de la capilaridad en las fábricas de ladrillo de tejar antiguo supone abrir un campo de trabajo muy extenso ya que en torno a este fenómeno se genera una variedad muy amplia de temas que analizar y procedimientos a desarrollar. Para intentar centrar el campo de trabajo y con el fin de ir extrayendo unas primeras conclusiones que diesen algo de luz sobre el tema se tomó como referencia la norma UNE-EN 15801 puesto que analiza específicamente el proceso de la ascensión capilar de la humedad.

Poner orden y temporalidad al desarrollo de esta tesis obligó a plantearse desde un principio una metodología que permitiese acometer todas las tareas con un orden lógico y posible y que permitiese sistematizar el trabajo. Metodología que si bien ha tenido una secuencia temporal más o menos correlativa en diferentes campos, estos se han solapado en el tiempo en muchas ocasiones. Todo ello teniendo en cuenta que el grueso de la investigación se iba a sustentar en la ejecución de **ensayos de laboratorio** muchos de los cuales se desarrollaron durante prolongados periodos de tiempo (uno de los ensayos, el realizado sobre cuatro muros de fábrica de unas dimensiones considerables, ha tenido una duración de casi tres años). De tal manera que la elección errónea de ensayos o la ejecución inadecuada de los mismos iba a conllevar pérdidas de tiempo innecesarias e irrecuperables.

Una vez planteadas las hipótesis de partida y fijados los objetivos se comienzan a desarrollar los trabajos encaminados al desarrollo de esta tesis.

Tras las primeras y exhaustivas indagaciones llevadas a cabo sobre el **estado del arte** respecto de los efectos de la capilaridad en las fábricas antiguas ejecutadas con ladrillos de tejar recibidos con argamasa de cal se pudo comprobar que **existía un vacío importante sobre este campo del conocimiento**, vacío que justifica por sí mismo el desarrollo de esta investigación. También se pudo comprobar que los acercamientos teóricos al fenómeno de la capilaridad no contemplaban toda la casuística que influye en este tipo de fábricas y en sus componentes, además de presentar dudas acerca de la idoneidad de las aproximaciones basadas únicamente en teorías matemáticas. Así pues se dedujo que habría que basar la ampliación del conocimiento en ensayos realizados sobre fábricas y sobre los materiales utilizados en su ejecución, el ladrillo y la argamasa de cal. Una vez terminada la fase del estudio del estado del arte, se comenzaron de forma prácticamente simultánea dos procesos, por un lado la **selección de los materiales** con los que se iban a ejecutar las probetas a ensayar, y por otro la **selección de los ensayos normalizados y el diseño de nuevos ensayos no normalizados** que se iban a llevar a cabo.

## SELECCIÓN DE MATERIALES

Fijados ya los objetivos y las hipótesis, analizado el estado del arte y comenzada la primera fase de análisis y selección de los ensayos, se iniciaron los trabajos dedicados a la **selección de los materiales** sobre los que llevar a cabo los ensayos.

Ya desde los primeros inicios del desarrollo de la tesis se tuvo claro que los ensayos se tenían que llevar a cabo sobre tres tipos de probetas, sobre los materiales que componen la fábrica y sobre la propia fábrica:

- De ladrillo
- De argamasa de cal
- De fábrica

Para seleccionar los ladrillos de tejar se plantearon varias premisas. Debían pertenecer a una zona geográfica determinada para intentar que fuesen lo más homogéneos posible (la definida en el apartado de la Introducción a la tesis), y poder disponer de un número suficiente de ladrillos de la misma procedencia que pudiesen ser fácilmente identificados.

Respecto de la argamasa el principal requisito era intentar reproducir con la mayor fidelidad posible las características de las usadas en su día. Se optó por una mezcla con proporciones similares a las usadas en la ejecución de las fábricas a estudiar. De la revisión de los tratados se dedujo que la argamasa que contenía una parte de cal por tres de arena era la más habitual y la cal debía ser una cal aérea.

Respecto de las fábricas, los manuales y las tipologías analizadas in situ determinaban la ejecución de paramentos con ladrillos humedecidos antes de ser colocados a restregón, con las argamasas amasadas hasta un punto de consistencia que se consigue con la práctica, y por este motivo se pidió la colaboración de un albañil experto en intervenciones de rehabilitación en este tipo de fábricas y materiales, de una zona rural del entorno geográfico estudiado. Las llagas y los tendeles debían ser de unas dimensiones similares a las que tienen las fábricas objeto de esta tesis.

A continuación se desarrolla brevemente la metodología utilizada para la elección y selección de los materiales.

### a) Ladrillos.

La elección de los ladrillos sobre los que se han realizado los ensayos ha sido una decisión ampliamente meditada, entre otras cosas y como ya se ha comentado, por la enorme variedad tipológica de ladrillos en lo que se refiere a sus dimensiones, porosidad y densidad

como se verá más adelante. Esto debido por una parte a las numerosas tejerías que proveían de ladrillos a la zona objeto de estudio y, por otra, a la heterogeneidad que existía en cuanto a formatos, mezclas, procedencias de las materias primas, y procesos productivos con alto componente manual.

Básicamente casi todos los ensayos se han llevado a cabo sobre ladrillos de tejar antiguos, si bien se ha decidido realizar algunos ensayos sobre otro tipo de ladrillos de fabricación moderna con el fin de comparar los distintos datos obtenidos y ver el grado de concordancia o de dispersión que podía existir entre piezas elaboradas en distinta época y con procesos de elaboración tan diferentes.

En lo que se refiere a los ladrillos de tejar, en un primer momento se procedió a ensayar una variedad significativa de ellos, con el fin de conocer cuál era la dispersión de los valores característicos de los ladrillos en lo relativo a tasas de absorción, desorción de agua, densidad y porosidad. Tras esta primera fase de ensayo se obtuvieron datos suficientes como para conocer de forma precisa cuál es el comportamiento del ladrillo de tejar entendido como un elemento aislado. Imprescindible, por otra parte, para poder evaluar el comportamiento de la fábrica.

Para tomar la decisión sobre qué tipo de ladrillo antiguo elegir se procedió a la recopilación de varios tipos de ladrillos que cumpliesen al menos los siguientes requisitos ya apuntados anteriormente: una antigüedad en torno a los 100 años, que hubiesen sido elaborados manualmente y con una cocción en hornos de leña. Para asegurarnos de su antigüedad buscamos piezas de recuperación de edificios existentes de los que conocíamos la fecha aproximada de su construcción, lo que nos garantizaba dicha antigüedad. Recopilamos al menos seis tipos de ladrillos de las zonas de Arévalo (Ávila), Serrada, Peñafiel y Pesquera de Duero, estos tres últimos municipios pertenecientes a la provincia de Valladolid.





**Imagen 20. Fotografías de los seis modelos distintos de ladrillos antiguos de tejar ensayados**

Una vez seleccionados los ladrillos se procedió a estudiarlos según normas que desarrollasen procedimientos que permitiesen conocer tasas y procesos de absorción de agua. Concretamente según los ensayos UNE-EN 772-11, UNE-EN 772-7, UNE-EN 15801 y UNE-EN 67027-84, y, con el fin de conocer si los valores relacionados con dichas tasas y velocidades de absorción eran más o menos similares en todos ellos o presentaban dispersiones muy grandes que pudiesen influir decisivamente en los ensayos a realizar con las fábricas.

La norma UNE-EN 15801 está redactada como norma de conservación de patrimonio y ha sido de suma utilidad por desarrollar un procedimiento específico para el estudio de la ascensión de la humedad por capilaridad que ha suministrado datos de mucho interés.

La norma UNE-EN 67027-84 está derogada, pero de la observación de los ensayos realizados se ha tomado la decisión de tomarla como ensayo de referencia. La razón es que el fenómeno que se está estudiando es un proceso que se desarrolla durante periodos de tiempo muy largos y esta norma, que mide la cantidad máxima de agua que es capaz de absorber un material por inmersión total en agua por tiempo indefinido, reproduce mejor el comportamiento real de las fábricas, de los ladrillos y de las argamasas, que la norma UNE-EN 772-21 que es la que sustituye a la UNE-EN 67027-84.

Se ha podido comprobar que el comportamiento de un grupo cualquiera de ladrillos de tejar de una misma procedencia presentaba ciertas dispersiones en sus valores, pero que estos valores estaban en un rango sensiblemente parecido entre ellos dentro de dicho grupo, que normalmente difería a su vez de los valores de otro grupo de ladrillos provenientes de otra cerámica. Estas variaciones consideramos que no debían de influir decisivamente en el comportamiento dentro de un conjunto heterogéneo como son los muros sobre los que se iban a ensayar. Así pues, tras el desarrollo de estos estudios preliminares, se decidió elegir para los ensayos unos ladrillos de recuperación tomados de la zona de Serrada (Valladolid), que presentaban en una de sus caras un sello con la denominación "La Operaria". Una de las razones por las cuales se optó por estos ladrillos fue precisamente la marca de este sello, lo que nos permitía su identificación, sobre todo teniendo en cuenta que hemos tenido que trabajar con un elevado número de piezas,

muchas de ellas de apariencia similar.



Imagen 21. Sello sobre la tabla del ladrillo de tejar tipo "La Operaria"

Para la elección de los ladrillos modernos se procedió a la adquisición de varios de ellos con la condición de que fuesen macizos y que tuviesen un aspecto similar al rústico. Tras proceder a su estudio se optó por un tipo de ladrillos modernos fabricados por extrusión, de una cerámica denominada Santoveña (Cantabria), que asemejan en su aspecto externo a los antiguos de tejar, si bien más pequeños y con mucha menos dispersión en sus dimensiones y que presentaban características diferentes a los de tejar.



Imagen 22. Ladrillos seleccionados para ensayos. Izquierda, ladrillo moderno fabricado por extrusión tipo "Santoveña", a la derecha ladrillo antiguo de tejar elaborado manualmente tipo "La Operaria"



Imagen 23. Acopio de ladrillos antes de la ejecución del ensayo 10.1 de los cuatro muros a la izquierda los ladrillos antiguos de tejar, a la derecha los modernos imitación rústico

### **b) Cal.**

Antes de tomar la decisión definitiva sobre la elección de la cal que se iba a usar en los ensayos para elaborar las argamasas, se procedió al estudio y análisis del estado de las investigaciones actuales y al estudio de documentos que facilitasen algún dato fiable sobre el tipo de cales que se usaban en la construcción de las fábricas antiguas. Fábricas del tipo de las que se analizan en esta tesis en las cuales los ladrillos habían sido recibidos con morteros de cal.

Tras el análisis de la documentación existente se optó por el uso de una cal aérea para la elaboración de la argamasa.

Así pues, se eligió una cal aérea del tipo Hidróxido de Calcio CL-90 S.

### **c) Arena**

Para la elección de la arena se procedió al estudio e investigación de las arenas existentes en el entorno de la provincia de Valladolid. De los datos investigados se dedujo que es una zona de arenas silíceas y se eligió para la elaboración de las argamasas una arena de río lavada, silícea, de granulometría de 0 a 4, según UNE-EN 933-1:2012.

### **d) Hidrofugantes**

La elección del hidrofugante fue, al igual que muchas de las decisiones sobre la elección de los materiales, una tarea difícil. Probar con varios tipos de productos se antojaba una tarea imposible por la cantidad de probetas que se deberían ensayar, la casuística tan elevada con la que nos podíamos encontrar, y la gran cantidad de tiempo que eso iba a suponer.

Se procedió a la recopilación de la información y posterior estudio del mayor número de productos hidrofugantes que existían en el mercado. Fruto de esta recopilación y a la vista de lo que las casas comerciales mostraban en las características técnicas de los productos y lo que la ciencia química preveía, se concluyó que la capacidad de hidrofugación de todos ellos parecía similar y satisfactoria. Como así queda demostrado en los estudios de Jesús Ángel Coronado<sup>67</sup>, en donde una investigación exhaustiva de los diferentes tipos de productos hidrofugantes estudiados por su equipo, concluye que el comportamiento de todos ellos, de cara a detener o mejorar el comportamiento de piezas cerámicas ante procesos de absorción es adecuada en todos los casos. Consiguiéndose reducciones de la tasa de absorción inicial respecto de las probetas no hidrofugadas de entre un 92,31% y un 96,44%, con una media de un 94,49 %, y de unas tasas entre el 73,67% y el 88,88% en el nivel de agua superficial, con una media del 78,89%.

Una vez analizada y documentada una gama de productos, se optó por elegir el producto denominado RAJASIL BLF, de la casa BASF, compuesto por silicato potásico y siliconato metílico de potasio. Este producto ya había sido utilizado con anterioridad en otros ensayos, se conocía su idoneidad y eficacia y el artículo citado en el párrafo anterior ya apuntaba la validez de este producto debido a su composición química.

## SELECCIÓN DE ENSAYOS

En lo que respecta a la fase relacionada con la búsqueda de ensayos y su selección se trataba de localizar aquellos cuyos procedimientos aportasen datos que permitiesen conocer como es el proceso de la entrada del agua en los materiales que conforman las fábricas debido al proceso de la capilaridad, así como determinar las diferentes tasas de absorción de agua, la influencia de las mezclas y poder así comparar los datos obtenidos entre ambos materiales. Se trataba por lo tanto de analizar en un primer momento el comportamiento del agua absorbido por capilaridad en ladrillos y argamasas. Esto mismo se pretendía para las fábricas pero se pudo comprobar que no hay normas que aborden este tipo de ensayos o estudios en lo que a ellas respecta.

Para la selección de los ensayos se llevó a cabo en primer lugar un procedimiento de búsqueda de todas las normativas que tuviesen algo que ver con el tema objeto de este estudio y que desarrollasen ensayos que permitiesen analizar procesos relacionados con la capilaridad o la presencia de humedad en materiales o sistemas constructivos similares a los estudiados. La mayor parte de las normas que han aportado ensayos de utilidad han sido sobre todo las **normas UNE**. El resto de normativas analizadas, CTE, normas NBE, etc., se han

---

<sup>67</sup> CORONADO, J.A, GARCÍA, A. PADIAL, J.F.: "Análisis mediante microscopio electrónico de barrido de la succión del ladrillo visto de fabricación industrial extrusionada hidrofugado". AXIOMA. Volumen 2, N° 11, pp: 27-23. 2013

desechado por no aportar procedimientos de análisis que fuesen de interés para el estudio que nos atañe.

Una vez seleccionados los ensayos a desarrollar, y una vez hecho acopio del instrumental necesario se procedió al desarrollo de los mismos. De manera que los primeros ensayos que se realizan son ensayos normalizados desarrollados todos ellos bajo normas UNE, y que son los siguientes:

### **Ensayos relacionados con la conservación del patrimonio cultural**

**UNE-EN 15801:2009.** Conservación del patrimonio. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.

### **Ensayos específicos sobre ladrillo**

**UNE-EN 772-7:1999.** Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Determinación de la absorción de agua por inmersión en agua hirviendo de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería que sirven de barrera de vapor por capilaridad.

### **Ensayos específicos sobre argamasa**

**UNE-EN 1015-18:2003.** Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.

### **Ensayos desarrollados sobre ladrillo y argamasa**

**UNE-EN 772-11:2001.** Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11. Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción inicial de las piezas de arcilla cocida para fábricas de albañilería.

**UNE-EN 67027:1984** (Derogada). Ladrillos de arcilla cocida. Determinación de la absorción de agua por inmersión total en agua fría.

**UNE-EN 772-21:2011.** Determinación de la absorción de agua de piezas para fábrica de albañilería de arcilla cocida y silicocálcareas por absorción de agua fría.

**UNE-EN 772-13:2001.** Determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería (excepto piedra natural).

**UNE-EN 772-3:1999.** Determinación del volumen neto y del porcentaje de huecos por pesada hidrostática de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.

**UNE-EN 772-16:2001.** Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería.

## Parte 16. Determinación de las dimensiones.

Una vez comenzados los primeros ensayos se pudo deducir que éstos aportaban información muy interesante para el análisis del comportamiento de los materiales que conformaban las fábricas, el ladrillo y las argamasas de cal, pero no aportaban apenas procedimientos e información alguna acerca del fenómeno de la capilaridad en las fábricas y por supuesto ninguna información que permitiese conocer la influencia que en dicho fenómeno podían tener las juntas conformadas por las llagas y tendeles.

De manera que una vez desarrollados los ensayos antes descritos, se comenzó a plantear la necesidad de idear nuevos **ensayos no normalizados de diseño propio**. Estos ensayos tenían mayoritariamente como objetivo fundamental analizar el comportamiento de la humedad capilar en las fábricas.

Con estos ensayos se quería obtener la siguiente información:

- Conocer la cantidad de agua que podían absorber las fábricas por capilaridad.
- Conocer la gradación del agua dentro de las fábricas.
- Conocer la cota del frente húmedo.
- Conocer la velocidad de los procesos de absorción y desorción del agua en las fábricas.
- Conocer la influencia específica que tienen las juntas de argamasa en el proceso de ascensión de la humedad por capilaridad.
- Conocer el grado de eficacia de la barrera química basada en el uso de productos hidrofugantes como sistema de corte hídrico para evitar la ascensión de la humedad por capilaridad en las fábricas.

Para intentar conseguir esta información se idearon ensayos de diseño propio que podemos clasificar en seis grupos según el objetivo que con ellos se quería conseguir:

### **1. Ensayos de verificación de las sondas termohigrométricas.**

Estos ensayos se comenzaron a llevar a cabo paralelamente al desarrollo de los primeros ensayos de diseño propio. La razón fue que en los primeros procedimientos en los que se empezaron a usar las sondas termohigrométricas se obtenían valores de humedad en probetas de los que no se sabía con certeza que correlación podían tener con la cantidad de agua contenida en la zona de medición. Así pues se diseñaron dos ensayos (**ensayos 7.1 y 8.1**), descritos con detalle en el apartado 4.3.3.2, con los que se pudo deducir por una parte, que las sondas eran muy sensibles a la presencia de humedad, es decir que detectaban cantidades de agua en

proporciones muy bajas, y por otra parte, que de un modo poco aproximado suministraban información acerca de la cantidad de agua que contenía la fábrica en el entorno del punto de medida de la sonda.

## **2. Ensayos previos de observación del proceso de capilaridad y de comprobación de la eficacia de la barrera hidrófuga.**

Como se pensaba realizar un ensayo sobre muros de una dimensión considerable para el estudio de la capilaridad y de la eficacia de la barrera hidrófuga ejecutada en la junta de argamasa, y como ya se había comprobado que los procesos de absorción de agua y de secado eran muy largos, se llevó a cabo este ensayo (**ensayo 9.1**) a menor escala para acortar los tiempos y comprobar si las intuiciones previas eran más o menos correctas antes de realizar los ensayos en los muros de mayor dimensión.

## **3. Ensayo para observación del proceso de capilaridad y de comprobación de la influencia de la barrera hidrófuga.**

Ha sido el ensayo no normalizado (**ensayo 10.1**) de más entidad de este trabajo de investigación, y ha consistido en la ejecución de cuatro muros de fábrica de ladrillo de grandes dimensiones recibidos con argamasas de cal, que durante un periodo de tiempo de casi tres años se ha sometido a procesos de absorción y desorción, y que tenía como objetivos principales extraer conclusiones sobre el fenómeno de la capilaridad en las fábricas, el comportamiento de los diferentes materiales, la influencia de las juntas, los tiempos de secado y de absorción de humedad, el comportamiento de las barreras hidrófugas, etc.

Las dimensiones de los cuatro muros han intentado reproducir, en ambiente de laboratorio y con la mayor aproximación posible, lo que ocurre en muros reales de dimensiones similares.

Una vez finalizado el ensayo se procedió al desmontaje controlado de cada muro, pesándose todos y cada uno de los ladrillos, y porciones de argamasa de prácticamente todos los niveles de llagas y tendeles con el fin de conocer exactamente la cantidad de agua que contenía cada elemento.

## **4. Ensayos específicos de comprobación de la influencia de las juntas de argamasa en la capilaridad.**

Uno de los principales objetivos que se pretendía conseguir era saber la influencia que sobre el fenómeno de la humedad capilar tenían específicamente las juntas de argamasa y para ello se diseñaron este grupo de ensayos. Han sido los ensayos 11.1, 12.1, 13.1 y 14.1. De todos ellos el más revelador fue el ensayo 11.1 ya que permitió observar sobre probetas realizadas con ladrillos idénticos la influencia de la junta.

Para el **ensayo 11.1** se construyeron probetas de fábrica pareadas que ejecutadas con ladrillos idénticos (se hicieron con medios ladrillos procedentes de la misma pieza) variaban el espesor de la junta de argamasa y el número de interfases, lo que permitió deducir la influencia de estos factores en la ascensión de la humedad por capilaridad.

El **ensayo 12.1** se llevó a cabo con una probeta de fábrica en la cual los ladrillos estaban totalmente hidrofugados. De este modo se obligaba al agua a ascender únicamente por la retícula continua que conforman las llagas y los tendeles. Lo que permitió observar con claridad la evolución de dicho proceso.

Con el fin de comprobar de un modo muy preciso la evolución de la humedad cuando ésta va pasando de un material a otro, salvando las correspondientes interfases, se llevó a cabo el **ensayo 13.1**. Para ello se elaboró una probeta superponiendo alternativamente dos ladrillos con dos tendeles de argamasa. Con ayuda de la cámara termográfica y de pesadas consecutivas a cortos intervalos de tiempo se pudo analizar con mucha precisión la evolución de la humedad cuando va alternando su tránsito por los diferentes materiales que conforman las fábricas.

Una de las dudas que se planteaba era la influencia que podía tener en la ascensión de la humedad la interfase vertical que se genera en las llagas entre el ladrillo y la argamasa. Para comprobarlo se diseñó el **ensayo 14.1**, en el cual se construyó un "sándwich" de ladrillo-argamasa-ladrillo colocado en vertical. De las imágenes obtenidas con la cámara termográfica se dedujo que la interfase no era una vía significativa para el ascenso del agua. Más bien se comprobó que era la banda de la argamasa la que facilitaba dicho ascenso.

##### **5. Ensayo de absorción de humedad del ambiente.**

Con el fin de comprobar si el aporte de agua debido a la humedad ambiente era o no significativo respecto de la aportada por la capilaridad se llevó a cabo el **ensayo 15.1**.

##### **6. Ensayo simultáneo de capilaridad en probetas de argamasas y ladrillo.**

Se diseñó este ensayo (**ensayo 16.1**) con el objetivo poder observar simultáneamente la evolución del ascenso del frente húmedo debido a la capilaridad en distintos tipos de probetas de ladrillos de tejar y en probetas de argamasa con distintas fechas de fraguado y con distintas proporciones en las mezclas (proporciones cal/arena: 1:2, 1:3 y 1:4).

Una vez fueron seleccionadas las normativas que planteaban aspectos que, a priori, parecían relevantes para el desarrollo de la tesis se procedió al análisis de todos los ensayos

que dichas normas desarrollaban. Llevar a cabo todos los ensayos inicialmente previstos implicaba el uso de un **instrumental** en muchos casos muy específico, de manera que se procedió a elaborar un inventario del mismo para poder disponer de él de una forma continuada. Parte del mismo se encontraba en el laboratorio de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Valladolid y el resto hubo de ser adquirido con posterioridad.

El instrumental ha sido utilizado, por una parte para la elaboración de las distintas probetas que se han ensayado, y por otra para la detección y observación de la evolución de la humedad en las mismas y para la obtención de datos. El más complejo ha sido el utilizado en estas últimas fases. Para ello han sido de suma utilidad sobre todo tres herramientas: la cámara termográfica, las sondas termohigrométricas y las básculas de precisión.

La información que han suministrado estos aparatos ha sido la idónea para el estudio que se ha llevado a cabo. Con la cámara termográfica se han obtenido imágenes que muestran con absoluta nitidez, no sólo la presencia de la humedad en las fábricas, sino también la gradación de dicha humedad en toda la extensión de la muestra. Con las sondas termohigrométricas se ha podido obtener información de la humedad y de la temperatura en distintos puntos de las probetas, introduciendo los sensores de dichas sondas en perforaciones realizadas en las mismas. Y con las básculas de precisión se han pesado muchas de las probetas con el fin de conocer la cantidad exacta de agua que contenían las mismas.



Imagen 24. Imagen tomada con la cámara termográfica. El color azul indica la presencia de agua. A la derecha imagen de una sonda termohigrométrica. En el extremo se ubica el sensor que mide los valores de humedad y  $t^{\circ}$

Como resumen de lo expuesto en este apartado de metodología se puede concluir lo siguiente:

Hay una primera fase de análisis y discusión acerca de la problemática que genera la humedad debida a la capilaridad en las fábricas antiguas ejecutadas con ladrillos de tejar

recibidos con argamasas de cal. Muy común en la zona geográfica de nuestro entorno.

A raíz del proyecto de investigación **BIA 2010-19245 "Protección frente a la humedad de las fábricas antiguas de ladrillo al descubierto. Estudio del empleo de hidrofugantes en su restauración"**, cuya directora es la profesora María Soledad Camino Olea, se me plantea la posibilidad de estudiar dicho fenómeno como tema de mi tesis.

Una vez analizado el estado del arte y comprobado el vacío existente en los estudios que abordan este tema se plantean unas hipótesis de partida y unos objetivos a conseguir, todos ellos relacionados directamente con el análisis de fenómeno de la capilaridad en las fábricas antiguas, y más concretamente con la influencia que en dicho fenómeno tienen las juntas de argamasa de cal con las que se reciben los ladrillos de tejar de ejecución manual.

Fruto de estas primeras actuaciones se abren dos campos de trabajo, por un lado la búsqueda de los materiales más idóneos sobre los que llevar a cabo la investigación y por otra la elección de ensayos que nos permitan analizar en laboratorio los siguientes aspectos: el fenómeno de la capilaridad; la influencia que las juntas de argamasa tienen sobre este proceso; y la eficacia que puede tener la ejecución de una barrera química a base de productos hidrofugantes como sistema para contener la ascensión de la humedad capilar en las fábricas.

Se llevan a cabo actuaciones encaminadas a la búsqueda y elección de los materiales más idóneos para la ejecución de los ensayos. Localizándose ladrillos perfectamente idóneos para los mismos y determinándose la correcta ejecución tanto de las argamasas de cal como de las fábricas a realizar según lo deducido del estudio realizado de manuales que explican la composición de las mezclas y la ejecución de las fábricas. Respecto del producto hidrofugante a utilizar se opta por uno de los muchos que existen en el mercado teniendo en cuenta estudios publicados sobre la idoneidad de los mismos.

Una vez seleccionadas las normas UNE se comienzan a desarrollar los primeros ensayos. Se obtienen los primeros datos que aportan una interesante y útil información sobre el comportamiento del agua en los materiales, pero ante las carencias que se detectan, se comienzan a diseñar y a desarrollar otros ensayos complementarios de diseño propio, destinados sobre todo a analizar el comportamiento de la humedad en las fábricas.

Durante la fase de ejecución de los ensayos se han obtenido datos relevantes y deduciendo importantes conclusiones parciales. Una vez concluidos todos los ensayos se ha procedido a la discusión final de resultados y a la elaboración de las conclusiones definitivas.

### **3. LOS MATERIALES Y LAS FÁBRICAS**

## INTRODUCCIÓN

Como ya se ha apuntado en el desarrollo de esta tesis, conocer cuál es la influencia que tienen las juntas de argamasa en el fenómeno de la ascensión de la humedad por capilaridad en las fábricas ha de hacerse teniendo en cuenta a su vez cuál es el comportamiento del ladrillo en presencia del agua y contrastar ambos. Como se pretendía observar esta influencia con la máxima amplitud posible, dentro de las posibilidades de espacio y tiempo de que se disponía, se ha realizado el mayor número de ensayos posible utilizando en ellos dos tipos de piezas cerámicas o ladrillos, unos antiguos de tejar elaborados manualmente, y otros de fabricación moderna elaborados mediante procesos de extrusión.

Conocer a fondo las características de cada uno de los materiales ha sido fundamental y de suma utilidad a la hora de interpretar muchos de los comportamientos observados, y de sacar las correspondientes conclusiones.

En este apartado se describen las características más importantes que definen los diferentes materiales constructivos que han formado parte de los ensayos realizados y que son, las fábricas y los componentes que las conforman, y los productos aplicados, aportando datos acerca de dimensiones, pesos, procesos de fabricación, características físicas, etc.

El desglose de estos materiales constructivos es el siguiente:

- Ladrillos
- Argamasa
  - Cal
  - Arena
  - Agua
- Productos hidrofugantes
- Fábricas

Los ladrillos y los productos hidrofugantes no han sufrido manipulación alguna y se han utilizado tal y como se han adquirido. La argamasa ha sido elaborada utilizando cal, arena y agua, cumpliéndose las recomendaciones que de por sí tienen dichos componentes, y ateniéndose a las proporciones, procesos de amasado y puesta en obra requeridos por los manuales y los conocimientos de la buena ejecución de obra.

A continuación se hace un recorrido por los distintos materiales mencionados con el fin de mostrar el conocimiento que se ha recopilado de cada uno de ellos.

## 3.1. EL LADRILLO

Si existe un material de construcción que evoca inequívocamente lo constructivo, ese es el ladrillo. Desde antiguo, el hombre ha intentado usar piezas pequeñas y manejables que le permitiesen alcanzar obras de mayor envergadura. Algunas de estas piezas se conseguían recogiendo tal y como se presentaban en la naturaleza, en forma de piedras, y en otros casos estas piedras se iban desbastando hasta conseguir la proporción adecuada. Pero en un primer atisbo de prefabricación el hombre quiso partir de lo pequeño para conseguir algo más grande y regular. Y moldeó tierra y barro para hacer formas paralelepípedicas, primero secadas al sol, y luego cocidas en horno para obtener más resistencia, dando lugar así al nacimiento del ladrillo.

Los primeros indicios que se tienen del uso del ladrillo datan de hace unos 11.000 años. Parece que sumerios y babilonios reforzaban los muros de adobes, con ladrillos cocidos ya que eran más resistentes que éstos.

Una parte muy importante de patrimonio, tanto nacional como internacional y, por supuesto, de nuestro entorno más cercano, está realizado con ladrillo, componiendo sistemas constructivos con funciones tanto estructurales como de cerramiento.

### 3.1.1. ELABORACIÓN DE LADRILLOS DE TEJAR. TIPOLOGÍAS Y CARACTERÍSTICAS

Los ladrillos que forman parte de los edificios objeto de este estudio y denominados en muchos lugares como ladrillos de tejar, son piezas elaboradas manualmente.

A continuación se expone brevemente cómo era el proceso de elaboración de este tipo de piezas cerámicas.

La ejecución comienza con la selección de las materias primas que solían provenir de un único sitio, pero que habitualmente se mezclaban con tierras o arcillas de dos o más procedencias. Unas conferían "cuerpo", mientras que otras aportaban materiales fundentes que facilitaban el proceso de cocción y que permitían la transformación de la materia prima en un producto cerámico mediante el uso de calor a elevadas temperaturas<sup>68</sup>.

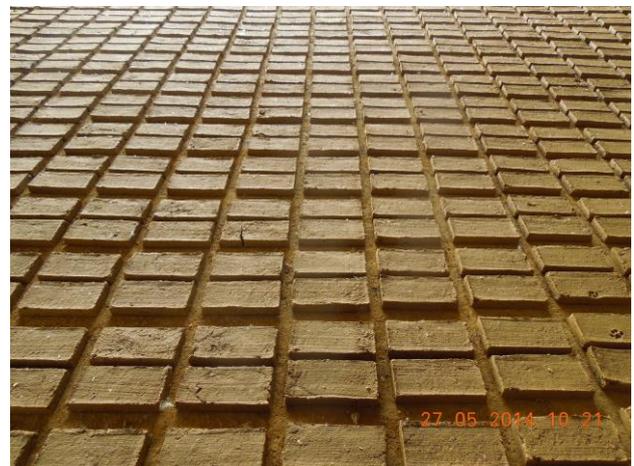
---

<sup>68</sup> Las fotos mostradas en este apartado y las explicaciones sobre la elaboración de ladrillos de tejar son fruto de las investigaciones que se realizaron en su día sobre la Cerámica Nietos de Eulogio Bernardos (Arévalo, Ávila), y que fueron expuestas en el XI Congreso Internacional de Construcción con Tierra - Tradición e innovación, XI CIATTI 2014, que se celebró en Septiembre, los días 26, 27 y 28, en Valladolid y Cuenca de Campos (Valladolid), en la comunicación de título: "Elaboración artesanal de adobes y ladrillos de tejar en la cerámica nietos de Eulogio Bernardos Artesanos, en Arévalo".



**Imagen 25. Ejemplos de tierras usadas en la elaboración de ladrillos de tejar. La muestra de la izquierda da "cuerpo" y las de la derecha aportan fundentes. Muestras reales de materias primas tomadas de una visita a una cerámica sita en el municipio de Arévalo (Ávila) donde en la actualidad aún se elaboran ladrillos de tejar manualmente en hornos de leña**

Una vez seleccionadas las tierras, se debía proceder a la molienda, a la mezcla, al añadido de agua y al amasado. Una vez consumada la fase de amasado, se procedía a verter la pasta de barro en unos moldes denominados menciales (imagen 26) que permitían a los operarios conseguir un paralelepípedo blando y húmedo, si bien con una cierta consistencia, que se colocaba de canto sobre el suelo hasta que se secaba. Una vez seco a temperatura ambiente y conseguida una consistencia que permitía su manipulación, se procedía a su colocación en hornos, de planta a veces circular y otras veces cuadrada, formando encastillados con ellos. Una vez lleno el horno comenzaba la aplicación de fuego (con temperaturas en torno a los 800 °C) durante periodos casi siempre superiores a los dos días, en los cuales se producía la transformación del producto inicial del barro en otro, que es el que conocemos como ladrillo, en el cual se ha llevado a cabo la cocción debido a una transformación química interna.



**Imagen 26. A la izquierda ejemplo de mencial o gradilla. A la derecha imagen de ladrillos de barro secándose antes de su introducción en el horno de leña**

Pudiendo llegar en algunos casos a la vitrificación de las piezas, dependiendo de su posición en el horno y de la pericia o no del artesano a la hora de "enrojar".



**Imagen 27. Ladrillos colocados en el horno ("encastillado") y enroje por la zona inferior a base de quemar biomasa: residuos de pinares y bosques, leña, etc. Fotografías tomadas de la visita realizada a la Cerámica Nietos de Eulogio Bernardos sita en el Municipio de Arévalo (Avila) en octubre de 2014. Taller cerámico operativo en la actualidad**

Conocer el proceso de elaboración de este tipo de ladrillos es fundamental para comprender su comportamiento y su aspecto, tanto a escala visual como a escala microscópica. Presentan todos ellos una configuración interna muy porosa con una mezcla de materiales muy heterogénea. Esto se puede apreciar con claridad tanto a simple vista como en las imágenes tomadas con el microscopio.



**Imagen 28. Imágenes de ladrillos de tejar. A la izquierda vista de la cara opuesta a la que se apoya en el suelo durante el proceso de secado, y a la derecha imagen a simple vista una vez seccionados con sierra de disco**

En esta heterogeneidad intervienen muchos factores, como son el tipo y la calidad de la materia prima, el proceso de la molienda o molturación y el amasado, la temperatura y el tiempo de cocción, su posición en el horno, etc. Esto a su vez influirá notablemente en el

comportamiento del ladrillo ante la presencia de agua. Si bien este aspecto se desarrollará con profundidad más adelante.

Debido a los procesos de elaboración la diversidad que nos encontramos en los ladrillos antiguos es notable en todas las características que le son propias: dimensiones, pesos, comportamiento ante procesos de succión y absorción, estructura (de los poros) y composición interna, etc.

### **3.1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS LADRILLOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN**

Para los trabajos de laboratorio se ha optado mayoritariamente por ensayar con dos tipos básicos de ladrillos. Macizos, sin ningún tipo de huecos, con una antigüedad en torno a los 100 años, de elaboración manual y cocidos en horno de leña. Y otros de aspecto rústico, también macizos, hechos en la actualidad, con un sistema de fabricación por extrusión.

No quiere esto decir que sean los únicos ensayados, pero son estos dos tipos de ladrillos sobre los que se han realizado todos los ensayos seleccionados bajo las Normas UNE correspondientes. Cada uno de estos dos tipos de ladrillos se ha tomado como representativo de su familia, es decir de la familia de los ladrillos de tejar antiguos y de la de los modernos de imitación a rústicos. Es importante reseñar que han sido estos dos tipos de ladrillos con los que se han ejecutado los ensayos realizados sobre probetas de fábrica, y en concreto con los que se construyeron los cuatro muros de uno de los ensayos más representativo de esta tesis, el ensayo 10.1.

Para la elección de los ladrillos de fabricación moderna, y continuando con la misma metodología seguida para los ladrillos de tejar rústicos, se recopilaron varias muestras de ladrillos, todos ellos de apariencia “rústica”, pero con una producción industrializada por extrusión. Después de analizar varios tipos diferentes de piezas se localizó un tipo de ladrillo macizo con unas características diferentes a los de tejar pero de una apariencia similar, elaborado en una cerámica sita en el municipio de Santoveña (Santander).

#### ***Ladrillos macizos de tejar antiguos obtenidos mediante procesos de elaboración manual.***

Los ladrillos antiguos han sido recogidos en la zona de Serrada (Valladolid). Esta es una zona perteneciente al entorno geográfico que hemos delimitado, y que posee un rico y variado muestrario de ejemplos de arquitectura realizada con fábricas de ladrillo macizo con juntas de argamasa de cal. Son muy numerosos y variados los ejemplos de edificaciones construidas con este tipo de fábricas; unos son de uso religioso como iglesias, ermitas, humilladeros, etc.; otros son edificios civiles como puentes, ayuntamientos, albergues, bodegas, etc.; y otros muchos son simplemente edificaciones destinadas a viviendas,

normalmente unifamiliares, con sus anexos como cobertizos, cuadras, tapias, etc., que conforman el entramado arquitectónico de muchos de los municipios de esta zona.

Las piezas cerámicas seleccionadas provienen de una misma tejería y tienen un estampado que los identifica como manufacturados por la empresa "La Operaria". Es fácil de observar en la tabla, en la opuesta a la que se apoya sobre el terreno cuando están recién salidos del mencil, la señal del paso de los dedos del artesano por la superficie, muestra de una compactación manual.



**Imagen 29. Detalle de ladrillo de tejar "La Operaria". Obsérvese la estampación y las señales del paso de los dedos del artesano**

Merece la pena destacar la belleza y la plasticidad de la imagen que muestra el corte realizado a las piezas cerámicas de este tipo, donde se pueden apreciar a simple vista los materiales originales, los cuales se entrelazan unos con otros como queriendo fundirse entre sí pero sin conseguirlo del todo.



**Imagen 30. Imágenes de ladrillos de tejar de "La Operaria" una vez cortados con la sierra de disco y detalle**

Además de ensayar estos ladrillos se han estudiado otros, todos recuperadas de edificios antiguos de los que se ha podido datar su fecha de construcción de un modo bastante

aproximado, lo que nos garantiza una antigüedad de los ladrillos en torno a los 100 años.

Es interesante observar la estructura interna de este tipo de ladrillos con más detalle del que se puede observar a simple vista y compararlo a su vez con el resto de los materiales, a saber, el otro tipo de ladrillo y la argamasa. Se puede apreciar una estructura y disposición de poros y oquedades mucho más voluminosas y dispersas de las que se ven en los otros materiales mucho más homogéneos.

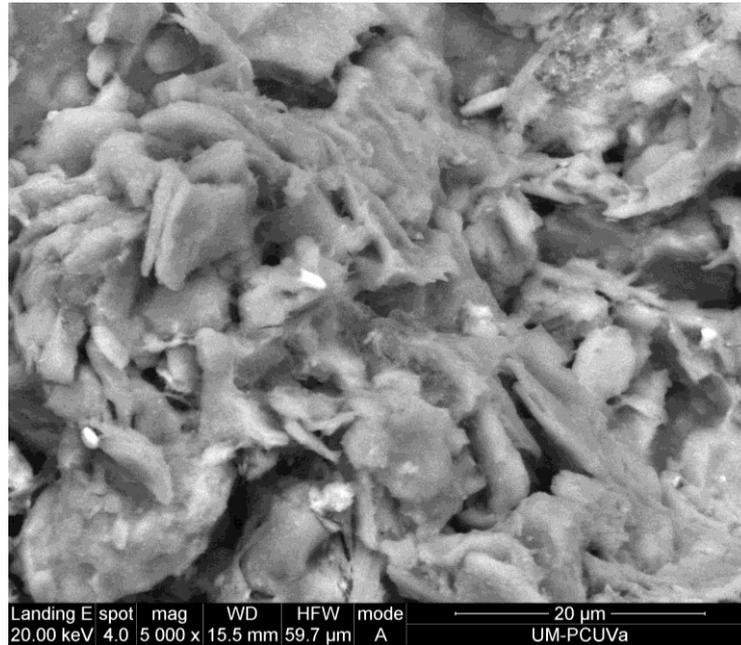


Imagen 31. Foto con el MEB de muestra de ladrillo de tejar tipo “La Operaria”

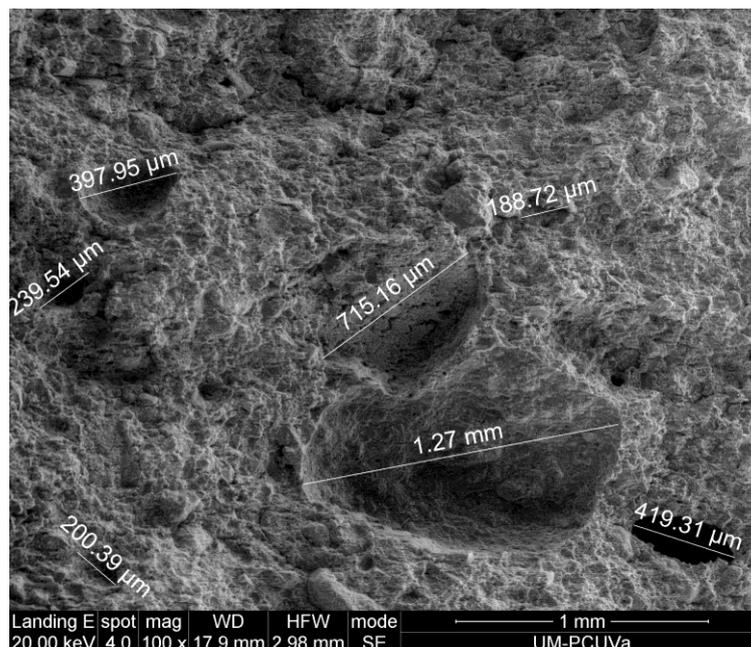


Imagen 32. Foto con el MEB de muestra de ladrillo de tejar de “La Operaria”

Las piezas escogidas tienen unas dimensiones cuya media está en torno a los 280 x 140 x 46 mm, con variaciones en la soga que pueden llegar casi a los 20 mm, y un peso medio de unos 3150 gramos, con variaciones de hasta 700 gramos. Es importante tener en cuenta esta heterogeneidad de valores ya que afecta a otros parámetros a la hora de interpretar resultados y sacar conclusiones. Estamos ante un material que presenta un alto grado de heterogeneidad debido, como ya se ha comentado, a los procesos propios de fabricación de estos ladrillos, la elaboración manual, la falta de un proceso industrializado y normalizado, la ubicación de las piezas dentro de los hornos de cocción, etc.

Aunque se han utilizado en los ensayos realizados a lo largo del desarrollo de la tesis más de trescientos ladrillos de este tipo a continuación se muestran, en la tabla 2, las dimensiones, pesos y algunas de las características de una selección de 10 de ellos con el fin de apreciar la dispersión de valores, el rango en el que oscilan y tener una idea del valor medio de cada parámetro. Para la determinación de las dimensiones se han seguido las indicaciones y los procedimientos descritos en la norma UNE-EN 67030-86.

	Dimensiones (mm)	Peso (gr)
Pieza 1	283 x 141 x 49	3074,1
Pieza 2	275 x 135 x 47	3156,2
Pieza 3	266 x 142 x 51	3189,3
Pieza 4	278 x 138 x 48	3176,4
Pieza 5	279 x 140 x 47	3082,1
Pieza 6	283 x 142 x 48	3073,5
Pieza 7	277 x 135 x 46	3082,7
Pieza 8	280 x 140 x 46	3205,1
Pieza 9	275 x 135 x 46	3163,7
Pieza 10	282 x 140 x 46	3299,8
<b>MEDIA</b>	<b>278 x 139 x 47</b>	<b>3150,3</b>

Tabla 2. Dimensiones de una serie de ladrillos de tejar de elaboración manual

La dispersión de las dimensiones para la soga son de 278 +5 y -12 mm, para el tizón de 139 +3 y -4, y para el grueso de 47 +4 y -1.



Imagen 33. Ladrillo de tejar de recuperación. "La Operaria"

Se han realizado ensayos con diferentes ladrillos de tejar de otras procedencias, si bien de características similares en lo que se refiere a dimensiones, peso, procesos de elaboración y aspecto exterior. Los datos obtenidos según los ensayos definidos en las normas UNE se pueden consultar en la tabla 1 correspondiente donde se hace un resumen de todos los ensayos realizados. Esta decisión se tomó con el fin de comparar el comportamiento de unos ladrillos en relación a otros y comprobar qué grado de dispersión presentaba este material. Como se puede apreciar en dicha tabla los valores presentan una dispersión significativa, hecho por otra parte previsible, al ser el ladrillo cerámico de tejar un producto que en aquella época presentaba una ausencia casi total de normalización.

Se muestran a continuación secciones de varios tipos de ladrillos de tejar con el fin de poder compararlas. Las primeras cuatro imágenes pertenecen todas ellas a ladrillos tipo "La Operaria". Es interesante observar cómo aun siendo ladrillos del mismo tipo y de la misma cerámica y procedencia, la estructura interna ya es sensiblemente diferente entre ellos. Los siguientes ladrillos son de tejar de diferente procedencia, si bien de la misma zona objeto de este estudio. Se puede apreciar cómo las secciones son ciertamente heterogéneas.

Bien es cierto que, a pesar de la dispersión de valores y de apariencia para un conjunto de ladrillos de tejar de la misma procedencia, se mantiene entre ellos una cierta homogeneidad si comparamos estos valores con los obtenidos para otro grupo de ladrillos de ejecución moderna. Es decir que sus características diferencian notablemente a ambos tipos de ladrillos.

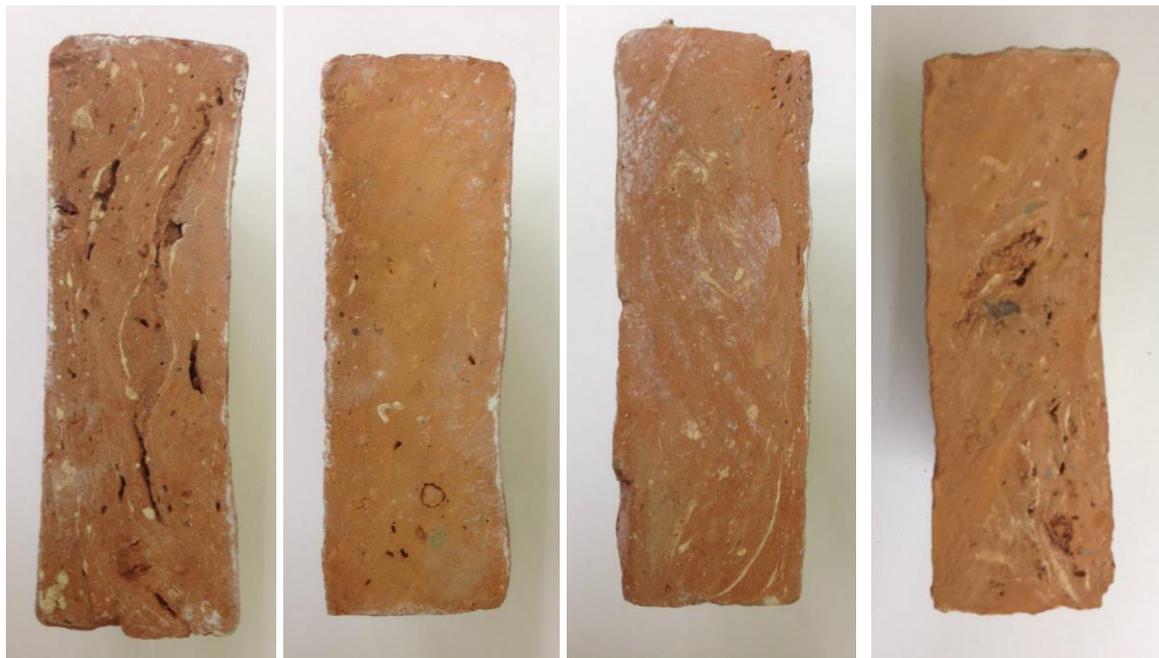


Imagen 34. Secciones de distintos ladrillos de tejar de recuperación todos ellos de la tejería "La Operaria".  
Obsérvese la disparidad de configuraciones aun siendo piezas de la misma cerámica.



Imagen 35. Secciones de ladrillos de tejar de recuperación todos ellos procedentes de distintas tejerías de la zona  
de Serrada (Valladolid)

**Ladrillos macizos modernos imitación a antiguos fabricados mediante procesos de extrusión.**

Los ladrillos de otro tipo con el que se han realizado ensayos sobre probetas de fábrica son los denominados "ladrillos modernos", procedentes de la Cerámica Santoveña (Santander).

Su apariencia externa es tipo rústico, y son macizos al igual que los anteriores. A diferencia de aquellos son mucho más uniformes en medidas, peso y comportamientos. Son mucho más homogéneos porque su proceso de fabricación está mucho más mecanizado e industrializado, la trituración deja la materia prima con un árido mucho más fino, y su proceso de fabricación es por extrusión. La comparación a simple vista de las caras vistas de ambos ladrillos y de sus caras seccionadas nos permite apreciar con claridad las diferencias entre unos y otros.



**Imagen 36. Imágenes del ladrillo de ejecución moderna por extrusión. Obsérvese en la sección como la zona central no presenta siempre el mismo tono, por falta de cocción.**

Al igual que se ha hecho con los ladrillos de tejar, se muestran a continuación imágenes tomadas con el microscopio de barrido (ver características del aparato en el apartado correspondiente al instrumental). Se aprecia con claridad una estructura interna muy diferente a la de los otros ladrillos. Con poros y oquedades mucho más pequeños y una estructura mucho más uniforme y homogénea.

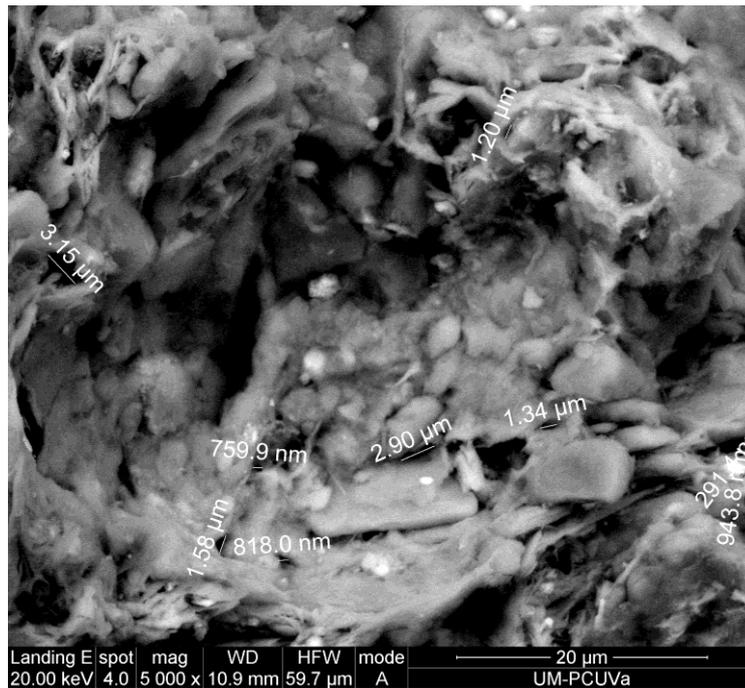


Imagen 37. Foto con el MEB de muestra de ladrillo moderno por extrusión.

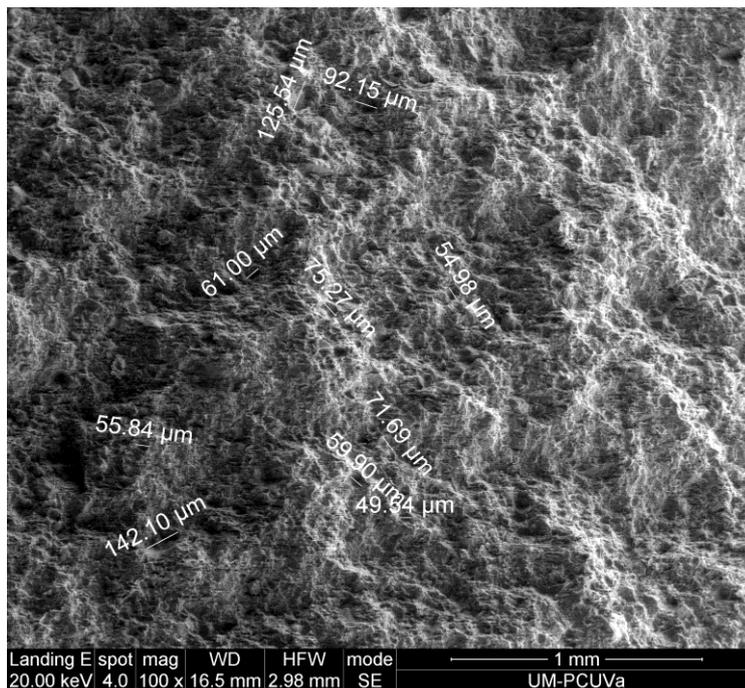


Imagen 38. Foto con el MEB de muestra de ladrillo moderno por extrusión.

Aunque se han utilizado a lo largo del desarrollo de la tesis más de doscientos ladrillos de este tipo, a continuación se muestran, en la tabla 3, las dimensiones, pesos y algunas de las características de una selección de 6 de ellos.

La dispersión de las dimensiones para la soga son de  $241 +5$  y  $-7$  mm, para el tizón de  $108 +1$  y  $-2$ , y para el grueso de  $38 \pm 0$ .

	Dimensiones (mm)	Peso (gr)
Pieza 1	240X106X38	1715,80
Pieza 2	234X109X38	1750,30
Pieza 3	243X109X38	1845,30
Pieza 4	241X106X38	1782,50
Pieza 5	246X108X38	1865,80
Pieza 6	244X108X38	1881,40
<b>MEDIA</b>	<b>241 x 108 x 38</b>	<b>1806,80</b>

Tabla 3. Dimensiones de una serie de ladrillos de elaboración moderna por extrusión



Imagen 39. Ladrillo de ejecución moderna tipo "Santoveña"

Los resultados que se muestran son valores representativos de los datos que se han obtenido de todo el conjunto de ladrillos que han formado parte de los ensayos. Como se puede comprobar la dispersión de algunos valores es mucho más significativa en los ladrillos de tejar antiguos que en los de ejecución moderna, como era de esperar.

## 3.2. LA ARGAMASA

La argamasa de cal es el material de construcción sobre el que se ha puesto el interés principal de esta tesis. Es el producto que permite unir y asentar las piezas cerámicas que van a conformar las fábricas. Durante mucho tiempo, y antes de la irrupción de los morteros de cemento, las argamasas de cal han sido las encargadas de conformar, junto con los ladrillos, estas fábricas con las que se han erigido innumerables edificaciones de todo tipo y sobre las que se han dirigido las investigaciones de esta tesis.



Imagen 40. Fábricas de ladrillos de tejar con juntas de argamasa con distintas configuraciones

Las argamasas de cal están compuestas por una mezcla de cal, arena y agua, en unas determinadas proporciones. En algunos casos además de estos materiales se añadían aditivos con el fin de mejorar determinados comportamientos de las masas. Antes de tomar la decisión acerca de cuál tendría que ser la proporción que deberían tener entre sí los materiales con los que se iba a elaborar la argamasa se realizaron las correspondientes investigaciones. Hay una cierta dispersión en los datos históricos acerca de la proporción concreta de las mezclas con las que se preparaban las argamasas de cal. En un intento por recabar datos de cómo se ejecutan estas masas en la actualidad, además de los extraídos de la bibliografía especializada, se han mantenido conversaciones con albañiles de edad avanzada y de larga tradición en obra y que aun han tenido ocasión de utilizar argamasas de cal en sus obras. Hecho que no ha sido fácil, ya que en la albañilería actual este tipo de argamasas han estado en desuso durante las últimas décadas. Si bien es cierto que hay una cierta vuelta a su uso en la actualidad debido a las innumerables lesiones que han devenido del mal uso que se ha hecho de los morteros de cemento. Por ser este material, el mortero de cemento, un producto muy impermeable al paso del vapor de agua, muy poco transpirable, y que ha sido utilizado con mucha frecuencia como revestimiento, ha agravado el problema de la humedad capilar en los muros de fábrica de ladrillo al no

permitir la evaporación del agua contenida dentro de los mismos.

Son numerosos los autores que han defendido el uso de las argamasas de cal como material de restauración: *“La utilización indiscriminada y sistemática de los morteros de cemento en obras e intervenciones de Conservación y Restauración del Patrimonio Arquitectónico, ha roto con la técnica milenaria de la cal, capaz de preservarlo y transmitirlo durante cientos de años [...] Las cualidades y propiedades del cemento prometían un magnífico comportamiento y gran durabilidad, su uso suponía incluso acabar con las tareas periódicas de mantenimiento de los morteros tradicionales de cal. Todo el mundo pesó que la utilización de los morteros de cemento iba a ser un gran adelanto, que sus óptimas cualidades resistentes e impermeables supondría una mayor protección de los muros de fábrica tradicionales. Sin embargo, el cemento Portland ha sido uno de los materiales modernos cuyo uso a causado mayor cantidad de problemas en edificios de estructura de muros de fábrica tradicionales”*.<sup>69</sup>

Las referencias que encontramos en los tratados y manuales antiguos, cuando estos se refieren a la proporción que han de tener la cal y la arena a la hora de preparar la argamasa, coinciden mayoritariamente en que esta proporción no es constante y que depende de la cal y del tipo de arena, aunque las más utilizadas sean las proporciones de una a dos y sobre todo la de una a tres, para levantar obras de fábrica: *“Lo mas común es dar una espuerta de cal a dos de arena cuando menos, y tres de arena y una de cal cuando mas. Hay cal que todavía resiste mas mezcla de arena”*<sup>70</sup>. Esta proporción se analiza de manera más precisa en los tratados del siglo XIX en los que relacionan la cantidad de cal necesaria con la granulometría de la arena: *“La cantidad de cal depende del hueco que tienen las arenas, el cual se averigua por medio del agua que se vierte en un volumen dado de arena”*<sup>71</sup>.

Como finalmente se tuvo que tomar una decisión sobre la proporción de las mezclas que se iban a utilizar para la fabricación de las argamasas, se decidió que la proporción que más se acercaba a lo que las publicaciones describían, y a lo que los albañiles apuntaban sobre su uso, era mezclar una parte de cal por tres de arena en volumen (1:3). Esta ha sido la proporción que se ha usado para la elaboración de los morteros en todas las fábricas de las distintas probetas que se han usado para los ensayos.

---

<sup>69</sup> IGLESIAS, M<sup>a</sup>. C.: *“Análisis de la variación de la composición de los morteros utilizados en los muros de fábrica tradicionales: Compatibilidad de los morteros tradicionales de cal y la incompatibilidad de los morteros de cemento en funcionamiento constructivo y estructural de los muros de fábrica tradicionales”*. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Ed. Instituto Juan de Herrera, CEHOPU. Madrid, 1996

<sup>70</sup> DE VILLANUEVA, J.: *“Arte de Albañilería o instrucciones para los jóvenes que se dediquen a él, en que se trata de las herramientas necesarias al albañil, formación de andamios, y toda clase de fábricas que se puedan ofrecer”*. Madrid, 1827

<sup>71</sup> Ger y Lober, F.: *Tratado de Construcción Civil*, Editado La Minerva Extremeña. Badajoz, 1898

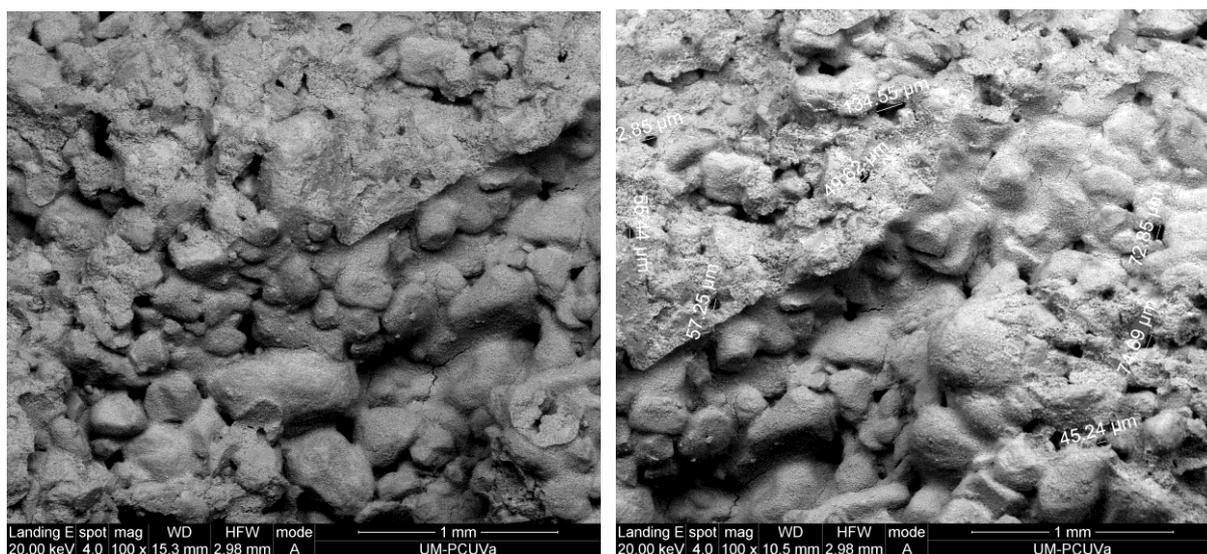


Imagen 41. Fotos con el MEB de muestra de argamasa de cal en proporción 1:3.

Con el fin de conocer la influencia que puede tener el porcentaje de las mezclas sobre las tasas de absorción de agua y sobre el comportamiento de la humedad capilar sobre la argamasa se han realizado ensayos sobre probetas con otras dos proporciones de mezcla 1:2 y 1:4, y con probetas hidrofugadas y sin hidrofugar. Los resultados obtenidos se describen con detalle en los ensayos correspondientes.

La cantidad de agua a añadir a la mezcla también varía en función de las fuentes consultadas. Depende mucho de la naturaleza de la cal, de su pureza, y también de la propia arena en función de su granulometría y de la humedad que tiene en el momento de hacer la mezcla. Los tratados comentan que el agua se va añadiendo, en proporciones en torno a dos partes de agua por una de cal, en función de la textura que va adquiriendo la masa según se hace el proceso de amasado. Se va añadiendo el agua hasta que la masa adquiere una "ligazón" especial, que determina la experiencia y el buen saber del operario.

De los ensayos realizados a las probetas de argamasa, normalizadas y sin normalizar, se ha podido comprobar cómo, además de la relación cal/arena/agua, influyen en el comportamiento de las argamasas otros aspectos como el procedimiento de amasado y el de la compactación.

### 3.2.1. COMPONENTES

A continuación describimos los elementos que forman parte de la argamasa. Desarrollando, según el caso, campos como pueden ser: referencias históricas, fundamentos químicos, normativas, recomendaciones de uso, limitaciones o restricciones, etc.

### 3.2.1.1. LA CAL

#### Antecedentes

Del libro "Artes de la cal", de Ignacio Gárate Rojas<sup>72</sup>, profundo conocedor de la cal y de sus aplicaciones, extraemos algunas reseñas que nos dan idea de la realidad histórica de este elemento.

Se tienen muchos datos que corroboran el uso de la cal a lo largo de la historia de la humanidad en todas las zonas del planeta donde ha habido asentamientos humanos. La abundancia del material y su facilidad de extracción y manipulación han sido con toda seguridad clave para su utilización. En las diferentes civilizaciones donde se ha utilizado ha tenido aplicaciones ciertamente similares, tales como mortero para fábricas, base para frescos y pinturas, como material pigmentado con el que hacer revestimientos decorados, etc. Si bien en cada una de ellas con peculiaridades propias de cada grupo humano, por ejemplo en lo que se refiere a la proporción de los materiales que componían la mezcla, o los distintos aditivos que cada uno aportaba al conjunto: restos animales, fibras vegetales, pigmentos, gomas, resinas, ceras, etc.

Los datos más antiguos del uso de la cal datan de la cultura de Anatolia en la actual Turquía (6000 a. J.C.). En Mesopotamia se han encontrado vestigios de un horno de cal de una fecha aproximada de 2500 a. J.C. En esta zona se realizan numerosos hallazgos de esplendidos ejemplos de utilización de la cal, como el palacio asirio de Til Barsib, pinturas murales de Mari, la ciudad caldea de Ur, patria de Abraham y otros muchos más ejemplos.

En Europa se han datado usos de este material en las cerámicas del estilo campaniforme español entre los años 2000 a 1500 a. J.C. y en La Tène (Suiza) aproximadamente por el S. V a. J.C.

La cultura maya, cuya época más floreciente fue entre los años 300 a 900 de nuestra era, hizo uso de la cal en sus centros ceremoniales de Copan, Palenque, Chichéntzá y otros. En las culturas del Perú antes de la llegada de la colonización, ya se utilizó la cal.

En el antiguo Egipto se sabe que para la unión entre las piedras de la pirámide de Keops se utilizó escayola (sulfato de calcio semihidratado) fechándose su uso sobre el 2600 a. J.C. Este material y sus derivados se utilizaron con mucha profusión en esta civilización para otros usos como revestimientos de suelos y paramentos, bases para frescos y pinturas murales, decoración de sarcófagos, etc.

---

<sup>72</sup> GÁRATE, I.: "Artes de la cal", Instituto Español de Arquitectura. Universidad de Alcalá de Henares. Madrid, 1993. págs. 61-77

En la cultura minoica también hay indicios de su uso en construcciones entre los siglos XIV y XV a.J.C. Igualmente en Grecia se han encontrado los restos más antiguos en edificaciones en torno al 1400 a.J.C. Incluso en la India el uso de la cal estaba ampliamente extendido en la antigüedad, con la particularidad de que en la documentación estudiada se hace mención a una amplia presencia de aditivos a base de productos animales y vegetales.

Es la civilización romana la que da un impulso de mejora en la fabricación de la cal y en las distintas técnicas de puesta en obra. La expansión del imperio ayudó a la extensión, comprensión y difusión de este material constructivo.

Las citas más antiguas de las que se tiene constancia son del siglo II a.J.C., con menciones al Opus caementicium. Son los textos de Vitrubio los que nos dan las informaciones más completos sobre el uso de este material. Gracias a sus tratados tenemos los primeros datos sobre las proporciones de las mezclas. La proporción entre la cal y la arena debía de ser de uno a tres en volumen (es la que hemos utilizado para los ensayos de laboratorio en nuestras fábricas y probetas), o de dos a cinco según la calidad de los materiales. Se menciona igualmente el uso de aditivos como la ceniza volcánica.

Los romanos mejoraron las propiedades hidráulicas del mortero a base de añadir arcilla cocida y puzolana a la cal. Consiguieron unos morteros de una calidad excepcional cuidando con esmero el cocido de las calizas, su buen apagado, la homogeneidad de las dosificaciones y la correcta ejecución constructiva.

En Bizancio, entre los siglos III al XIII, para la construcción de fábricas o bóvedas se ejecutaban gruesas llagas de tres a cuatro centímetros de mortero de cal. Usaban un mortero de aspecto rugoso en el que junto a la arena se añadían trozos de ladrillo.

De la época del medievo, se tienen pocos datos, si bien se sabe que tras la caída del imperio romano no hubo ningún progreso notable en el campo de los morteros de cal. Se produce una amplia dispersión en función de cada región o país, y la calidad en muchos casos baja considerablemente. Es Viollet-Le-Duc (1814-1879) el que hace un estudio bastante exhaustivo de los morteros de la época medieval.

Según sus estudios en los siglos IX, X y XI, los morteros encontrados son de calidad mediocre y por su naturaleza porosa son más permeables al aire y permiten una mejor carbonatación de la cal.

A comienzos del s. XII y por motivos económicos se obliga a los constructores a mezclar arena y cal con tierra, con lo que se obtienen morteros de muy baja calidad como ocurre en las catedrales de Laon, Troyes y Chalons-Sur-Marne.

A partir del siglo XVII es cuando se comienzan a producir los aglomerantes hidráulicos, es decir aquellos que son capaces de endurecer en presencia de agua. Ya los griegos consiguieron fabricar morteros resistentes al agua añadiendo aditivos. Los romanos generalizaron el uso de morteros de cal y puzolana. En 1756 se descubren los aglomerantes hidráulicos en un intento por conseguir una mezcla lo más eficiente posible para la construcción del faro de Eddyston en Plymouth. El hecho de que los tratados romanos determinasen que para la obtención de una buena cal era necesario partir de una caliza muy pura, retrasó la incorporación a las mezclas de calizas con arcillas. Sin embargo los estudios de Vicat, a inicios del siglo XIX, demostraron que las propiedades hidráulicas de los morteros dependen de los componentes que se forman entre la cal y los constituyentes de la arcilla durante la cocción.

En el año 1824 se patenta un producto, un cemento "tan duro como la piedra de Portland". Dando lugar a la incorporación al proceso constructivo de los morteros hidráulicos actuales. Con posterioridad se descubre el clínker que es el cemento que en la actualidad conocemos como cemento "Portland". Desde finales del siglo XIX, las aportaciones al avance del cemento "Portland" no han sido muy significativas.

Hasta hace pocas fechas la cal había caído en desuso casi totalmente, arrinconada por la irrupción del cemento como elemento para ejecutar morteros. Si bien la aparición de numerosas lesiones debidas al mal uso de estos morteros ha hecho resurgir de nuevo, eso sí lentamente, la aplicación de argamasas de cal. Estas podemos encontrarlas en la ejecución de muros y en sus revestimientos en muchas de las construcciones históricas, siendo por lo tanto un material muy utilizado en intervenciones de restauración de este tipo de edificaciones. Se pueden encontrar para su uso como material de construcción dos tipos de cales: La cal aérea y la cal hidráulica.

### **El material, composición y clases**

La piedra caliza, materia prima de lo que conocemos como cal, está compuesta por carbonato cálcico y carbonato magnésico o dolomítico en diferentes proporciones. El carbonato magnésico al calcinarse se descompone formándose óxido de magnesio, el cual retarda la recarbonatación del óxido cálcico dificultando así la elaboración del producto final. Por ello, deben distinguirse las cales de composición cálcica o dolomítica según el porcentaje de magnesio que éstas contienen.

Se denomina cal cálcica aquella cuyo contenido en óxido de magnesio es inferior al 5%. Análogamente, denominaremos cal dolomítica aquella que tenga un contenido en óxido de magnesio entre el 5% y el 30%, ya que en porcentajes superiores no se contempla para

trabajos de construcción.

Según la naturaleza de las cales, se establece una segunda clasificación diferenciando las **cales aéreas** de las **hidráulicas**.

Se denominan **cales aéreas** aquellas que están constituidas principalmente por óxido o hidróxido cálcico y que tienen la propiedad de endurecerse mediante el contacto con el dióxido de carbono del aire. Se denominan **cales hidráulicas** aquellas que se obtienen de la calcinación de calizas que contienen sílice y alúmina, las cuales confieren al aglomerante hidráulicidad.

La diferencia entre las primeras y las segundas radica en su contenido en elementos arcillosos, los cuales dan a las cales la capacidad de endurecer en contacto con el agua, es decir hidráulicidad.

Curiosamente, sólo se contempla la proporción de óxido de magnesio en la clasificación de las cales aéreas, las cuales se denominarán cales aéreas cálcicas (CL) o dolomíticas (DL) según el porcentaje que contengan de este componente, tal y como se ha explicado anteriormente.

Las cales cálcicas se comercializan como cales vivas (Q) (CaO) o cales hidratadas en polvo (S), en pasta (S PL) o en suspensión o lechada de cal (S ML).

Por otro lado, diferenciaremos las cales hidráulicas según si éstas deben su hidráulicidad a la composición natural de su materia prima o si se han obtenido mediante la adición de componentes a la cal de forma artificial, discriminando así las cales hidráulicas naturales (NHL) de las cales hidráulicas formuladas (FL) y de las cales hidráulicas (HL).

Encontramos por tanto en el mercado cales denominadas como hidráulicas, que pueden contener materiales como Clinker de cemento que en algunos casos pueden ser perjudiciales para la obra donde se haya prescrito el empleo de la cal.

Por razones evidentes la cal viva no puede suministrarse en pasta, ya que por definición es un producto deshidratado. Asimismo, tampoco podrán suministrarse en pasta las cales dolomíticas semiapagadas, y tampoco las cales hidráulicas, ya que éstas en forma de pasta fraguarían aun habiendo un exceso de agua debido a sus propiedades anteriormente descritas.<sup>73</sup>

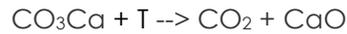
### **Fraguado de las cales**

---

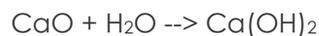
<sup>73</sup> La explicación sobre los tipos de cales ha sido gentileza del personal del Grupo PUMA, que además de colaborar en las explicaciones técnicas ha colaborado en el suministro de materiales para la realización de ensayos.

## Cal aérea

La cal se encuentra en la naturaleza en forma de piedra caliza, que contiene principalmente carbonato cálcico  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Éste, sometido a un aumento de temperatura a unos  $900^\circ\text{C}$  teóricos, se descompone químicamente en óxido de cal, liberando a la atmósfera dióxido de carbono mediante una reacción endotérmica. Esta temperatura de calcinación dependerá también de la presión atmosférica a la que se encuentre la muestra y el contenido de  $\text{CO}_2$  presente en el aire.

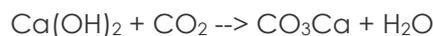


Obtenemos así el óxido de cal, también denominado cal viva. Se trata de un material dispuesto en terrones esponjosos de  $0,5 \text{ kg/dm}^3$  de densidad aparente y unos  $2,3 \text{ kg/dm}^3$  de densidad real. El óxido cálcico debe ser extinguido, apagado o matado, añadiendo agua, obteniéndose así hidróxido cálcico mediante una reacción exotérmica que en contacto con tejidos orgánicos produce cauterizaciones.



Se trata de una reacción exotérmica, donde el compuesto aumenta su temperatura típicamente por encima de los  $100^\circ\text{C}$ , evaporándose así parte del agua añadida. Según la cantidad de agua aportada obtendremos cal aérea en polvo, en pasta o en lechada, que se aplicará mediante diferentes técnicas según el caso.

Una vez colocado el compuesto en obra, éste entra en contacto con el dióxido de carbono del ambiente, recarbonatándose y adquiriendo de nuevo la composición de carbonato cálcico.



Esta última reacción se produce muy lentamente. La velocidad de reacción depende de distintos factores como la humedad ambiente, la red porosa del compuesto, etc. Este proceso puede durar horas, días o incluso años. Además, el fraguado no se produce si el amasado está en contacto con el agua debido a la dificultad de acceso del  $\text{CO}_2$ . El fraguado también produce una disminución de volumen o retracción que debe tenerse en cuenta.

Brizguz y Bru<sup>74</sup> mencionó un tipo de cal que se producía en la región de Metz, que se caracterizaba por tener un tiempo de apagado inferior, endureciendo en tan solo un

---

<sup>74</sup> Brizguz y Bru, Athanasio Genaro. *Escuela de Arquitectura Civil, en que se contienen los ordenes de Arquitectura, la distribución de los planos de templo y casas, y el conocimiento de lo materiales*. Valencia: Oficina de Joseph de Orga, 1738. (Edición fasc. Zaragoza: Colección Arquitecturas de los Precursores, COA de Aragón, 1992)

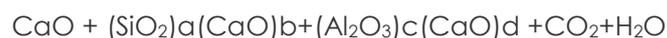
año de tal forma, que solo se podía usar en obra como canto o árido. La forma de apagar esta cal era en fosa, cubierta totalmente de arena, echándole agua con la mano, en varias ocasiones. Esta cal se va deshaciendo poco a poco, sin que salga humo. La calidad del mortero que se obtenía era tan buena que éste se empleaba para hacer las cavas y sótanos de Metz.

A estas reacciones se las llama ciclo químico de la cal aérea por ser un proceso en el cual el material de inicio y el resultado final son químicamente idénticos. Alguna de sus propiedades, en cambio, habrán variado durante este proceso.

### Cal hidráulica

Cuando la piedra caliza inicial contiene impurezas arcillosas en cantidades superiores al 5, 10 o 20% según los autores, las reacciones químicas que se producen varían respecto a las descritas anteriormente.

A una temperatura aproximada de 700°C se descomponen los silicatos que constituyen la arcilla obteniéndose así óxido de sílice (SiO<sub>2</sub>). A una temperatura que oscila entre los 850 y los 900°C se descompone el carbonato cálcico (CO<sub>3</sub>Ca). Aumentando la temperatura de calcinación hasta 1200°C se produciría una reacción entre estos componentes arcillosos y el carbonato cálcico. El proceso térmico deja libres moléculas de óxido de cal mientras que otras reaccionan con los elementos arcillosos, formándose así la denominada cal hidráulica.



Los coeficientes (a, b, c, d) no son constantes, ya que dependen de la proporción de arcillas así como de la composición de éstas en cada caso.

La cal hidráulica tiene la propiedad de fraguar a mayor velocidad que la cal aérea, además de poder hacerlo en contacto con el agua. A esta propiedad se la llama hidraulicidad.

Podemos estudiar las diferencias entre los tiempos de fraguado o de endurecimiento de la cal aérea, de la cal hidráulica y del cemento:

	Inicio Fraguado (horas)	Final Fraguado (horas)
Cal Aérea	24	4320 (6 meses)
Cal Hidráulica	1 a 4	30
Cemento	2	7

Los morteros de cal aérea endurecen más lentamente que los morteros de cal hidráulica, lo que los hace más vulnerables a las inclemencias meteorológicas. Por el contrario los morteros de cal aérea endurecen solo por la acción del aire, de fuera hacia dentro, y por ello tiene gran importancia el espesor en que se aplican.

Los morteros de cal hidráulica ofrecen una solución óptima aportando las propiedades de la cal a un conglomerante cuyos tiempos de fraguado permiten una muy fiable puesta en obra.

### **3.2.1.2. LA ARENA**

Existen diferentes tipos de arenas que pueden ser usadas para la realización de argamasas, las más indicadas son las arenas de río, (cuarzo puro). Su función dentro de las argamasas es disminuir su retracción además de estabilizar su volumen. En el caso de la arena de mina encontramos el inconveniente de que contienen arcilla u otros elementos en exceso, por lo que es necesario su previo lavado. En el caso de la arena de mar, si es limpia, pueden utilizarse siempre y cuando se proceda a su lavado previo con agua dulce.

Por otro lado tenemos las arenas de machaqueo de granitos, basaltos y rocas análogas que son excelentes, si bien será necesario que sean rocas sanas y quedaran excluidas todas aquellas acusen un proceso de descomposición. Si hablamos de las arenas de procedencia caliza nos encontramos con arenas de calidades muy variables y que requieren más cantidad de agua de amasado que las silíceas.

Podemos decir entonces que, pueden emplearse arenas naturales procedentes de ríos, mina y playa, o de machaqueo, o bien mezcladas entre ellas. En estado natural, o después de lavadas y cribadas, pero siempre cumpliendo las siguientes condiciones:

- Forma de los granos. La forma de los granos será redonda o poliédrica, siendo rechazables las arenas cuyos granos tengan predominante forma de laja o acícula.
- Tamaño máximo de los granos. Para la selección de esta arena se pasará por un tamiz de abertura no superior a 1:3 del espesor del tendel, ni a 5 mm.
- Contenido de finos. Realizado el ensayo de la arena por tamizado en levigación, el porcentaje en peso que pase por el tamiz 0,08 UNE 7050 será como máximo el 15% del peso total.
- Granulometría. La línea granulométrica del árido se determinará sobre la muestra

después de sometida al ensayo anterior, e incluyendo el contenido de finos.

- Contenido de materia orgánica. Realizado el ensayo antes descrito en la Norma UNE 7082, el color de la solución ensayada no será más oscuro que el de la disolución tipo.
- Otras impurezas. El contenido total de materias perjudiciales: mica, yeso, feldespatos descompuestos, pirita granulada, etc., no será superior al 2% (NBE FL-90.2004, ya derogada).

### 3.2.1.3. EL AGUA

La calidad del agua de amasado, empleada para la fabricación y posterior curado del mortero tiene apenas excepciones. En el caso de las aguas de alta montaña, debido a su gran pureza les confiere un carácter agresivo. Por tanto en general se pueden utilizar todas las aguas potables, incluso las insalubres, salvo las aguas bombeadas de minas de carbón, siempre y cuando cumplan las siguientes condiciones:

- Acidez determinada según Norma UNE 7234; pH no inferior a 5 ni superior a 8.
- Contenido en sustancias disueltas, según Norma UNE 7130, no superior a 15 g/l.
- Contenido en sulfatos expresados en  $\text{SO}_4^-$ , según Norma UNE 7131, no será superior a 1 g/l.
- Contenido en cloruros expresados en  $\text{Cl}^-$ , según Norma UNE 7178, no será superior a 6 g/l.
- Contenido en aceites y grasas, según la Norma UNE 7235, no superior a 15 g/l.
- Contenido en hidratos de carbono, según la >Norma UNE 7132, no apreciable.

Las funciones del agua de amasado son:

- Participa en las reacciones de hidratación de la cal.
- Confiere al mortero la trabajabilidad necesaria para su puesta en obra.
- La cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo estrictamente necesario, ya que el agua en exceso se evapora y crea una serie de huecos en el mortero. Este hecho disminuye su resistencia mecánica y aumenta la porosidad lo que facilita la entrada de agua por capilaridad. Por el contrario, un déficit de agua de amasado origina unas masas poco trabajables y de difícil colocación en obra. Provocando o facilitando incluso la aparición de grietas y oquedades internas en las masas.

En la siguiente tabla se describen algunas de las limitaciones, riesgos y observaciones que se han de tener en cuenta ante la presencia de determinados compuestos que pueda tener el agua amasado.

Determinación	Limitación impuesta por la instrucción española	Riesgos que se corren si no se cumple la limitación.	Observaciones
pH	MÍNIMO 5	Alteraciones en el fraguado y endurecimiento. Disminución de resistencias y de durabilidad.	Con un cemento aluminoso no deben usarse aguas de pH superior a 8.
Sustancias disueltas totales	MÁXIMO 15 gramos por litro	Aparición de eflorescencias u otro tipo de manchas. Pérdida de resistencias mecánicas. Fenómenos expansivos a largo plazo.	Por sustancias disueltas se entiende el residuo salino seco que se obtiene por evaporación del agua. En zonas sujetas a fluctuaciones de nivel de agua, conviene rebajar el límite a 5 gramos por litro.
Contenido en sulfatos expresados en ión SO <sub>4</sub>	MÁXIMO 1 gramo por litro	Alteraciones en el fraguado y endurecimiento; pérdidas de resistencia.	Atención al contenido en sulfatos del cemento y los áridos, cuando se está cerca del límite se debe ser más estricto con el agua de curado.

### 3.2.1.4. ADITIVOS

Si bien en ninguno de nuestros ensayos se ha utilizado aditivo alguno, a continuación se aporta una breve descripción de los mismos como ampliación al conocimiento que sobre las argamasas se puede aportar en este estudio. No se han utilizado básicamente por dos motivos, uno por el desconocimiento científico que sobre ellos existe, y porque el uso de ellos en las muestras elevaría la casuística a un número de ellas inasumible para este trabajo de investigación. Los aditivos se le añaden a la argamasa durante su fabricación o con posterioridad para mejorar alguna de sus cualidades. Aunque muchos de ellos no tienen excesiva base científica, la experiencia y la tradición en muchas ocasiones eran motivo para hacer uso de ellos. A continuación se muestra un resumen que sobre los aditivos hacen diferentes tratados, sobre todo históricos.

Ha sido sometido a debate el uso histórico de los aditivos orgánicos en la composición de los morteros. A lo largo de la historia estas técnicas no fueron algo estático ya que estuvieron en continua innovación. La investigación actual nos muestra la amplia gama de materiales que han sido utilizados a lo largo de la historia. Así Albert Nenburger nos descubrió como en el pasado se usaron como adhesivos y aglutinantes, la goma arábiga de Tragacanto, colas de animales de Rodas, sangre de hipopótamo, leche de higuera con yema de huevo entre otros muchos.

Se tiene constancia de que los Egipcios usaron comúnmente polímeros orgánicos como la albúmina de huevo, queratinas y caseínas. En época de Vitrubio se emplearon otros productos como la leche de higuera o pasta de centeno, como reguladores del secado, o la sangre y clara de huevo como retardadores del fraguado. En el siglo IX en los morteros de la catedral de Rochester se empleó sangre y en el siglo XVI en la catedral de Rouen se empleó orina, estos "aditivos" tenían propiedades que mejoraban la durabilidad y resistencia de los morteros.

Los primitivos morteros de cal eran poco resistentes, quizá por sus técnicas de elaboración, por lo que en algunos de ellos se podían encontrar aditivos como plantas fibrosas o pelos de animales con el fin de conferir más trabazón y resistencia a las argamasas.

En la actualidad el debate se plantea en cómo sustituir estos viejos morteros con aditivos orgánicos por otros similares pero obtenidos mediante técnicas más avanzadas y usando compuesto sintéticos o mezcla de sintéticos y orgánicos.

Las alternativas que se encuentran para estos materiales orgánicos tienen ventajas e inconvenientes por lo que conseguir sustitutivos de estos materiales requiere de una amplia línea de investigación a fin de conseguir resultados con unas ciertas garantías.

En la investigación del uso de los aditivos orgánicos uno de los principales problemas es la dificultad para conseguir resultados fiables teniendo en cuenta una casuística muy elevada al tener que analizar la eficacia sobre los distintos materiales de soporte además de la reacción que se produce al contacto con agentes externos, climáticos, físico-químicos o biológicos. Así por ejemplo se sabe que ciertos aditivos orgánicos son buenos medios para la proliferación de bacterias. Los líquenes, por ejemplo, al ser organismos con un alto contenido en nitrógeno son atraídos por aditivos de urea, y en este caso se generarían cultivos de bacterias nitrosomas que ocasionarían roturas en el mortero. Un efecto similar ocurriría con la utilización de sangre o con excrementos animales. Sería interesante poder realizar pruebas con argamasas a las que añadir aditivos en las condiciones y proporciones descritas en las recomendaciones antiguas con el fin de comprobar la eficacia de dichos productos.

Los primeros estudios sobre estos aditivos orgánicos no parecen haber dado resultados muy positivos y con los aditivos sintéticos también han surgido algunos inconvenientes, pues en el uso de las resinas sintéticas se han encontrado ventajas pero también inconvenientes por ejemplo en los aspectos estéticos y de durabilidad. En el caso de otro reciente aditivo sintético de los morteros de cal como son los productos hidrofugantes, apuntar el hecho de que se ha comprobado que pueden causar una disminución en el diámetro del poro del revoco dificultando el proceso de fraguado. Es intención del equipo de investigación de esta tesis continuar con una línea de trabajo encaminada a profundizar sobre la influencia y la eficacia de los hidrofugantes.

A continuación se muestra una lista de aditivos documentados en tratados históricos y las propiedades o mejoras que aportan o dicen aportar a los morteros y argamasas.

#### **Aceleración del fraguado y aumento de resistencia**

Corteza de olmo, agua de cebada, zumo de higo, masa de centeno, manteca de cerdo, cuajada, sangre, almidón, calostros, azúcar.

#### **Adhesivos para aumentar la trabazón**

Resinas de pino, gelatina, colas de animales y vegetales, gluten, caseínas y albúmina de sangre.

#### **Aireadores con aumento de durabilidad**

Malta, cerveza, urea, cuernos de animales (queratina)

#### **Emulsionadores o estabilizadores que producen mayor dureza y estabilidad a la mezcla**

Yema de huevo, aceites, grasas, ceras, colas, goma arábica, talco, azúcar, zumo de fruta, gluten.

#### **Resistencia a las heladas**

Cera de abeja.

#### **Agentes antirretracción**

Cera de abeja.

#### **Modificadores de plasticidad para mejorar la trabajabilidad de los morteros y argamasas**

Azúcar, leche, clara de huevo, estírcol, aceite rojo de Turquía, glicerina, glucosa, aceites minerales, resinas, colofonia, higo.

#### **Retardadores**

Azúcar, sangre, clara de huevo, gluten, bórax, queratina para los yesos.

### **Solidificadores, rigidizadores y endurecedores**

Azúcar, colas vegetales, colas animales, melazas, mieles.

### **Consolidantes y aglutinantes**

Queratina, caseína, corteza de olmo, tanino, colas, arroz, paja cortada, masa de cemento, clara y yema de huevo, copos de algodón, yute, sisal, goma arábiga o tragacanto, cola animal de Rodas, jugo de higos o azúcar.

### **Espesadores**

Sangre, leche agria, caseína, queso, gelatina, goma de tragacanto con agua.

### **Impermeabilizadores del agua**

Colas animales, taninos, betunes, ceras de emulsión, emulsión de aceite mineral, cera de abeja.

El elenco de productos y de sus supuestas propiedades es aún más amplio, lo que da idea de la importancia que ha tenido el tema de los aditivos en la construcción ya desde muy antiguo, y concretamente en el campo de los morteros y argamasas. En cuando a su constancia histórica, Sickels<sup>75</sup> cita algunos como:

- Egipcios (150 a. J.C.): Usaron albúmina, colas animales, sangre, huevos, zumo de higo, goma arábiga, queratina.
- Vitruvio (46 a J.C.) cita: sangre cuajada, huevos, higos, manteca de cerdo, leche centeno.
- Plinio (23 a J.C.): Cebada, sangre, corteza de olmo fibras, higo, pelo, leche, azafrán, coles, sebo, tanino.
- Edad Media (1200-1500): Cerveza, cera, sangre, huevos, zumos de fruta, gluten, goma, malta, arroz, sebo, azúcar, urea.

---

<sup>75</sup> L. B. Sickels . "Organics aditives in mostars", E.A.R., vol.8. 1981

### 3.3. PRODUCTOS HIDROFUGANTES

Si nos tuviésemos que ceñir a la definición que de la palabra hidrófugo da el diccionario de la R.A.E. veríamos que es la siguiente: “1. adj. Dicho de una sustancia: Que evita la humedad o las filtraciones. U. t. c. s. m.” Por lo tanto y en base a la definición anterior, un hidrofugante debería repeler el agua y evitar el paso a través de las superficies o materiales tratadas con el producto hidrófugo. Sin embargo es necesario hacer alguna puntualización sobre el tema. En principio no es lo mismo repeler el agua que impermeabilizar.

El producto hidrofugante no crea una “película”, es decir, una barrera física sobre la superficie sobre la que se ha aplicado, sino que las moléculas de los productos utilizados que son de menor tamaño que los poros, repelentes al agua y de baja viscosidad, penetran profundamente en los poros del material base reaccionando químicamente con las paredes internas de los poros, transformando el sustrato en hidrofóbico. Con el tratamiento se impide que el agua atraviese en estos poros, y por lo tanto impidiendo que la superficie en cuestión se moje.

El agua exterior se mantiene a la entrada de los poros, mientras que el vapor de agua generado desde dentro de la estructura puede escapar fácilmente. Por ello, la estructura sigue siendo transpirable.

El “Círculo de Trabajo Científico - Técnico para la Conservación de Monumentos y el Saneamiento de Edificios” (WTA), definió ya en 1983 las exigencias mínimas impuestas a los medios de impregnación para el tratamiento hidrófobo de la piedra natural. Las exigencias más importantes se pueden aplicar también a todos los materiales de construcción de origen mineral y pinturas minerales:

- 1 - Reducción de la absorción de agua por lo menos en un 70 %.
- 2 - Alta capacidad de penetración.
- 3 - Suficiente estabilidad alcalina.
- 4 - Alta estabilidad ante los agentes atmosféricos.
- 5 - Reducción de la difusión del vapor de agua en no más de un 10 %.
- 6 - La protección no debe alterar el aspecto óptico de la fachada, más allá de un límite tolerable.
- 7 - La impregnación no debe dejar capas, ni superficies brillantes ni pegajosas.

Además de estas especificaciones, en la actualidad a los productos hidrofugantes se les exigen los siguientes requisitos:

- Reducción de la absorción agua sobre la base mineral tratada en más del 95%.
- Alta capacidad de penetración.
- Resistencia a la alcalinidad de las bases.
- Reducción media de la difusión del vapor en tan sólo <0.05 %.
- Ausencia de amarilleo tras envejecimiento acelerado por acción de los rayos ultravioleta.
- Deben contribuir a recuperar y/o mantener los colores naturales de la base tratada.
- Aumento de la adherencia y compatibilidad con pinturas transpirables.
- Larga durabilidad, entre 5 y 10 años.
- Fácilmente renovable.
- Aplicable sobre bases húmedas.
- Gran poder desecante por transpiración.
- Oleo repelencia y rechazo a la suciedad.

Por su parte Fort<sup>76</sup> y Wacker<sup>77</sup>, señalan que los productos hidrofugantes órgano-silícicos son una impregnación transparente y por lo tanto son elementos que penetran a través de la porosidad del material sobre el que se aplica. Son tratamientos que forman una película continua que recubre la superficie de los poros y que reducen drásticamente la succión de agua, sin taponar los poros, y por lo tanto, sin alterar significativamente la permeabilidad del soporte a los gases y al vapor de agua.

Las aplicaciones tradicionales en edificación para las que se han utilizado, y se utilizan, productos hidrofugantes son principalmente protección de fachadas ejecutadas con materiales porosos (fachadas de fábrica ejecutadas con piezas cerámicas, fábricas de tierra, etc.) y de elementos constructivos porosos como albardillas, vierteaguas, balaustradas, etc. La forma de aplicación es habitualmente por pulverización y su periodo de eficacia es limitado (entre uno y diez años), por lo que se hace necesario repetir el tratamiento periódicamente.

El producto elegido para llevar a cabo los ensayos destinados a comprobar la eficacia de la barrera química de corte hídrico ha sido el producto denominado RAJASIL BLF, de la casa

---

<sup>76</sup> FORT, R.: "Polímeros sintéticos para la conservación de materiales pétreos". Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo. Pérez-Monserrat, E.M., Gómez-Heras, M. Álvarez de Buergo, M., Fort, R. (eds). Dpto. Publicaciones Universidad Popular José Hierro, San Sebastián de los Reyes. (2007) págs. 71-82.

<sup>77</sup> WACKER-CHEMIE, GMBH. "Procedimiento para hidrofugar superficies de materiales de construcción". Patente de invención. 1973.

BASF, un hidrofugante tipo bicomponente, compuesto por silicato potásico y siliconato metálico de potasio.

### **Tipos de productos y características**

Existen varias clases de productos químicos con características hidrofugantes. Coronado<sup>78</sup> propone una clasificación de estos productos, que completamos con la clasificación propuesta por Peixoto<sup>79</sup>, siendo ambas bastante coincidentes.

**A) Productos monocomponentes:** Son aquellos que se obtienen a partir de un alquil-triclorosilano, y son los siguientes:

#### **Acrilamidas**

Son el resultado de la mezcla de dos compuestos orgánicos. Da lugar a un material con viscosidad similar a la del agua y que se mantiene hasta el momento en que se produce la solidificación deseada para el sellado de los poros. Es considerado de los más eficaces.

#### **Organo-metálico**

Se trata de un producto más reciente, constituido por compuestos orgánicos de titanio y aluminio que se polimerizan con la presencia de agua después de la evaporación de los disolventes.

#### **Resinas epoxídicas**

En este caso se trata de un producto con una cierta dificultad de penetración en el caso de que la pared esté constituida por materiales con una estructura de poros de pequeñas dimensiones. El endurecimiento es muy rápido y comienza justo después del inicio del proceso de introducir el producto en los orificios preparados a tal fin, lo que puede llegar a dar lugar a un bloqueo de los poros antes de terminar dicha operación.

#### **Resinas fluoradas**

Estas sustancias alteran la superficie del soporte creando una película continua sin poros que elimina la mayor parte de las irregularidades del soporte base. Este tipo de

---

<sup>78</sup> CORONADO, J.A, GARCÍA, A. PADIAL, J.F.: "Análisis mediante microscopio electrónico de barrido de la succión del ladrillo visto de fabricación industrial extrusionada hidrofugado". AXIOMA. Volumen 2, N° 11, pp: 23-27. 2013

<sup>79</sup> PEIXOTO, V.; TORRES M.I.; GUIMARÃES, A.S.: "Humidade Ascensional". Coleção Documentos Técnicos. Porto, 2008. pág. 60

hidrofugante altera significativamente la superficie tratada, reduciendo el número y el tamaño de los poros. El grado de alteración que genera es elevado.

### **Silicatos**

Familia de productos que tienen en común la formación de un gel de sílice que tiene como efecto el taponado de los poros y capilares. Estos productos tienen una baja capacidad de penetración en las paredes. Su introducción puede originar eflorescencias y conducir a una fragmentación de las zonas más superficiales del material.

### **Siliconatos**

La aplicación de hidrofugantes a base de siliconatos confiere propiedades hidrofugantes a los materiales. Son compuestos solubles en agua que, debido a la reacción del CO<sub>2</sub> de la atmosfera con la materia prima se convierten en materiales hidrófugos. En el caso específico de paredes gruesas puede haber cierta dificultad para asegurar su eficacia. Este hidrofugante se adapta a la superficie de los soportes dejando la misma suavizada, con menores irregularidades pero algo más angulosas. Se reduce, por tanto, el tamaño de los poros y se produce una mínima alteración respecto a la base sin hidrofugar. El siliconato metílico de potasio, es el más común de los hidrofugantes siliconatos, como gran ventaja se destaca que no forma una capa superficial, ni altera la permeabilidad al vapor de agua de la base.

Su principal aplicación es su uso en materiales de construcción, como ladrillos, tejas, baldosas, etc. Su forma de empleo más común es mediante solución acuosa entre el 3 y el 5% de materia activa en el tratamiento hidrófugo. También se utiliza, en la misma dosis, en el fraguado de yesos y hormigones, consiguiéndose superficies con repelencia al agua, y en dosis menores, entre el 0,1 y 1%, se adiciona a pinturas en medio acuoso.

Las principales características de los hidrofugantes a partir de siliconatos son las siguientes:

- Penetración baja: debido a la polaridad
- Producto polar
- Moléculas pequeñas
- Pérdida de efectividad con el paso del tiempo, esta duración se ve afectada en caso de condiciones climáticas extremas.

### **Siliconas**

Compuestos macromoleculares disueltos en disolventes hidrófugos, lo que dificulta la impregnación, por lo que su aplicación implica la posible aparición de un mayor número de agujeros o poros.

### **Siloxanos**

Requieren menor contenido en sustancias activas debido a su baja volatilidad y el producto permanece en la superficie.

Las principales características de los hidrofugantes a partir de siloxanos son las siguientes:

- Penetración media: debido al tamaño medio y la no polaridad
- No polar
- Moléculas tamaño medio-grande
- Requieren menor contenido en sustancias activas debido a su baja volatilidad, el producto permanece en la superficie.

Sus ventajas frente al resto de hidrofugantes son las siguientes:

- Buen efecto perla
- Estabilidad alcalina

Sus desventajas son las siguientes:

- Baja penetración debido a las cadenas moleculares
- Riesgo de oscurecimiento del soporte sobre todo en altas concentraciones de siloxanos

### **Silanos**

El silano o hidruro de silicio (IV), es un compuesto químico cuya fórmula es  $\text{SiH}_4$ . Es el análogo del metano, pero derivado del silicio. Las principales características de los hidrofugantes a partir de silanos son las siguientes:

- Alta penetración: debido al tamaño pequeño de las moléculas y la no polaridad
- No polar
- Moléculas pequeñas

El hidrofugante se adapta a la superficie de la cerámica base, presentado un

aspecto más geométrico. El número de poros en este caso se mantiene, reduciendo su tamaño. Produce una baja alteración.

**B) Productos bi-componentes:** Son aquellos que se obtienen a partir de la mezcla de dos productos monocomponentes y son los siguientes:

### **Silanos/siloxanos**

Los polisiloxanos es una mezcla de los dos anteriores, de silanos y de siloxanos, los cuales se ha demostrado tienen un buen comportamiento actuando de forma conjunta.

Los silanos disponen de mayor capacidad de penetración que los polisiloxanos, pero de menor resistencia ante los efectos de los rayos U.V., aunque con una elevada inercia química tanto a ácidos como a álcalis, de ahí que la unión de silanos y siloxanos reúnen todas las características y propiedades necesarias para generar sinergias de mayor resistencia y durabilidad para las bases tratadas.

En este tipo de hidrofugantes el producto forma una película continua, con un acabado en el que aparecen multitud de "cráteres" de diversos tamaños (entre 0,5 y 3,5  $\mu\text{m}$  aproximadamente), que no se adaptan a la superficie de la base por lo que se aumenta el número de poros superficiales. Este hidrofugante produce un grado de alteración alto.

### **Productos hidrofugantes en base a nanocomponentes**

Por último, y fuera de estas clasificaciones, están los denominados **nanocomponentes**, que son productos con capacidad hidrofugante y que están basados en el uso de materiales a base de compuestos cuyas partículas tienen dimensiones de nanómetros.<sup>80</sup> El término nanotecnología se deriva de las dimensiones geométricas típicas de un componente electrónico (de la misma forma que el de la micro-tecnología). Su unidad de medida es el nanómetro, se indica en nm, y se define como la mil millonésima parte de un metro ( $10^9$ ), su equivalencia en centímetros es 0,0000001cm. La descripción para las micro-tecnologías es el  $\mu\text{m}$  – el micrómetro, 1 $\mu\text{m}$  corresponde a 1.000nm. Para hacerse una idea de la magnitud, el grosor medio de un cabello humano, expresado en nanómetros, correspondería a 30.000nm.

Un hidrofugante a base de nanocomponentes es el **silicio nano cristalino** (n-Si). Bajo este término se entiende el silicio compuesto de granos hasta un tamaño máximo de 1000 nm. El

---

<sup>80</sup> [http://www.fakolith.es/upload/La\\_hidrofugacion\\_Fakolith\\_-\\_Hidrofugantes\\_micro\\_y\\_nano.pdf](http://www.fakolith.es/upload/La_hidrofugacion_Fakolith_-_Hidrofugantes_micro_y_nano.pdf)

material de partida para la fabricación de las capas de silicio por regla general es el silano ( $\text{SiH}_4$ ) (el cual se ha expuesto en un punto anterior) que se lleva a reaccionar químicamente, por ejemplo con fosfina ( $\text{PH}_3$ ).

A modo de ejemplo, un proceso típico para la fabricación de partículas de silicio es la evaporación térmica. En la condensación de gas, las moléculas evaporadas habitualmente forman partículas de un diámetro de 5 a 15 nm y se utilizan en revestimientos con nano partículas de silicio para superficies repelentes a la suciedad e hidrófobas, entre otras.

Las ventajas que presentan estos nuevos materiales frente al resto de hidrofugantes son las siguientes:

- Resistencia a la luz.
- Elevada calidad de la superficie límite.
- Resistencia contra los efectos del medio ambiente, ácidos y bases.
- Alta penetrabilidad.
- Inalterabilidad total del soporte.
- Larga duración.

Todo parece apuntar que son los productos con mayor proyección de futuro. Sobre ellos ya tenemos en el equipo de investigación abiertas líneas de investigación.

## 3.4. FÁBRICAS

### Breves antecedentes

Si hablamos de fábricas en la construcción arquitectónica nos tenemos que remontar a los inicios de la arquitectura, y no será hasta el siglo XIX cuando podemos decir que comienza a apreciarse su declive con el desarrollo de nuevas técnicas constructivas y estructurales y con la aparición de nuevos materiales como el hormigón, el acero y el hierro fundido, materiales que iban a permitir crear construcciones continuas.

En construcciones clásicas como las pirámides de Egipto y los zigurats, así como en los templos europeos como las catedrales, ya se empleaban estructuras fabriles. Nos encontramos con la piedra, el ladrillo y el adobe como materiales comunes desde inicios de la construcción, siendo la piedra considerada el más noble dentro de las fábricas.

Los egipcios, para aplicaciones completamente excepcionales, sometieron a cocción la tierra, ya que comúnmente los ladrillos se secaban al sol, esto condicionado por el hecho de que no se encontraban con el problema de las heladas y las lluvias, más común en Europa, donde la erosión degrada rápidamente los bloques de tierra. Es por esto que todas las casas antiguas tienen paredes de arcilla seca, e incluso las construcciones amuralladas eran de fábrica.

Para la ejecución de fábricas, a la hora de preparar el asiento de los ladrillos se empleaba un mortero fabricado con el mismo material, es decir, tierra en ocasiones mezclada con paja. En estos casos hablamos de un espesor de 10 mm y en la mayoría de las ocasiones la junta vertical se quedaba vacía.

En otros ejemplos encontramos que, antes de extender el mortero, se esparcía paja de esparto sobre el lecho recién terminado, e incluso se llegan a entreteter los tallos. La fragilidad del ladrillo en caso de asiento, quedaba protegida, ya que era el lecho vegetal el que cedía, absorbiendo los esfuerzos de tracción, evitando así que se fracturara.

Por último, en otras fábricas se disponía arena entre los lechos, ésta se encarga de drenar la fábrica y además repartía a la perfección las cargas sobre un terreno húmedo y sujeto a asentamientos, otorgándole así una flexibilidad que le permite deformarse sin romperse.

Si hablamos de la arquitectura romana, en la fabricación de sus muros podemos encontrar diferentes técnicas mediante la combinación de distintos materiales (madera, piedra, metal y ladrillo). Aunque en un principio las técnicas constructivas utilizadas por los romanos fueron heredadas de los griegos, cuando Roma comenzó su expansión hacia la Magna Grecia, se tomaron elementos nuevos como el uso del ladrillo.

En la arquitectura romana el muro se entendía como el elemento sustentante continuo de un edificio. A la forma de construirlo se le conocía con el nombre latino de *opus* (obra o trabajo); también se utilizaba ese término para expresar el tamaño y forma de los materiales. Estos podían ser utilizados labrados y sin labrar. Si estaban labrados parcialmente los denominamos sillarejos, y si lo que nos encontramos es con prismas de forma totalmente cuadrangular o en forma de paralelepípedo, estamos hablando de sillares.

En los muros de mampostería mixta se disponían equidistantemente unos niveles de ladrillo que estabilizaban los paramentos de piedra al núcleo interior de los muros. En estos casos el ladrillo atravesaba el espesor del muro por completo con el fin de ofrecer un lecho horizontal cada cierta altura que garantizase la correcta nivelación, además, suponían superficies de apoyo para los aparejos y medios auxiliares. Los ingenieros militares emplearon este *opus mixtum* en las murallas de las fortificaciones romanas en las de las ciudades del Imperio.

Encontramos también este tipo de aparejo en las fortificaciones bizantinas. La más destacada en la que se empleó el *opus mixtum* fue la construcción de las murallas de la propia Constantinopla. Las fortificaciones bizantinas continuaron utilizando la fábrica mixta de piedra y ladrillo hasta el siglo XIV.

Si pasamos a hablar de la cerámica constructiva en época alto medieval nos encontramos con que existe en general un gran desconocimiento. Hay una baja producción de ladrillo y teja en todo el arco mediterráneo, lo que parece un hecho constatado en la época bajo imperial y alto medieval, y habría que esperar hasta el pleno periodo medieval para la recuperación de la producción de cerámica constructiva.

Este hecho se justifica por la amplia reutilización del ladrillo en la Península Ibérica. Este fenómeno caracterizador de la reutilización ha llevado a dar por sentado muchos datos que ahora se intentan revisar con la aplicación de análisis de datación (termoluminiscencia y cronotipología). Este análisis por termoluminiscencia de los ladrillos en muchas de las obras existentes actualmente lleva a rechazar su origen romano y ofrece unas fechas de mediados del siglo VII.

Encontraremos en esta época su uso predominante en arcos y estructuras abovedadas. El elenco en muros se reduce considerablemente respecto a otras épocas. En la época tardo romana, el empleo del ladrillo es similar.

En la Alta Edad Media, dejando de lado el problema de su cronología de arranque, se distinguirían dos principales grupos de aparejo, el de mampostería con sillería encadenada en esquinas y el de sillería.

Si analizamos castillos y murallas nos encontramos de nuevo con la fábrica mixta de

mampostería de piedra con verdugadas de ladrillo. La historia de la construcción de esta técnica de origen romano y difusión bizantina continúa con ejemplos tempranos hispanomusulmanes y, principalmente, la fortificación bajomedieval señorial.

En este caso la decisión constructiva del muro mixto expresa el carácter principalmente funcional de la arquitectura militar, aunque también hay referencias estéticas.

El aparejo romano mixto es, con el que posteriormente se ha encontrado en ejemplos de murallas en la península, el intercalado de verdugadas de ladrillo entre hiladas de mampostería o de tapia de tierra continuo en algunas fábricas hispanomusulmanas y derivó, mantenido su uso por la arquitectura tradicional, en el aparejo conocido como toledano. Marçais señala que el ladrillo acompaña a la piedra en la construcción hispanomusulmana para garantizar la rectitud de las líneas de aristas, jambas, arcos y cúpulas. También según este autor, en los muros se combina el ladrillo dispuesto en cadenas que regularizan y nivelan los niveles constructivos y en pilas o machones, técnica de origen romano, entre los que se disponen cajones de tapia de tierra o de mampostería.

Será la arquitectura cristiana bajomedieval la que emplea la fábrica mixta de mampostería y ladrillo hasta el punto de que forma parte de su razón constructiva y estética. El foco toledano será el principal en el llamado arte mudéjar, como han advertido diversos historiadores como Pérez Higuera, Ladero Quesada o Torres Balbás, entre otros.

Este aparejo da nombre a un gran número de tipos constructivos de muros y es característico de la arquitectura mudéjar castellana. Su éxito radica en su versatilidad y bajo coste en comparación con la obra de fábrica de sillería de piedra. El aparejo toledano comprende los muros contruidos con dos materiales, ladrillo y mampostería de piedra, aunque también puede sustituirse la piedra por la tapia o la falsa tapia de tierra, que se alternan en niveles sucesivos o en el cual el ladrillo forma cajones entre esquinas y machones o rafas que se rellenan con el otro material.

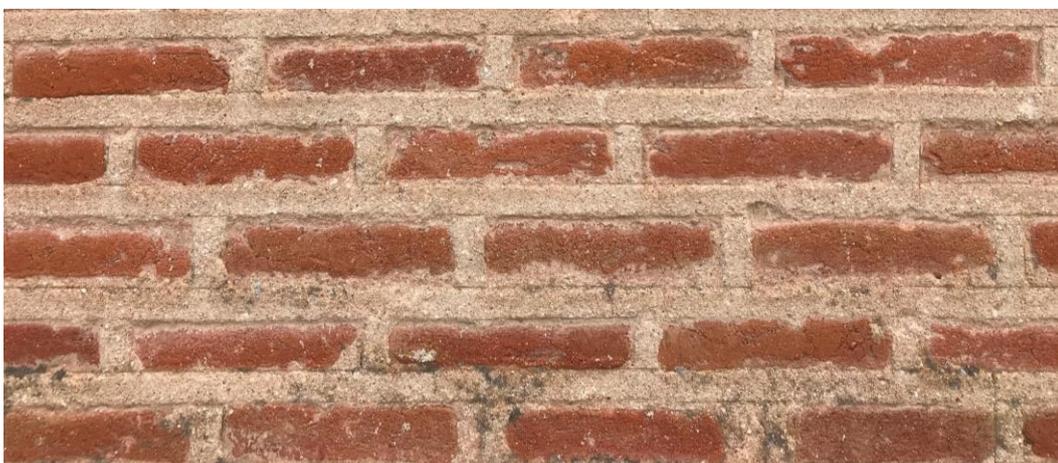
### **3.4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS FÁBRICAS EJECUTADAS PARA LOS ENSAYOS**

Para estudiar la influencia que tienen las juntas de argamasa en el fenómeno de la ascensión de la humedad por capilaridad ha sido imprescindible estudiar su comportamiento sobre fábricas ejecutadas para tal fin. Intentando reproducir, en la medida de lo posible, los materiales, las proporciones y las disposiciones constructivas existentes en la realidad de las fábricas que conforman los edificios.

Concretamente, el estudio se ha centrado mayoritariamente sobre fábricas cuyos paramentos están formados por una única hoja compuesta exclusivamente de ladrillos,

dispuestos en espesores de dimensión variable, recibidos con argamasas de cal. Es cierto que hay fábricas que aun estando conformadas por una única hoja en su composición formal realmente están ejecutadas por dos hojas exteriores de ladrillo rellenas en su interior de otro material de diversas características como, ripios, cascotes, piedras, áridos, etc., normalmente envueltos con argamasas de cal, incluso con tierra.

En nuestro caso las investigaciones se han centrado exclusivamente en las fábricas compuestas sólo por ladrillos de tejar, de modo que todo el conjunto está constituido únicamente por ladrillos macizos y argamasas de cal. Los ladrillos, no están colocados en ningún caso a hueso, de modo que entre todos y cada uno de ellos siempre va a existir una capa de argamasa de cal, bien sea en forma de llagas o de tendeles continuos, con unos espesores medios que suelen estar entre los 30 y los 40 mm y que tienden en general a ser de un espesor similar al grueso o canto de los propios ladrillos.





**Imagen 42. Imágenes de fábricas similares a las estudiadas. Ejecutadas con ladrillo antiguo de tejar macizo y con juntas gruesas de argamasa de cal. Se aprecia el deterioro producido por la ascensión de agua por capilaridad, y por las incorrectas soluciones ejecutadas para su reparación.**

No se va a desarrollar una explicación detallada de los diferentes aparejos porque a priori se entiende que esto no va a afectar sustancialmente al fenómeno que se está estudiando. Al fin y al cabo toda la casuística posible que ladrillos y argamasas presentan en los diferentes tipos de aparejos, conforma en todos los casos una retícula continua de argamasa formada por la unión de llagas y tendeles en continuidad. Son varios los ensayos en los que se puede comprobar como la ascensión de la humedad por capilaridad recorre esta retícula continua de argamasa con gran facilidad, y más en concreto esto se aprecia con absoluta nitidez en el ensayo 12.1. Además de la ascensión que se realiza por la retícula continua que conforma la argamasa existe otra ascensión capilar que va atravesando el "bizcocho" que forman las capas alternas de ladrillos y argamasas en su disposición de tendeles. La suma de ambas ascensiones capilares, la que se produce por la retícula y la que atraviesa las capas alternas, se entiende que es similar para las fábricas ejecutadas con ladrillos de tejar y argamasas de cal, independientemente de la disposición de los ladrillos, para la tipología constructiva aquí estudiada.

Por otra parte, ya existen estudios muy completos y exhaustivos sobre la composición y la ejecución de las fábricas de ladrillo, como el realizado por María Soledad Camino Olea, Profesora Titular de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Valladolid<sup>81</sup>.

Los espesores de este tipo de fábricas solían ser por lo tanto múltiplos de un tizón o de media sogá del ladrillo empleado. Con el fin de evitar la entrada de agua proveniente del terreno

---

<sup>81</sup> CAMINO OLEA, M.S.: "Construcción y ornamentación de las fachadas de ladrillo prensado, al descubierto, en la ciudad de Valladolid. Tesis doctoral. Biblioteca virtual Miguel de Cervantes. 2001

por capilaridad, los arranques y zócalos de las fábricas normalmente estaban ejecutados sobre algún tipo de cimiento o basamento de piedra, bien de sillería, poco frecuente, o al menos de mampostería. El problema en algunos casos era que tal arranque no llegaba a realizarse. Y en otros muchos casos el problema ha sido la modificación original de la cota de la calle o del pavimento circundante que se ha elevado de tal manera que en la actualidad dicha cota ha superado el nivel del zócalo favoreciendo que el agua de lluvia que incide sobre el entorno de la base de los muros entre en contacto con las hiladas inferiores de las fábricas facilitando el acceso capilar del agua por los arranques de las fábricas.

A estos factores se unen otros errores constructivos que han agravado el problema, como el hecho de pavimentar las calles con soluciones poco transpirables, o la tan común y nefasta práctica de revestir los zócalos y arranques de los muros con morteros de cemento lo que eleva el nivel del frente húmedo y dificulta la evaporación del agua reteniéndola en el interior de las fábricas, lo que en conjunción con los fenómenos climáticos deviene en la degradación de las mismas.



**Imagen 43. Imágenes de fábricas de ladrillo de tejar macizo, del tipo de las estudiadas en esta tesis. Se puede apreciar claramente en todas ellas la cota alcanzada por el frente húmedo y las lesiones derivadas de la presencia de la humedad, agravadas por soluciones constructivas incorrectas.**

## 4. ENSAYOS DE LABORATORIO

## 4.1. PREAMBULO Y JUSTIFICACIÓN

Si bien hay una amplia documentación y numerosos estudios sobre el fenómeno físico de la ascensión por capilaridad de los líquidos, llevados a cabo por expertos en la materia (Hall C, Hoff WD, Peixoto V, Guimarães A, Torres MI, Fassina V, de Freitas VP, Massari G, Massari I, Rirsch E, Franzoni F, y otros) con investigaciones tanto empíricas como experimentales, lo específico de este fenómeno en las fábricas de ladrillo de tejar antiguas ejecutadas con argamasas de cal, y debido a la gran heterogeneidad del conjunto, hace imprescindible su ensayo en muestras o probetas que sirvan para contrastar la observación y la toma de datos reales con los obtenidos de las fórmulas empíricas. La propia experiencia tras la elaboración de probetas, la realización de los ensayos y el posterior análisis de los resultados, ha permitido comprobar el alto grado de heterogeneidad que presenta dicho fenómeno. Este grado de disparidad comienza ya en el origen de las materias primas y continúa hasta el mismo proceso de puesta en obra.

Respecto de las materias primas, y como queda expuesto en los apartados relativos a las probetas y materiales, son muchas las causas que influyen en esta heterogeneidad.

Respecto de la argamasa de cal son varios los factores que pueden generar distorsiones en su comportamiento final frente a la humedad capilar. En primer lugar, la procedencia y la composición de las materias primas (cal y arena principalmente), por otra parte, todo lo relacionado con las proporciones de las mezclas y su proceso de amasado, y por último, el proceso de puesta en obra, donde la pericia del operario va a influir en aspectos como la compactación de la argamasa y la presencia o no de fisuras y oquedades, entre otros.

En la fase de elaboración de los ladrillos de tejar antiguos son muchos los aspectos que van a provocar variaciones sustanciales de comportamiento: la selección de las materias primas y el proceso de molturación de las mismas, su amasado y compactación, el proceso de secado y, sobre todo, su posición en el horno, por la temperatura a la que van a ser sometidos y el tiempo dedicado a su cocción.

La visita a la Cerámica Nietos de Eulogio Bernardos Artesanos en Arévalo (Ávila) que se hizo en mayo de 2014 fue muy clarificadora en este sentido. Observar "in situ" la ejecución de los ladrillos de tejar, con un procedimiento manual en casi todo el proceso y con una técnica prácticamente similar a la utilizada para la elaboración de los ladrillos objeto de este estudio, nos permitió comprobar que son muchos los factores que hacen de este tipo de ladrillos un producto sujeto a muchas variables

Se ha podido comprobar, tanto por la observación in situ de las propias fábricas de ladrillo

como por la observación de los ensayos, que es precisamente el proceso de puesta en obra uno de los factores que más heterogeneidades de comportamiento genera. Son muchas las causas que hacen que, incluso utilizando las mismas materias primas, la ejecución de las fábricas presente diferencias de unas a otras o de unas zonas con respecto de otras dentro de la misma fábrica, con comportamientos que distorsionan sustancialmente cualquier aproximación teórica al fenómeno. En imágenes como la que se muestra a continuación se puede apreciar con claridad la marca del frente húmedo con cotas de altura variables, debido seguramente a estas discontinuidades en la composición de la fábrica.



**Imagen 44. Imagen de fábrica de ladrillo de tejar macizo colocado a tizón con presencia de humedad capilar. Se aprecia claramente la marca del frente húmedo**

A continuación se exponen algunos de los factores que influyen en el diferente comportamiento de las fábricas en el proceso de la ascensión capilar de la humedad en las fábricas.

#### MATERIALES

- La proporción de las mezclas de las argamasas (cal/arena/agua).
- El grado de humedad que presentan los ladrillos en el momento de ser colocados en obra, dependiendo de si están muy secos o con diferentes grados de humedad. Ladrillos muy secos influyen en el proceso de fraguado de la argamasa, ya que las cantidades de agua que los ladrillos de tejar pueden llegar a absorber de la masa y la velocidad a la que lo hacen (tasa inicial) son determinantes, influyendo sobre el proceso de fraguado.
- La colocación de ladrillos fisurados o rotos.

#### PUESTA EN OBRA

- Los procesos de mezclado, amasado y compactación de las masas.
- La colocación de la argamasa y de los ladrillos en la ejecución de las fábricas.
- El oficio y saber hacer de aprendices, peones y oficiales en la ejecución.

## LAS JUNTAS

- La continuidad de la capa de argamasa. Tiene mucha influencia la presencia de fisuras, grietas y oquedades en las llagas y en los tendeles ya que genera vías de acceso de la humedad importantes y distintas de las propias de la fábrica y sus materiales.
- La junta o discontinuidad que se genera entre la argamasa y el ladrillo. La interfase entre los dos materiales es fundamental en el fenómeno de la capilaridad ya que distorsiona la estructura de los poros al modificar tanto su continuidad como su forma, diámetro y disposición.
- La propia interfase ladrillo-argamasa, con la correspondiente discontinuidad que provoca en la estructura capilar.

Bien es cierto que hay otros muchos factores que influyen en la altura del frente húmedo y en la cantidad de agua que puede tener almacenada un muro, los cuales dependen de las condiciones del entorno y de la configuración del muro, como son:

## CONDICIONES DEL ENTORNO

- Cantidad de agua en la base del muro y presión hidrostática
- Temperatura y humedad ambiente tanto del exterior como del interior
- Ventilación del recinto interior
- Presión atmosférica
- Orientación
- Viento

## CONFIGURACIÓN DEL MURO

- Espesor, altura y longitud del muro
- Ejecución constructiva del arranque o zócalo
- Composición interna del muro
- Presencia de huecos en el muro (ventanas, corredores, puertas...)

De tal manera que un muro que cumpla unos determinados condicionantes ambientales y formales de los enumerados puede tener diferentes comportamientos ante la capilaridad dependiendo de cómo se hayan llevado a cabo los procesos expuestos en el primer grupo.

Conocer específicamente la influencia que tienen las juntas de argamasa en el fenómeno de la capilaridad ha supuesto el estudio pormenorizado de lo que ocurre con la propia argamasa, pero ha sido necesario conocer el comportamiento del ladrillo para poder comparar ambos. Ha sido necesario ensayar las fábricas, ya que el comportamiento del conjunto distorsiona el comportamiento de los materiales por separado.

Por lo tanto, y tras lo expuesto, se puede afirmar que la realización de **ensayos**, para analizar los aspectos mencionados, ha sido fundamental e imprescindible en el desarrollo de esta tesis para poder llegar a conclusiones fiables. Ensayos que en algunos casos han tenido una duración cercana a los tres años, y que han sido realizados, tanto a los elementos que componen las fábricas por separado, es decir a la argamasa y el ladrillo, como al conjunto, utilizando para ello probetas de dichos materiales y construyendo muros de fábrica.

Los ensayos se han realizado en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid, con la inestimable ayuda del Técnico encargado de su funcionamiento. También hemos contado con la colaboración de las empresas PUMA, SIKA y BASF, que nos han suministrado productos hidrofugantes.

El planteamiento de los ensayos ha intentado en todo momento seguir al menos las siguientes pautas:

- Estudiar cada una de las partes por separado y el todo. Por este motivo los ensayos se han realizado no sólo sobre la argamasa de cal, sino también sobre el ladrillo, y sobre probetas de fábrica.
- Intentar en la medida de lo posible reproducir modelos y situaciones lo más próximas a la realidad. Trabajando con mezclas de argamasas similares a las usadas; utilizando ladrillos de recuperación recogidos de derribos de edificios existentes; e intentando reproducir en la duración de los ensayos los tiempos necesarios que permitan deducir conclusiones en un fenómeno en el cual estos periodos temporales suelen ser extensos.

A modo de resumen se puede concluir que el hecho de estudiar un comportamiento físico, el de la capilaridad y la influencia que en ella tienen las juntas de argamasa de las fábricas, sobre unos materiales tan heterogéneos y tan expuestos a un número de indeterminaciones y variables tan elevado, valida el hecho de sustentar la mayor parte de este trabajo de investigación sobre ensayos realizados a probetas de materiales reales. Ensayando, observando y analizando los distintos comportamientos que se producen en los dos materiales, la argamasa de cal y el ladrillo, y en el sistema constructivo que se ejecuta con los dos materiales antes citados, la fábrica, podremos deducir cuál es la influencia de las juntas de argamasa en relación al ladrillo y al conjunto formado por ambos.

## 4.2. SOBRE LAS PROBETAS

### 4.2.1. PREÁMBULO Y JUSTIFICACIÓN

El hecho de fundamentar la tesis en el desarrollo de ensayos y de la obtención de los correspondientes datos implica que la elección, preparación y ejecución correcta de las muestras o probetas sobre las que llevar a cabo dichos ensayos iba a ser un factor fundamental ya que el acierto o no en dicha elección iba a condicionar la obtención de datos que podían no ser fiables. En el apartado de metodología ya se han expuesto algunos de los argumentos y de los procedimientos que llevaron a la selección de las probetas a ensayar.

Es por esto por lo que se desarrolla este apartado con el fin de describir con detalle todas las probetas que han sido objeto de los diferentes ensayos.

Como era lógico y previsible las probetas con las que se han desarrollado los ensayos, sobre todo las de ladrillo y las de fábrica, muestran variaciones unas respecto de otras en cuanto a sus características físicas y dimensionales, y presentan, en general, una cierta heterogeneidad en lo que a su configuración interna se refiere. Es interesante hacer constar que a pesar de las variaciones que presentan los valores obtenidos de todas las muestras ensayadas, los resultados se mueven en general en rangos bastante similares dentro de un mismo grupo. Así por ejemplo, las tasas de absorción de un grupo de ladrillos de tejar de elaboración manual procedentes de la misma tejería son distintas entre sí, pero se mantienen en un rango de valores que, a su vez, distan significativamente de los valores de un grupo de ladrillos de ejecución moderna, o de otros procedentes de una tejería distinta, o de los valores de un grupo de probetas de argamasa.

Se han ensayado tres tipos de probetas, las de ladrillo, las de argamasa de cal y las de fábrica. Algunas probetas han sido elegidas, elaboradas y ensayadas según dimensiones y procedimientos descritos en las normas UNE, y otras se han elaborado en función de los resultados que se querían conseguir y que intentan reproducir situaciones que se aproximen lo máximo posible a las condiciones reales que se quieren analizar.

#### **Probetas de ladrillo**

Son probetas que se han ensayado tomando ladrillos a los que no se les ha hecho manipulación alguna salvo la de cortarlos en porciones de dimensiones determinadas o a los que se les ha tratado la base con el fin de regularizar su zona de apoyo. Se han elegido mayoritariamente ladrillos de tejar antiguos, y algunos de

ejecución moderna que intentan imitar a los antiguos, con el fin de poder comparar resultados entre ambos tipo de piezas.

### **Probetas de argamasa**

Estas probetas son, o bien porciones de argamasa tomadas del desmontaje de ensayos o de recuperación del derribo de edificios antiguos, o bien prismas o cubos que se han ejecutado con moldes según dimensiones normalizadas descritas en las normas UNE.

### **Probetas de fábrica**

Son probetas que se han construido “ex profeso” para cada ensayo intentando reproducir porciones de fábrica que permitiesen analizar de la mejor manera posible el comportamiento de la capilaridad en ellas. No responden a ningún formato o dimensiones determinadas ya que no hay normativa alguna que las regule.

La descripción del instrumental que se ha necesitado tanto para la ejecución de las probetas como para la toma de datos de humedad y temperatura, y la obtención de pesos e imágenes termográficas de las mismas, se describe con detalle en el Anexo I. Instrumental, del tomo 2 de esta tesis.

## **4.2.2. CLASIFICACIÓN**

Clasificamos las probetas en dos grandes grupos:

- **PROBETAS NORMALIZADAS. Según normas UNE**
- **PROBETAS NO NORMALIZADAS. Según el ensayo y los resultados que se esperaban obtener del mismo.**

Clasificación que se desarrolla a continuación.

### **4.2.2.1. PROBETAS NORMALIZADAS**

Son aquellas probetas cuyas dimensiones o configuraciones formales están definidas en las diferentes normas UNE para los ensayos que en ellas se describen.

Las clasificamos en función del material:

#### **A.1. PROBETAS DE LADRILLO**

Las probetas de ladrillo que se describen a continuación se refieren tanto a los ladrillos de tejar de elaboración manual y artesanal como a los ladrillos de ejecución moderna

fabricados con procedimientos de extrusión. Los ladrillos de ejecución moderna que más se han utilizado son los que denominamos tipo "Santoveña" en referencia a su origen, pero se han ensayado algunos de otras procedencias, al igual que ocurre con los ladrillos de tejar antiguos. De estos los más utilizados han sido los denominados "La Operaria", por presentar en su tabla un sello con esta denominación, y que se supone que es el nombre de la cerámica que los elaboraba, pero han sido más tipos los ensayados. En cada ensayo se hace referencia explícita a cada tipo de ladrillo empleado.

#### A.1.1. Probetas de ladrillos enteros

Para muchos de los ensayos realizados a los ladrillos las probetas han sido piezas enteras y como tales se han ensayado. En algunos casos las normas requerían la preparación de una de las caras para que quedase lo más plana y regular posible, operaciones que se han llevado a cabo simplemente mediante el pulido con papel de lija de la cara de apoyo, o bien seccionando la pieza con la sierra de corte circular con aporte de agua y posterior lijado de dicho corte. Estas operaciones se han realizado con el fin de obtener caras perfectamente planas que servían para el apoyo de la probeta sobre un lecho húmedo, a través de las cuales se producía la absorción capilar del agua.



Imagen 45. Imágenes de probetas de ladrillos enteros

### A.1.2. Probetas cúbicas de 40 x 40 x 40 mm

Algunas de las probetas, por requisitos de las normas que obligaban a que fuesen piezas cúbicas de lado no menor a 10 mm, han sido cubos de ladrillo de un tamaño de 40 x 40 x 40 mm. Han sido cortados con sierra de corte circular con aporte de agua hasta conformar los paralelepípedos requeridos.

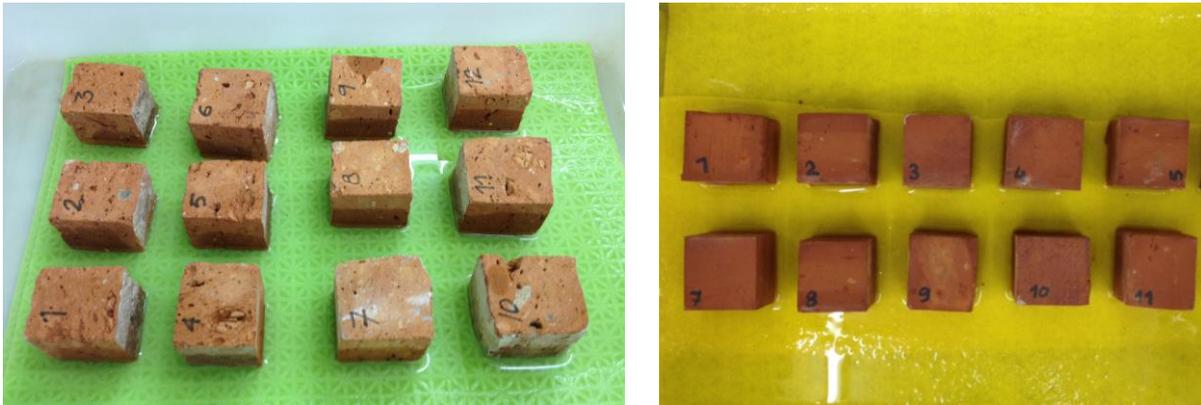


Imagen 46. Imágenes de probetas normalizadas de ladrillo de 40 x 40 x 40 mm durante un ensayo

## A.2. PROBETAS DE ARGAMASA DE CAL

Las probetas de argamasa de cal se han realizado con mezclas de cal/arena en las proporciones 1/2, 1:3 y 1/4, que se detallan en cada uno de los ensayos desarrollados.

### A.2.1. Probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm

Las probetas de mortero de cal normalizadas, son prismas regulares de base cuadrada, de dimensiones 40 x 40 x 160 mm. Se han realizado vertiendo la argamasa de cal sobre unos moldes metálicos normalizados, adquiridos para tal fin. (Ver más imágenes en el anexo I, destinado a explicar el instrumental utilizado en los ensayos)

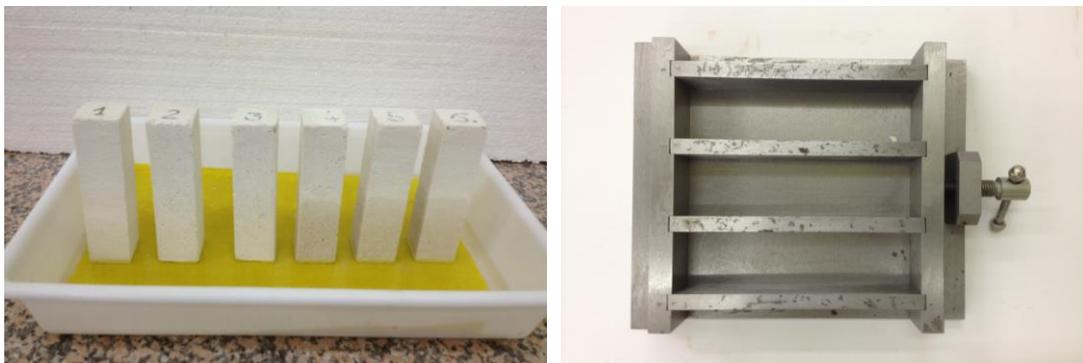


Imagen 47. Imágenes de probetas normalizadas de argamasa de 40 x 40 x 160 mm durante un ensayo y molde normalizado para su fabricación

### A.2.1. Probetas cúbicas de 40 x 40 x 40 mm

Con el fin de comparar el comportamiento de la argamasa con el del ladrillo en los mismos ensayos, se elaboraron cubos de argamasa de cal con ayuda del mismo molde que se utilizó para fabricar las probetas de 160 mm de longitud. La dimensión de estos cubos era de 40 x 40 x 40 mm.



Imagen 48. Imágenes de probetas normalizadas de argamasa de 40 x 40 x 40 mm durante un ensayo junto a probetas de mayor dimensión

## 4.2.2.2. PROBETAS NO NORMALIZADAS

La tipología y el diseño de este tipo de probetas, en muchos casos, se ha ido decidiendo a medida que se iban obteniendo los primeros resultados y se comprobaba que era necesario obtener más información y más ajustada a la realidad. Aunque al principio de la investigación se tenían ciertas suposiciones de cómo se debían de realizar determinados ensayos, la realidad es que, de la observación de los ensayos iniciales, se ha ido deduciendo el diseño de la mayoría de los posteriores. Ha sido la interpretación de los resultados obtenidos en unos ensayos lo que ha impulsado la ejecución de otros nuevos.

### B.1. PROBETAS DE ARGAMASA DE CAL

#### B.1.1. Porciones de argamasa procedentes del desmontaje de ensayos

Básicamente estas probetas han sido trozos de argamasa recogidos del desmontaje del ensayo realizado sobre los cuatro muros de fábrica (ver ensayo 10.1). Se recogieron muestras de porciones de morteros, de todas y de cada una de las llagas y tendeles de cada una de las hiladas. Con estas muestras se hicieron los correspondientes ensayos, algunos de los cuales se realizaron después de haberse ejecutado las mezclas de estas argamasas en la construcción de los cuatro muros.



Imagen 49. Imagen de probetas no normalizadas de trozos de argamasa de llagas y tendeles procedentes del desmontaje del ensayo de los cuatro muros E-10.1 antes de someterse a ensayos

#### B.1.2. Porciones de argamasa procedentes del desmontaje de edificios existentes

Estas probetas han sido trozos de argamasa de cal recogidas del desmontaje o derribo de edificios existentes en la zona objeto del estudio. Se recogieron muestras de porciones de morteros procedentes de al menos 6 edificaciones diferentes. Con estas muestras se realizaron los correspondientes ensayos. Por la datación hecha de los edificios se puede asegurar que son porciones de argamasa con antigüedad en torno a los 75-100 años.



Imagen 50. Imagen de algunas de las probetas no normalizadas de trozos de argamasa de llagas y tendeles procedentes del derribo de edificios antiguos. Porciones de argamasas de cal antes de someterse a los ensayos

## B.2. PROBETAS DE FÁBRICA

El diseño de estas probetas ha sido una de las decisiones que más dificultad y complejidad ha presentado porque en el acierto o no sobre este punto estaba la veracidad de las conclusiones que se iban a obtener. Se han diseñado y ensayado probetas de fábrica básicamente con cuatro finalidades:

1. Comprobar la fiabilidad de los datos suministrados por las sondas termohigrométricas.
2. Comprobar el fenómeno de la capilaridad y la eficacia de la barrera a base de productos hidrofugantes en probetas de reducidas dimensiones.
3. Analizar los procesos de ascensión capilar del agua en los muros de fábrica y comprobar la eficacia de las barreras químicas de corte hídrico a base de productos hidrofugantes en muros de gran dimensión.
4. Analizar la influencia que en estos procesos tiene específicamente la retícula continua que conforman las llagas y los tendeles en las juntas de argamasa de cal.
5. Analizar la influencia que tiene la interfase ladrillo-argamasa en el fenómeno de la capilaridad.

### B.2.1. Probetas para comprobación de las sondas termohigrométricas

Las sondas termohigrométricas suministran datos de temperatura y humedad tomados por unos sensores ubicados su extremo. Estos sensores están situados en el interior de unas vainas metálicas que presentan numerosos orificios, y que se introducían en perforaciones que se realizaban en las diferentes probetas, tomando los datos del ambiente presente en el espacio de dicha perforación. Sin embargo no era posible establecer una correlación directa entre los valores obtenidos de humedad en tanto por ciento y la cantidad de agua presente en las muestras. Es por ello que se ideó un ensayo para poder establecer una correlación entre ambos valores. (Para mejor comprensión de esta argumentación ver Ensayos 7.1 y 8.1)



**Imagen 51. Detalle de los extremos de las sondas introducidos en perforaciones de diferentes probetas de fábricas de ladrillo en las juntas de argamasa y en los ladrillos.**

Para ello se fabricaron dos probetas. Una formada por tres ladrillos puestos de plano con dos tendeles intermedios de argamasa y otra formada por seis ladrillos, cuya base eran dos ladrillos colocados de plano adosados por su soga, formando tres hiladas de ladrillo con dos juntas horizontales, tendeles, de argamasa de cal (la mezcla, como la de todas las probetas de fábrica, ha sido 1:3).



Imagen 52. A la izquierda probeta para ensayo 8.1 con sonda tomando datos y a la derecha probeta para ensayo 7.1, en el proceso de ejecución de la misma.

Siguiendo un proceso de pesada diaria de estas dos probetas se pudo determinar con bastante exactitud la relación que había entre el dato de humedad relativa suministrado por la sonda y la cantidad de agua que contenía la probeta.

Una de las conclusiones a las que se llegó es que las sondas marcaban valores del 100% de humedad para contenidos muy bajos de agua. Lo que por una parte era positivo ya que servía para detectar rápidamente la presencia de agua, pero por otra parte tenía el inconveniente de que una vez superado esta cantidad mínima de agua detectada, ya no suministraba más información sobre los sucesivos incrementos de la humedad.

También sirvió para constatar que estas sondas tienen una gran sensibilidad, de modo que no sólo detectan cantidades muy pequeñas de agua, sino que pequeños incrementos de agua en los materiales elevan rápidamente los valores de humedad suministrados por el instrumento.

### **B.2.2. Probeta de comprobación previa de la eficacia de la barrera hidrófuga**

Con el fin de hacer una comprobación previa de la eficacia de la barrera de corte hídrico por tratamiento con productos hidrofugantes en las juntas de argamasa, se hizo una probeta de base  $\frac{1}{2}$  asta por  $1 \frac{1}{2}$  asta y de 6 hiladas de altura. Se ejecutó sobre una cubeta estanca, de tal manera que estuviese asentada sobre una cama de arena con el fin de poder generar una base húmeda. Con ella se realizó la siguiente secuencia: Secado – Mojado de la base – Secado – Hidrofugación – Secado – Mojado de la base. Todo ello con el fin de comprobar los procesos de

capilaridad antes y después del tratamiento de los productos hidrofugantes. (En el apartado correspondiente ver ensayo 9.1 donde se explica con más detalle todo el proceso)

Durante todo el proceso un total de cuatro sondas termohigrométricas colocadas en perforaciones a diferentes alturas permitieron monitorizar la evolución de la temperatura y de la humedad en cada punto.

El hecho de llevar a cabo esta probeta, antes de fabricar otras de mucho mayor tamaño, era únicamente para acortar los tiempos de los procesos de humedecimiento y de secado para poder analizar los datos recibidos de las sondas.

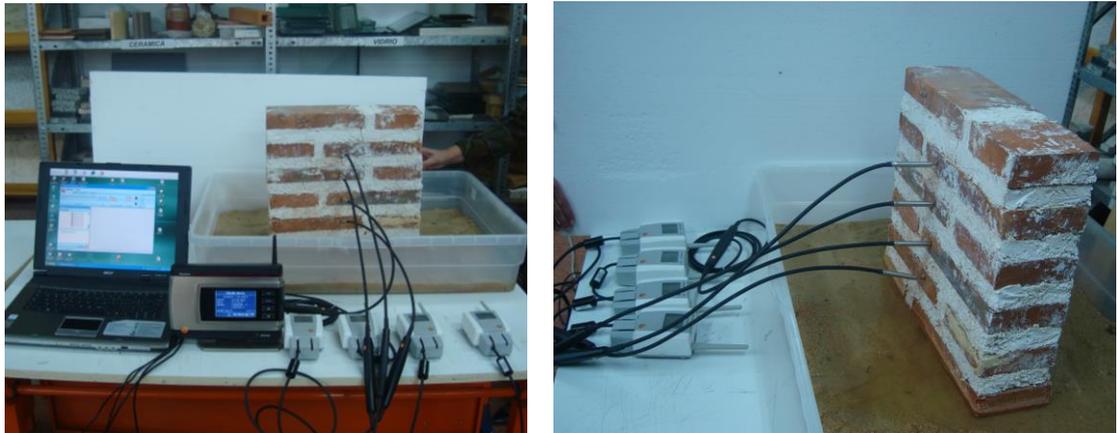


Imagen 53. Probeta de fábrica para el ensayo 9.1, con las sondas termohigrométricas tomando datos

### **B.2.3. Probetas para observación del proceso de ascensión capilar de la humedad en fábricas y de la influencia de las barreras químicas a base de productos hidrofugantes**

Después de analizar los resultados del ensayo anteriormente descrito se procedió a realizar el mismo proceso en cuatro muros de fábrica de grandes dimensiones con el fin de observar el fenómeno de la capilaridad en las fábricas y comprobar la influencia que tienen los productos hidrofugantes sobre dicho fenómeno. Aunque reproducir al cien por cien las condiciones reales de los muros de las edificaciones existentes es difícil, con estas probetas se intentó aproximarse lo más posible a dicha realidad. Por esta razón son muretes que tienen una anchura considerable y una altura que se estableció porque según las estimaciones realizadas, el frente húmedo no llegaría hasta la parte superior de los muros, como así ocurrió.

Con el fin de tener el mayor número posible de variables, y dentro de las posibilidades de espacio, tiempo e instrumental disponible, se construyeron dentro de una balsa estanca y sobre una cama de arena, cuatro muros, dos de ellos con **ladrillo macizo de tejar de elaboración manual**, y los otros dos **con ladrillo macizo**

**moderno fabricado por extrusión** con las siguientes características:

	TIPO DE LADRILLO	DIMENSIONES			CON BARRERA DE CORTE HÍDRICO
		ANCHURA	FRENTE	ALTURA	
<b>MURO 1</b>	De tejar antiguo	1 asta : 28 cms	80 cms	100 cms	NO
<b>MURO 2</b>	De tejar antiguo	1 ½ asta : 44 cms	80 cms	100 cms	SI
<b>MURO 3</b>	Extrusionado moderno	1 asta : 24 cms	65 cms	100 cms	NO
<b>MURO 4</b>	Extrusionado moderno	1 ½ asta : 38 cms	65 cms	100 cms	SI

**Tabla 4. Dimensiones de los cuatro muros utilizados en el ensayo 10.1**

La metodología de trabajo que se utilizó con estos cuatro muros fue similar a la correspondiente a la probeta de seis hiladas y se describe someramente a continuación.

Tras la construcción hubo que esperar un periodo de varios meses hasta alcanzar, por medio del proceso de secado natural, unos niveles de humedad suficientemente bajos como para poder usar las sondas. Llegado a este punto se procedió a hidrofugar dos de los muros, lo que elevó de nuevo los niveles de humedad en dichos muros, lo cual obligó de nuevo a esperar un periodo prolongado hasta que los cuatro muros presentaron unos niveles de humedad similares entre ellos y lo suficientemente bajos como para que las sondas pudiesen darnos datos útiles y fiables. A continuación se procedió al llenado de agua de la cama de arena sobre las que se asentaban los muretes con el fin de analizar el grado de eficacia de las barreras hidrófugas.

Los datos de temperatura y humedad se han tomado mediante la introducción de las sondas en perforaciones superficiales y profundas realizadas en la cara frontal de los muros. Las perforaciones tienen una profundidad tal que la funda que recubre el extremo de la sonda, donde están los sensores, se sitúa en la mitad del espesor del muro.

En el desarrollo del ensayo 10.1 se definen con precisión todas las dimensiones de las probetas, los ladrillos, las juntas de argamasas en forma de llagas y tendeles, volumen de cada material, conclusiones parciales, etc.



Imagen 54. Ejecución de los cuatro muros, e imagen de ellos una vez finalizados

Una vez terminados o estabilizados los procesos de la ascensión capilar de la humedad se procedió al desmontaje y pesado de todos y cada uno de los ladrillos de los cuatro muros y de porciones de argamasa de todos los niveles de llagas y tendeles, recién retirados y después de secado en estufa, con el fin de conocer la cantidad exacta de agua que contenían. Dándose con esta operación por finalizado el ensayo tras un periodo de tiempo de casi tres años.



Imagen 55. Dos momentos del desmontaje de los dos muros de ladrillo de tejar

#### **B.2.4. Probetas ejecutadas específicamente para observación de la influencia de las juntas de argamasa en la ascensión capilar de la humedad.**

Con el fin de estudiar específicamente la influencia que las juntas de argamasa de cal tienen en el fenómeno de la capilaridad se han ejecutado cuatro tipos de probetas de fábrica hechas con ladrillos de tejar.

##### **PROBETAS TIPO 1**

Este tipo de probetas (utilizadas en el ensayo 11.1) han sido fábricas compuestas por hiladas formadas por medios ladrillos de tejar antiguos y con tendeles de argamasa

de cal interpuestos. Se han hecho múltiples probetas, todas ellas de una altura lo más aproximada posible, de manera que la mitad se han ejecutado con tres ladrillos y dos juntas muy gruesas de argamasa, y la otra mitad con cuatro ladrillos y tres juntas de argamasa más estrechas.

En un primer momento se hicieron ocho muestras (cuatro con juntas finas y cuatro con juntas gruesas) utilizando medios ladrillos sin tener en cuenta la relación entre ellos, es decir de ladrillos distintos, pero se comprobó que algunos de los comportamientos eran muy dispersos y confusos a la hora de comparar los resultados obtenidos para cada grupo de probetas y se cambió el criterio.

De modo que se construyeron otras diez nuevas probetas tomándose ladrillos enteros que se cortaron a la mitad, fabricándose probetas pareadas dos a dos, una con tres ladrillos y otra con cuatro, en las cuales los ladrillos que están al mismo nivel de hilada, contando desde la base, son los mismos para cada grupo de dos probetas, según el dibujo que se muestra a continuación.

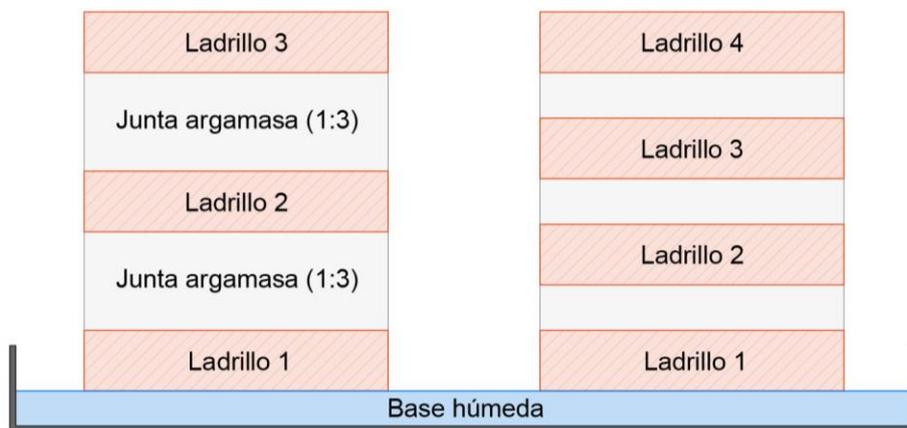


Figura 5. Configuración de las probetas del ensayo 11.1 y disposición de las juntas y los ladrillos

Con este nuevo tipo de disposición los resultados fueron mucho más clarificadores y homogéneos como se verá en la correspondiente explicación del ensayo.

De estas probetas se obtuvieron tres tipos de datos:

- Datos de temperatura y humedad obtenidos de las sondas termohigrométricas situadas en las perforaciones situadas en la parte alta
- Imágenes de la cámara termográfica
- Absorción de agua desde la base mediante pesada de las probetas, con lo que se podía medir la cantidad de agua absorbida y la velocidad de absorción

La razón es, que además de estudiar en estas probetas la influencia de la junta de argamasa en la capilaridad, se querían obtener además datos y conclusiones sobre los procesos de absorción y desorción.

Como se puede ver en la figura 6, las probetas se ejecutaron pareadas por tipos de ladrillos: tipo 1, tipo 2, y así sucesivamente. Cada tipo de par de probetas estaba hecho con ladrillos de la misma procedencia, los ladrillos tipo 1, eran todos de la misma cerámica, y lo mismo para el resto de pares de probetas. Para fabricarlas, los ladrillos se cortaron a la mitad, de manera que el ladrillo de la base era el mismo para cada tipo de probeta, y lo mismo ocurría para la siguiente hilada, y así sucesivamente como se puede apreciar con claridad en la figura 5. De manera que se han hecho diez probetas con cinco tipos de ladrillos distintos.

Como los ladrillos presentaban absorciones diferentes se ha conseguido con esta configuración eliminar el factor derivado del ladrillo para centrar el estudio en la junta de argamasa en dos de las características que interesaban para la investigación, el espesor y la interfase.

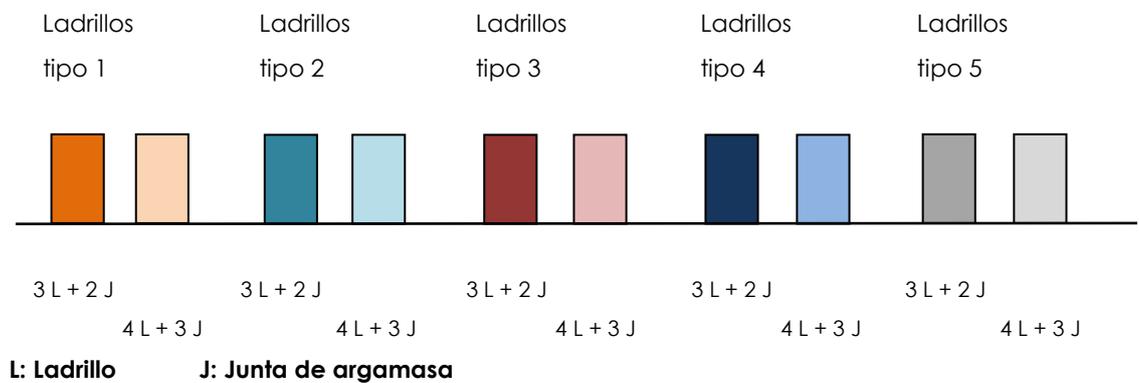


Figura 6. Disposición de las probetas en el ensayo 11.1

Gráfico explicativo de la disposición de las probetas de fábrica. De cada pareja, una tenía cuatro ladrillos con tres juntas o tendeles de argamasa más estrechos, y la otra tres ladrillos con dos juntas o tendeles más gruesos.



Imagen 56. A la izquierda imagen de cuatro ladrillos de la misma cerámica cortados a la mitad antes de conformar las probetas. A la derecha imagen de dos probetas "pareadas" ejecutadas con medios ladrillos de modo que las mitades procedentes del mismo ladrillo están situadas en la misma hilada



Imagen 57. Disposición de todas las probetas durante la realización del ensayo

## PROBETA TIPO 2

Esta probeta tenía como objetivo observar la evolución de la humedad capilar que asciende exclusivamente por la retícula continua que forma la argamasa. Para realizar la probeta de fábrica primero se hidrofugaron los ladrillos de tejar (con un producto hidrofugante de la casa BASF denominado *Rasajil BLF*) que se iban a utilizar, por inmersión total durante 5 minutos, posteriormente se les dejó un periodo de secado de tres días tras los cuales se volvió a repetir el proceso de hidrofugación. Con el fin de comprobar si la hidrofugación era totalmente eficaz, se colocaron dichos ladrillos durante tres días sobre un lecho húmedo, se realizaron las pesadas correspondientes y se comprobó que los ladrillos prácticamente no absorbían cantidad apreciable de agua.

La comprobación de la evolución de la humedad, como se expone en el desarrollo del ensayo 12.1, se realizó mediante el uso de la cámara termográfica y la colocación de sondas termohigrométricas que permitían detectar el paso de la humedad.

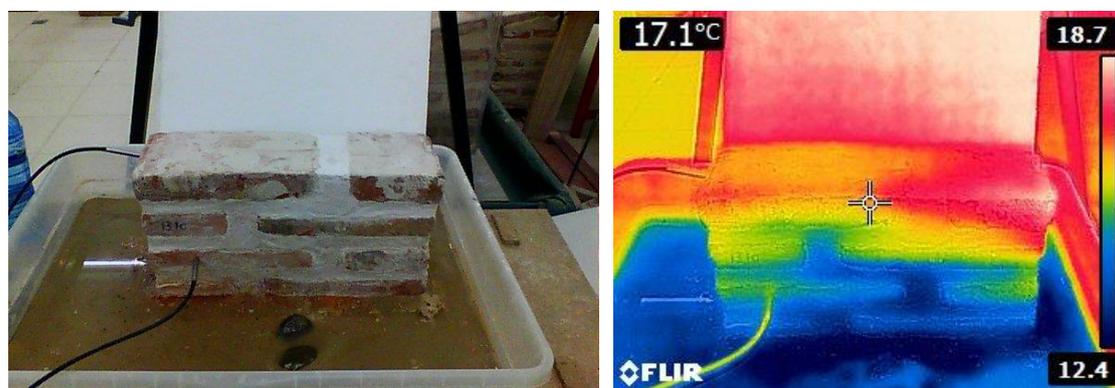


Imagen 58. Probeta apoyada sobre lecho húmedo con sondas termohigrométricas e imagen termográfica. El color azul oscuro de la imagen muestra la presencia de agua

### PROBETA TIPO 3

Probeta de fábrica cuyo objetivo era observar (en el ensayo 13.1) como era la evolución de la humedad capilar en función de si ésta atraviesa la capa de argamasa o la capa del ladrillo. Para ello se hizo una probeta de base las dimensiones de un ladrillo de tejar y compuesta por dos capas o tendeles de argamasa y dos de ladrillo en uno de los cuales se apoyaba.

Las dimensiones de la probeta eran de 150 x 280 mm de base por 145 mm de altura. También se utilizó para comprobar la cantidad máxima de agua que es capaz de absorber una fábrica y las velocidades y los tiempos de absorción y desorción.

Para comprobar la evolución de la humedad se tomaron cotas de la subida del frente húmedo con ayuda de la cámara termográfica y se realizaron pesadas periódicas en cortos periodos de tiempo.



Imagen 59. Imágenes de la probeta apoyada sobre lecho húmedo durante el ensayo.

### PROBETA TIPO 4

Esta probeta, utilizada en el ensayo 14.1, se fabricó con la finalidad de observar si la interfase vertical que se genera entre la argamasa y el ladrillo en las llagas favorecía la ascensión del agua a su través. Para ello se hizo una probeta con dos ladrillos enteros y una junta de argamasa entre ellos. Una vez seca se “zunchó” con el fin de asegurar la unión entre las tres capas y se colocó verticalmente sobre un lecho húmedo para observar con la cámara termográfica la evolución de la ascensión de la humedad.

Este ensayo permitió comprobar la evolución de la humedad en la interfase vertical de un modo específico. Si bien el comportamiento de la humedad en los dos materiales coincidió con el observado en el resto de ensayos realizados en fábricas con juntas similares.

Hay que mencionar que esta situación de interfase vertical no es muy significativa

para el tipo de muros que se han estudiado, ya que sólo ocurre en ladrillos dispuestos a sardinel, donde evidentemente no suele haber procesos de ascensión de agua por capilaridad y en la zona de las llagas en la superficie de contacto entre la argamasa y el canto o testa de los ladrillos.



Imagen 60. Imágenes de la probeta apoyada sobre lecho húmedo durante el ensayo.

## 4.3. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se describen y se explican con todo detalle los diferentes **ensayos** que han conformado el grueso de este proyecto de investigación.

Se organiza en este epígrafe todo el trabajo de ejecución de ensayos, documentación, recogida de datos, interpretación y elaboración de conclusiones, de la siguiente manera en tres niveles de desarrollo.

### 4.3.1. LISTADO Y CLASIFICACIÓN GENERAL DE ENSAYOS

En este apartado se expone un listado de todos los ensayos realizados clasificados en dos bloques.

### 4.3.2. TABLA RESUMEN DE ENSAYOS

En este segundo apartado se describen brevemente dichos ensayos con el fin de tener una visión global y un resumen completo de todos ellos.

### 4.3.3. DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DE ENSAYOS

Es en este apartado en el que se desarrollan exhaustivamente todos y cada uno de los ensayos realizados. Describiéndose con todo detalle los procedimientos, tanto de la ejecución de las probetas como del desarrollo del propio ensayo, cuáles son los datos recogidos, exponiéndose fotos, tablas y gráficos y aportando las primeras conclusiones deducidas en cada uno.

#### 4.3.3.1. Ensayos normalizados. Según normas UNE

#### 4.3.3.2. Ensayos no normalizados de diseño propio

A su vez cada ensayo se organiza según el material sobre el que se ha realizado el ensayo por este orden: primero los llevados a cabo sobre probetas de argamasas de cal, luego los llevados a cabo sobre los ladrillos, para concluir con los llevados a cabo sobre probetas de fábrica.

Como se puede observar, hay algunos ensayos que se repiten. La razón es volver a comprobar si los datos obtenidos en el primer ensayo son correctos, bien porque los resultados no eran los esperados inicialmente, bien, como ocurre en el caso de la argamasa, por ver si el paso del tiempo influye en los procesos de absorción de agua.

El desarrollo de todos los ensayos se articula según estos epígrafes:

1. Denominación
2. Objetivo del ensayo
3. Procedimiento y descripción del ensayo
4. Descripción de las probetas
5. Imágenes del ensayo y comentarios
6. Datos y expresión de resultados
7. Discusión de resultados y conclusiones

En los ensayos realizados según las normas UNE los puntos 1, 2 y 3 son comunes y se explican al inicio de cada ensayo, mientras que los puntos del 4 al 7 se desarrollan individualmente para cada ensayo específico.

Como ya se ha apuntado en distintos apartados de esta tesis, la complejidad del fenómeno a estudiar, la capilaridad, sobre un sistema constructivo tan heterogéneo como es la fábrica de ladrillo de tejar y sus componentes, ha supuesto que la mayor parte de la investigación se haya sustentado en las conclusiones deducidas sobre los datos obtenidos con el desarrollo de **ensayos** (un total de 26 ensayos). Estos se han desarrollado en laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Valladolid con la inestimable colaboración su técnico.

Con ellos se ha buscado en todo momento conocer, con la mayor precisión posible, al menos los siguientes aspectos relacionados con la presencia de agua en el interior de las fábricas y sus materiales debida al fenómeno de la absorción capilar:

- La cantidad del agua dentro de la fábrica en cada zona y de cada uno de los materiales que la componen
- Cantidad de agua absorbida
- La velocidad de absorción y de desorción
- El comportamiento específico que tiene la humedad en la retícula continua que conforman las llagas y los tendeles

Se han realizado también ensayos con el fin de conocer algunas de las características físicas y químicas de los materiales utilizados, de los ladrillos y de la argamasa de cal, obteniendo datos acerca de la porosidad, de la densidad, de la composición química y de la estructura interna. Algunos de estos datos se han obtenido de ensayos que no se describen en esta tesis al estar desarrollados por laboratorios externos, en concreto el Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid. Por ejemplo los que se refieren a la composición química de las materias primas de los ladrillos se han obtenido con ayuda de la

plataforma de Difracción de Rayos X, Bruker D8 Discover, y las imágenes ampliadas han sido tomadas con el MEB, microscopio electrónico de barrido, tanto de los ladrillos como de la argamasa.

Una primera clasificación de los ensayos sería la que los divide en dos grupos: *ensayos normalizados* y *ensayos no normalizados*. La razón es que hay algunos ensayos definidos en las normas que permiten conocer determinados comportamientos del agua en los materiales que nos atañen, pero hay otros muchos aspectos que no son estudiados por las normas existentes. Este vacío en el estado del arte es una de las razones que justifican esta tesis. En concreto no hay ningún ensayo normalizado que permita determinar cuál es el comportamiento del agua en el fenómeno de la capilaridad en las fábricas, y en concreto en las fábricas de ladrillo de tejar antiguo recibido con argamasas de cal.

Una segunda clasificación vendría determinada por el objetivo que se persigue con cada uno de los ensayos. De modo que dentro de cada uno de los apartados antes comentados se puede hacer la siguiente clasificación en función, como se ha dicho, del objeto o del interés de cada ensayo.

### **Ensayos Normalizados**

Los cinco primeros ensayos se realizan con el fin de obtener datos sobre las cantidades de agua que pueden absorber los materiales. Han sido fundamentales y han servido para conocer la cantidad de agua que puede absorber cada material, en qué condiciones y a qué velocidad.

- **Ensayo UNE-EN 772-11.** Con este ensayo (Ensayo 1) se busca conocer la cantidad de agua que es capaz de absorber un material (en este caso ladrillo y argamasa) en un periodo de 1 minuto. Con ello se obtiene información acerca de la rapidez con la que el agua accede por capilaridad en los materiales estudiados. Esto influye en el proceso del fraguado ya que si los ladrillos estudiados presentan tasas muy elevadas en este ensayo esto supondría que dicho material absorbe el agua de la argamasa con demasiada premura, desvirtuando con ello el proceso natural del fraguado. Si esto ocurre hay que humedecer generosamente los ladrillos antes de ser puestos en obra, lo que ocurre en general con todos los ladrillos de tejar.
- **Ensayo UNE-EN 772-7.** Este ensayo (Ensayo 2) da una información muy precisa de la cantidad de agua que es capaz de absorber un material si es sumergido en agua hirviendo. Si bien es cierto que es un ensayo que reproduce una situación que nunca va a suceder, permite deducir la proporción de huecos que tiene el material.

- **Ensayo UNE-EN 15801.** Este ensayo (Ensayo 3) aporta una información muy interesante al dar una idea de cuál es el comportamiento de la humedad capilar cuando esta es absorbida a través de la base de las probetas si están apoyadas en un lecho húmedo a lo largo de un periodo prolongado de tiempo. Situación que tiene mucho que ver con lo que ocurre en la realidad. La norma describe un método para determinar la absorción de agua por capilaridad de los materiales inorgánicos porosos utilizados en el patrimonio cultural. En esta tesis se ha aplicado tanto a las fábricas como a los materiales en ellas utilizados, argamasas y ladrillos.
- **Ensayo UNE 67027-84.** Con este ensayo (Ensayo 4), realizado por inmersión en agua fría hasta que la diferencia de peso entre dos pesadas es menor del 0,1%, se ha podido conocer la cantidad máxima de agua que es capaz de absorber un material en condiciones de humedad total. Ha aportado datos interesantes, sobre todo al comparar los valores entre los distintos materiales y entre piezas de distinta procedencia.
- **Ensayo UNE-EN 1015-18.** Ensayo similar al ensayo realizado bajo la norma UNE-EN 15801, si bien en este caso se ha eliminado la posibilidad de la evaporación por los laterales de las probetas durante el ensayo al estar estas caras parafinadas. (Ensayo 5). La diferencia es que en este ensayo una cara de la probeta se sumerge de 5 a 10 mm en agua, mientras que en la norma de conservación se coloca el material sobre una capa permeable. Ambos ensayos están diseñados para analizar la ascensión del agua por capilaridad.
- El sexto ensayo realizado bajo las normas **UNE 772-13** y **UNE 772-3** ha sido imprescindible ya que con él se buscaban los valores de la densidad aparente y de la porosidad abierta de los distintos materiales. Los datos obtenidos han permitido analizar los obtenidos en el resto de los ensayos.

### Ensayos No Normalizados

Estos ensayos se han llevado a cabo con varios propósitos:

- Analizar el fenómeno de la capilaridad en las fábricas.
- Desarrollar procedimientos de verificación de parte del instrumental, con el fin de poder analizar los datos que han proporcionado.
- Comprobar la eficacia de la barrera de corte hídrico.
- Analizar la influencia que en este fenómeno, el de la capilaridad, tiene la argamasa al conformar un sistema de retículas continuas y;
- Analizar la influencia de la interfase ladrillo-argamasa.

En concreto los **ensayos 7 y 8** tienen como objetivo buscar la relación entre los valores de humedad que se obtienen de las sondas termohigrométricas y la cantidad de agua. La razón de idear estos ensayos fue la imposibilidad con la que nos encontramos al principio de los ensayos de saber la relación que existía entre el dato de humedad que suministraban las sondas termohigrométricas que se estaban usando en los ensayos y la cantidad de agua real que existía en el entorno del sensor de la sonda cuando esta era introducida en perforaciones que se realizaban en los ladrillos o en las argamasas.

Con los **ensayos 9 y 10** se trataba de analizar sobre probetas de fábrica específicamente el fenómeno de la capilaridad. Como se observó que los procesos de humedecimiento y secado eran muy prolongados en el tiempo, primero se ensayó sobre una probeta de fábrica pequeña antes de realizar el ensayo sobre las cuatro probetas siguientes que eran muros de mayor dimensión con periodos de ascensión capilar y secado mucho prolongados en el tiempo. También se buscaba conocer la eficacia de la barrera química hidrófuga como freno a la ascensión capilar de la humedad.

Con los **ensayos 11, 12, 13 y 14** se buscaba específicamente determinar cuál es la influencia que en la ascensión de la humedad por capilaridad tiene la interfase que se genera en las superficies de contacto entre el ladrillo y la argamasa. Se trataba de observar como es el flujo de la humedad cuando esta tiene que atravesar dicha discontinuidad en el material y cómo se comporta en cada material. Y también se quería observar y analizar cómo se comportaba el agua en la retícula continua que conforman las llagas y los tendeles de argamasa en el fenómeno de la capilaridad.

Un dato que se desconocía y que pareció interesante averiguar era la cantidad de humedad que podía aportar a las fábricas el medio ambiente, por lo que se llevó a cabo el **ensayo 15** que, con ayuda de la cámara climática, permitió descubrir el valor en peso de dicho aporte, tanto para las fábricas como para los distintos materiales que la conforman. Para ello se introdujeron en el interior de la cámara climática distintas probetas variándose las condiciones interiores de temperatura y humedad. Cada vez que se modificaban las condiciones se llevaban a cabo pesadas diarias hasta que se estabilizaba el peso y se volvía a repetir el proceso. De esta manera se pudo saber con exactitud la cantidad de agua tomada del ambiente en función de dichos parámetros.

Para terminar se ensayó un grupo numeroso de probetas de ladrillos y argamasas de diversa procedencia (**ensayo 16**). Colocándolas sobre un lecho húmedo, se trataba

de comprobar de un modo visual, y con ayuda de la cámara termográfica, cuál era el ascenso del agua por capilaridad en los distintos materiales simultáneamente. Este ensayo permitió observar la variación del frente húmedo de un modo muy clarificador.

### 4.3.1. LISTADO Y CLASIFICACIÓN GENERAL DE ENSAYOS

#### ▪ ENSAYOS NORMALIZADOS. SEGÚN NORMAS UNE

- **Ensayo 1** Según norma **UNE-EN 772-11**. *Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción de agua inicial de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería*
  - **Ensayos en argamasa** **Ensayo 1.1**
  - **Ensayos en ladrillo** **Ensayo 1.2**  
**Ensayo 1.3**  
**Ensayo 1.4**
- **Ensayo 2** Según norma **UNE-EN 772-7**. *Determinación de la absorción de agua por inmersión en agua hirviendo de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería que sirven de barrera al agua por capilaridad*
  - **Ensayos en ladrillo** **Ensayo 2.1**  
**Ensayo 2.2**  
**Ensayo 2.3**
- **Ensayo 3** Según norma **UNE-EN 15801**. *Determinación de la absorción de agua por capilaridad*
  - **Ensayos en argamasa** **Ensayo 3.1**
  - **Ensayos en ladrillo** **Ensayo 3.2**
- **Ensayo 4** Según norma **UNE 67027-84**. *Determinación de la absorción de agua*
  - **Ensayos en argamasa** **Ensayo 4.1**
  - **Ensayos en ladrillo** **Ensayo 4.2**
- **Ensayo 5** Según norma **UNE-EN 1015-18**. *Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido*
  - **Ensayos en argamasa** **Ensayo 5.1**  
**Ensayo 5.2**

- **Ensayo 6** Según norma **UNE-EN 772-13**. *Determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería (excepto piedra natural)* y norma **UNE-EN 772-3**. *Determinación del volumen neto y del porcentaje de huecos por pesada hidrostática de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería*
  - **Ensayos en argamasa y ladrillo** **Ensayo 6.1**

## ▪ ENSAYOS NO NORMALIZADOS

### ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE LAS SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS

- **Ensayo 7** Sobre probeta de 6 ladrillos de dimensiones de base de 1 por 1 asta por tres hiladas de altura. Para determinar la correlación entre los datos obtenidos de las sondas y el contenido de agua en la probeta
  - **Ensayo en fábrica** **Ensayo 7.1**
- **Ensayo 8** Sobre probeta de 3 ladrillos, dispuestos en 3 hiladas. Para determinar la correlación entre los datos obtenidos de las sondas y el contenido de agua en la probeta
  - **Ensayo en fábrica** **Ensayo 8.1**

### ENSAYO PREVIO DE OBSERVACIÓN DEL FENÓMENO DE LA CAPILARIDAD Y DE COMPROBACIÓN DE LA EFICACIA DE LA BARRERA HIDRÓFUGA

- **Ensayo 9** Sobre murete de 6 hiladas. Para comprobación previa de la eficacia del tratamiento de fábricas con producto hidrofugante
  - **Ensayo en fábrica** **Ensayo 9.1**

### ENSAYO PARA OBSERVACIÓN DEL FENÓMENO DE LA CAPILARIDAD Y DE COMPROBACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA BARRERA HIDRÓFUGA

- **Ensayo 10** Ensayo sobre 4 muros de fábrica para observación del fenómeno de la ascensión de la humedad por capilaridad y la eficacia de la barrera hidrófuga
  - **Ensayo en fábrica** **Ensayo 10.1**

## ENSAYOS ESPECÍFICOS DE COMPROBACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA EN LA CAPILARIDAD

- **Ensayo 11** Ensayo sobre probetas pareadas de fábrica de tres y cuatro hiladas para comprobar el efecto de la capilaridad según el número y espesor de las juntas de argamasa
  - **Ensayos en fábrica** **Ensayo 11.1**
  
- **Ensayo 12** Ensayo sobre probeta de fábrica para comprobación de la ascensión de la humedad por capilaridad únicamente por las llagas y los tendeles de argamasa
  - **Ensayos en fábrica** **Ensayo 12.1**
  
- **Ensayo 13** Ensayo sobre probeta de fábrica compuesta de dos ladrillos y dos juntas de argamasa para comprobar el efecto de la capilaridad cuando la humedad tiene que atravesar capas alternas de argamasa y ladrillo
  - **Ensayos sobre fábrica** **Ensayo 13.1**
  
- **Ensayo 14** Ensayo sobre probeta de fábrica para comprobar el efecto de la capilaridad a través de la interfase vertical en la junta entre argamasa y ladrillo en las llagas
  - **Ensayos en fábrica** **Ensayo 14.1**

## ENSAYOS DE ABSORCIÓN DE HUMEDAD DEL AMBIENTE

- **Ensayo 15** Ensayo de probetas en cámara climática para comprobar la cantidad de agua que pueden absorber los materiales ensayados de la humedad ambiente
  - **Ensayos en argamasa** **Ensayo 15.1**  
**Ensayo 15.2**
  - **Ensayos en ladrillo** **Ensayo 15.3**

## ENSAYOS SIMULTANEOS DE CAPILARIDAD EN PROBETAS DE ARGAMASA Y LADRILLO

- **Ensayo 16** Ensayo sobre un amplio conjunto de probetas de argamasa (1:2, 1:3, 1:4) y ladrillo para evaluar simultáneamente la evolución de la cota y la velocidad de la ascensión de la humedad por capilaridad.
  - **Ensayos en argamasa y ladrillo** **Ensayo 16.1**

### 4.3.2. TABLA RESUMEN DE PROCEDIMIENTOS Y MATERIALES ENSAYADOS

<b>LISTADO DE ENSAYOS</b>			
Número de Ensayo	Descripción breve del ensayo  Descripción de la probeta sobre la que se ha desarrollado el ensayo	Normativa a aplicar	Material Sobre el que realiza el ensayo
<b>ENSAYO 1</b>	El ensayo consiste en la colocación de una probeta sobre dos varillas de vidrio, de modo que, apoyada sobre ellas y separada del fondo de la cubeta estanca, se moje superficialmente una de las caras laterales durante un período de 1 minuto para obtener la tasa de absorción de agua inicial.		
1.1	Se ha llevado a cabo sobre de 18 probetas de argamasa de cal, de dimensiones 40 x 40 x 160 mm y de proporciones en las mezclas 1:2, 1:3 y 1:4 (cal/arena)	UNE-EN 772-11	Argamasa
1.2	Se ha llevado a cabo sobre 6 ladrillos de tejar de elaboración manual tipo "La Operaria"		Ladrillo
1.3	Se ha llevado a cabo sobre 6 ladrillos de ejecución moderna por extrusión tipo "Santoveña"		Ladrillo
1.4	Se ha llevado a cabo sobre 6 ladrillos de tejar de elaboración manual de recuperación, de un edificio del centro de Valladolid		Ladrillo
<b>ENSAYO 2</b>	El ensayo consiste en sumergir totalmente una probeta en un recipiente con agua hirviendo durante 5 horas y dejarlo posteriormente durante otras 16 horas sumergido hasta que el agua se enfríe a la temperatura ambiente, pesándose antes y después del ensayo, con el fin de conocer cuál es la cantidad máxima de agua que es capaz de absorber la probeta		
2.1	Se ha llevado a cabo sobre 6 ladrillos de tejar de elaboración manual tipo "La Operaria"	UNE-EN 772-7	Ladrillo
2.2	Se ha llevado a cabo sobre 6 ladrillos de ejecución moderna por extrusión tipo "Santoveña"		Ladrillo
2.3	Se ha llevado a cabo sobre 6 ladrillos de tejar de elaboración manual de recuperación, de un edificio del centro de Valladolid		Ladrillo

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

<b>ENSAYO 3</b>	El ensayo consiste en la colocación de una probeta dentro de un recipiente sobre un lecho permeable de unos 5 mm de espesor saturado de agua, sobre el que se apoya la probeta. A intervalos de tiempo se van realizando pesadas hasta que la variación de peso no supera el 1% en 24 horas, con el fin de determinar la cantidad de agua absorbida por capilaridad a través de la superficie de la base		
3.1	Ensayo realizado sobre 45 (15+15+15) probetas normalizadas (cada grupo de 15 probetas estaba compuesto por 3 probetas de dimensiones de 40 x 40 x 160 mm y 12 de 40 x 40 x 40 mm) de argamasa de cal, con tres proporciones diferentes en su composición: 1:2, 1:3 y 1:4 (cal:arena)	UNE-EN 15801	Argamasa
3.2	Ensayo realizado sobre varios tipos de probetas de ladrillo y diferentes colocaciones:  A) Sobre 4 ladrillos, dos de tejar tipo "La Operaria" y dos de extrusión tipo "Santoveña". Se hidrofugó uno de cada tipo  B) Sobre un ladrillo de tejar "La Operaria" apoyado sobre su canto, sobre su tabla y sobre su testa  C) Sobre 12+12 probetas de ladrillo (tipo "La Operaria" y tipo "Santoveña" de dimensiones 40 x 40 x 40 mm		Ladrillo
<b>ENSAYO 4</b>	El ensayo consiste en sumergir totalmente una probeta en un recipiente en agua fría hasta que la diferencia entre dos pesadas efectuadas cada 24 horas no difiera en más del 0,1%, con el fin de conocer la cantidad máxima de agua que es capaz de absorber		
4.1	Ensayo realizado sobre 18 (6+6+6) probetas normalizadas de argamasa de dimensiones 40 x 40 x 160 mm, con tres proporciones diferentes en su composición: 1:2, 1:3 y 1:4 (cal/arena)	UNE-EN 67027-84 (derogada)	Argamasa
4.2	Ensayo llevado a cabo sobre dos tipos de ladrillo, "La Operaria" y "Santoveña". Se realizó este ensayo con 6 ladrillos de cada tipo		Ladrillo
<b>ENSAYO 5</b>	Ensayo realizado con el fin de determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. Para ello se coloca la probeta con las caras laterales parafinadas sobre varillas de vidrio de manera que la cara de apoyo (sin parafinar) esté sumergida en agua unos 5 mm		
E-5.1	Ensayo realizado por un laboratorio independiente de la empresa General de Morteros S.A., sobre 6 probetas normalizadas de argamasa con proporción en la mezcla 1:3 y de dimensiones 40 x 40 x 160 mm	UNE-EN 1015-18	Argamasa
E-5.2	Ensayo realizado sobre 18 (6+6+6) probetas normalizadas de argamasa de dimensiones 40 x 40 x 160 mm y con proporciones de la mezcla 1:2, 1:3 y 1:4		Argamasa

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

<b>ENSAYO 6</b>	Ensayo realizado con el fin de determinar los valores de la densidad aparente seca y de la porosidad abierta de la argamasa de cal y de los ladrillos mediante el uso de la balanza hidrostática		
6.1	<p>Se realiza este ensayo sobre varias muestras de argamasa y ladrillos.</p> <p>A) Sobre 9 probetas (3+3+3) de argamasa de dimensiones normalizadas de 40 x 40 x 160 mm con las tres proporciones 1:2, 1:3 y 1:4 (cal/arena)</p> <p>B) Sobre porciones de argamasa procedentes del desmontaje del ensayo de los cuatro muros (ensayo 10.1)</p> <p>C) Sobre porciones de argamasa procedentes del derribo de edificios existentes</p> <p>D) Sobre ladrillos de tejar antiguos elaborados manualmente</p> <p>E) Sobre ladrillos modernos fabricados por extrusión</p>	<p>UNE-EN 772-13</p> <p>UNE-EN 772-3</p>	<p>Argamasa</p> <p>Ladrillo</p>
<b>Ensayo 7</b> 7.1	Ensayo realizado sobre una probeta de 6 ladrillos de dimensiones de base de un asta por un asta y tres hiladas de altura con el fin de conocer la correlación exacta entre los valores que se obtienen de las sondas termohigrométricas y la cantidad real de agua de la probeta. La proporción de la mezcla de la argamasa era 1:3	Ensayo NO normalizado	Fábrica
<b>Ensayo 8</b> 8.1	Ensayo realizado sobre una probeta de 3 ladrillos colocados uno sobre otro, con dos tendeles de argamasa entre ellos, con el fin de conocer la correlación exacta entre los valores que se obtienen de las sondas termohigrométricas y la cantidad real de agua de la probeta. La proporción de la mezcla de la argamasa era 1:3	Ensayo NO normalizado	Fábrica
<b>Ensayo 9</b> 9.1	Ensayo realizado sobre una fábrica de ladrillo de 6 hiladas de altura, con una base de medio asta por 1 ½ asta, sobre la que se aplica una barrera hidrófuga con el fin de estudiar la eficacia de dicha barrera en la contención del agua de capilaridad. También es usada para comprobar los procesos de absorción-desorción. La proporción de la mezcla de la argamasa era 1:3	Ensayo NO normalizado	Fábrica
<b>Ensayo 10</b> 10.1	Es el ensayo más completo de todos los realizados. Realizado sobre cuatro muros de fábrica de ladrillo. Dos de los muros son ejecutados con ladrillo de tejar antiguo, y dos con ladrillo moderno por extrusión. Los cuatro de un metro de altura y con una base de dos astas y media de longitud y dos espesores distintos, de un asta y de 1 ½ asta. En dos de ellos se inyecta un producto hidrófugante en las hiladas inferiores con el fin de valorar la eficacia de dicha barrera química. Estudiándose igualmente los procesos de absorción y desorción. La proporción de la mezcla de la argamasa era 1:3	Ensayo NO Normalizado	Fábrica

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

<p><b>Ensayo 11</b> 11.1</p>	<p>Ensayo realizado con el fin de observar la influencia que tienen las juntas de argamasa en la ascensión de la humedad por capilaridad. Para ello se han hecho probetas (18 en total) con tres y cuatro hiladas de ladrillo, de la misma altura y con juntas de mortero de diferente espesor que se colocan sobre un lecho húmedo. De esta manera se va a poder comprobar sobre probetas equivalentes como varía el fenómeno de la ascensión de la humedad capilar en función de las características de las juntas de argamasa y de la interfase ladrillo-argamasa. La proporción de la mezcla de la argamasa era 1:3</p>	<p>Ensayo NO Normalizado</p>	<p>Fábrica</p>
<p><b>Ensayo 12</b> 12.1</p>	<p>El objetivo de este ensayo era observar específicamente como asciende la humedad por capilaridad por la retícula continua que conforman las llagas y los tendeles, sin atravesar los ladrillos, observando el recorrido que hace el agua ascendiendo por la argamasa "serpenteando" por las juntas. Para ello se fabricó un murete con argamasa de cal 1:3 y ladrillos totalmente hidrofugados. La probeta de fábrica tenía de dimensiones 6 hiladas de altura, con una base de medio asta por 1 ½ asta. La proporción de la mezcla de la argamasa era 1:3</p>	<p>Ensayo NO Normalizado</p>	<p>Fábrica</p>
<p><b>Ensayo 13</b> 13.1</p>	<p>El objetivo de este ensayo es observar específicamente como asciende la humedad por capilaridad según atraviesa capas de diferentes materiales sin posibilidad de ascender por la banda de argamasa. Es un ensayo similar al E-11.1 pero estudiado con más detalle. La idea es ver si es posible establecer una relación entre los datos de absorción de agua según se produce el cambio de una fase a otra, cuando pasa de ladrillo a argamasa y viceversa. Para ello se fabricó una probeta con las siguientes capas de abajo a arriba: ladrillo-argamasa-ladrillo-argamasa. La base era un ladrillo y La proporción de la mezcla de la argamasa era 1:3</p>	<p>Ensayo NO Normalizado</p>	<p>Fábrica</p>
<p><b>Ensayo 14</b> 14.1</p>	<p>El objetivo de este ensayo era observar si existía o no una ascensión significativa de humedad por capilaridad justo en la interfase vertical que existe en la unión entre la argamasa y el ladrillo. Para ello se fabricó una probeta con dos ladrillos macizos de tejar tipo La Operaria con una banda intermedia de argamasa de cal 1:3. La probeta se "zunchó" con el fin de mantener unido en todo momento todo el conjunto y evitar que se desprendiese la argamasa de cal del ladrillo, y se colocó verticalmente sobre un lecho húmedo. La proporción de la mezcla de la argamasa era 1:3</p>	<p>Ensayo NO Normalizado</p>	<p>Argamasa</p>
<p><b>Ensayo 15</b></p>	<p>Ensayo en el cual se introducen en la cámara climática diferentes probetas variándose las condiciones climáticas en su interior, humedad y temperatura, con el fin de conocer la cantidad de agua que pueden absorber del ambiente.</p>		
<p>15.1</p>	<p>Se lleva a cabo con 9 trozos de argamasa procedentes de las llagas y tendeles del desmontaje del ensayo de los cuatro muros (ensayo 10.1). La proporción de la mezcla de la argamasa era 1:3 (cal/arena)</p>	<p>Ensayo NO Normalizado</p>	<p>Argamasa</p>
<p>15.2</p>	<p>Se lleva a cabo con 18 (6+6+6) probetas normalizadas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm de argamasa, con tres proporciones diferentes en su composición: 1:2, 1:3 y 1:4 (cal/arena)</p>	<p>Ensayo NO Normalizado</p>	<p>Argamasa</p>

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

E-15.3	Se lleva a cabo con dos tipos de ladrillo, el de tejar tipo "La Operaria", y los fabricados por extrusión tipo "Santoveña"	Ensayo NO Normalizado	Ladrillo
<b>Ensayo 16</b> 16.1	El objetivo de este ensayo era observar y comparar simultáneamente como es la velocidad de ascensión del frente húmedo por capilaridad en un grupo muy heterogéneo de probetas de ladrillo y de argamasa de cal. Para el desarrollo del ensayo se colocaron todas las probetas sobre recipientes estancos con un apoyo que permitiese ser saturado de agua, de modo que la base de las probetas estuviese humedecida con unos 5 mm de profundidad de agua.	Ensayo NO Normalizado	Argamasa/ Ladrillo

### 4.3.3. DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DE ENSAYOS

En este apartado se explican y desarrollan con todo detalle los diferentes ensayos que se han llevado a cabo a lo largo de la tesis. Es el epígrafe en el que se describen los procedimientos que se han realizado en los ensayos, en el que se recogen los datos, valores e imágenes obtenidos del instrumental, se elaboran las gráficas y tablas correspondientes, y se exponen las discusiones y conclusiones deducidas de los mismos.

La forma en la que se ha organizado la exposición de cada ensayo es la siguiente.

Hay una documentación, que en el caso de ensayos realizados bajo una misma norma UNE, es común para todos ellos. Esta documentación común es la que se desarrolla en los tres primeros epígrafes:

**1. Denominación o título:** Es el nombre asignado a la Norma o Ensayo. Por ejemplo: *UNE EN 15801. Conservación del patrimonio. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad*. A los ensayos que no son desarrollados bajo normas UNE, por ser de diseño propio, se las ha asignado una denominación en consonancia con el objetivo del ensayo ideado.

**2. Objetivo del ensayo:** En este apartado se define claramente cuál es el objetivo que se persigue con la realización del ensayo. Por ejemplo, conocer la tasa inicial de agua absorbida por un material. En el caso de los ensayos realizados bajo una norma UNE, este objetivo viene claramente especificado en la norma correspondiente, en el resto de los ensayos se define lo más detallada y claramente posible cuál es el objetivo que se busca conseguir con el ensayo ideado.

**3. Procedimiento y descripción del ensayo:** En este epígrafe se describe el desarrollo del ensayo:

- Instrumental necesario
- Ecuaciones y simbología
- Descripción y preparación de las probetas
- Procedimiento operatorio

Hay otra parte de la documentación que es específica de cada ensayo, la que se describe en los siguientes cuatro apartados, y que responde a cada material o probeta distinta estudiada. Como ocurre en el caso de que se ensayen bajo una misma norma varios tipos de ladrillos. Esta documentación se desarrolla en los siguientes apartados.

**4. Descripción de las probetas:** Se describen aquí las probetas objeto del ensayo. Determinando sus características como: material, composición, dimensiones, forma, peso o procedencia.

**5. Imágenes del ensayo:** Donde se muestra una selección de las imágenes más representativas de las probetas utilizadas y del desarrollo del ensayo.

**6. Datos y expresión de resultados:** En este apartado se muestran los datos más significativos del ensayo ya que algunos de ellos han generado cantidades muy elevadas de datos; en este caso el conjunto de todos ellos es mostrado en el anexo correspondiente del volumen II de la tesis. Es frecuente en muchos casos que el dato o los datos numéricos obtenidos no son tan importantes en sí mismos como el análisis de las tendencias que apuntan tal o cual grupo de resultados y sobre todo su puesta en relación con los datos provenientes de otros materiales o de otros ensayos, lo que ocurre por ejemplo cuando se comparan entre sí los valores de la argamasa en función de la dosificación de la mezcla y se observa la relación directa entre la cantidad de cal y la cantidad de agua contenida. Se muestran de igual manera los gráficos o esquemas más interesantes del ensayo.

**7. Discusión de resultados y conclusiones:** Es este el apartado más importante del ensayo ya que es aquí donde se analizan los resultados y se deducen las conclusiones. Es importante hacer constar que muchos de estos ensayos son aún más interesantes al ser comparados entre sí.

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

### 4.3.3.1. ENSAYOS NORMALIZADOS

#### ENSAYO SEGÚN NORMA UNE-EN 772-11 SOBRE PROBETAS DE ARGAMASA Y LADRILLO

- **Ensayo 1**

- **Ensayos sobre argamasa**                      **Ensayo 1.1**
- **Ensayos sobre ladrillo**                      **Ensayo 1.2**  
   **Ensayo 1.3**  
   **Ensayo 1.4**

## ENSAYO 1

UNE-EN 772-11

### I. Denominación

Ensayo según norma UNE-EN 772-11. *Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción de agua inicial de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.*

### II. Objetivo del ensayo

Esta norma europea describe un método que permite determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad de los bloques cerámicos en hormigón de piedra natural o de machaqueo, y la tasa de absorción inicial de agua de los bloques cerámicos de arcilla cocida.

El ensayo está encaminado a determinar la cantidad de agua que es capaz de absorber la superficie de una probeta en un tiempo determinado. Concretamente para el caso de las piezas cerámicas 1 minuto. Si bien esta norma UNE está concebida para fábrica de albañilería, hormigón y piedra, tanto natural como artificial, se ha ensayado también para la argamasa por entender que el procedimiento es válido para este material y poder comparar los resultados con los de los ensayos de los ladrillos.

### III. Descripción y procedimiento del ensayo

Si el ensayo se lleva a cabo con ladrillos no es necesario manipularlos, y si son de argamasa se ejecutan las probetas según la norma UNE-EN 1015-11. Una vez acopiadas las probetas, el primer paso consiste en el secado de las mismas en estufa a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante. La masa constante se alcanza si durante el proceso de secado entre dos pesadas consecutivas realizadas con un intervalo de 24 horas, la diferencia entre las dos pesadas no supera el 0,1% del peso total de la probeta. Una vez llegado a este punto se sacan las probetas de la estufa y se dejan enfriar a temperatura ambiente, que en nuestro caso son las condiciones del laboratorio de la Escuela de Arquitectura con una temperatura entre los  $20$  y  $22^{\circ}\text{C}$  y una humedad entre 40% y 50%. Antes de proceder al mojado se toman medidas y se calcula la superficie de la cara que va a sumergirse en el agua.

A continuación se rellena un recipiente con agua y se coloca la probeta de manera que la cara denominada tabla (la de mayor dimensión de las tres que definen un ladrillo) o la mayor de las caras del prisma de argamasa, se sumerja en el agua unos  $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Para ello se colocan las probetas sobre dos varillas de vidrio. Se mide el peso de la probeta al inicio del ensayo, y transcurrido un tiempo de 60 segundos. Antes de la pesada se ha de secar cuidadosamente la probeta con el fin de eliminar el agua sobrante.

Los datos de absorción se calculan con la siguiente fórmula:

$$C_{wi,s} = m_{so,s} - m_{seco,s} / A_s t \times 10^3 \text{ [Kg/(m}^2 \times \text{min)]}$$

Donde

$C_{wi,s}$	es la tasa inicial de absorción de agua de los bloques de arcilla cocida en kilogramos por metro cuadrado minuto. [Kg/(m <sup>2</sup> x min)]
$m_{so,s}$	es la masa de la probeta después de la inmersión durante un tiempo t, en gramos (g)
$m_{seco,s}$	es la masa de la probeta después del secado, en gramos (g)
$A_s$	superficie bruta de la cara de probeta sumergida en el agua en milímetros cuadrados (mm <sup>2</sup> )
t	tiempo: 1 minuto

## ENSAYO 1

## ENSAYO 1.1

### Ensayo según norma UNE-EN 772-11

*Ensayo sobre probetas de argamasa de cal de dimensiones 40 x 40 x 160 mm, con proporciones en las mezclas de: 1:2, 1:3 y 1:4*

*Determinación de la absorción de agua por capilaridad. Tasa de absorción de agua inicial*

#### IV. Descripción de las probetas

Se realizó este ensayo con dieciocho probetas de argamasas de cal que se elaboraron siguiendo la norma UNE-EN 1015-11. Todas ellas se ejecutaron con molde normalizado, de modo que sus dimensiones fueron de 40 x 40 x 160 mm. Con el fin de poder observar la influencia que podría tener la proporción de cal en el comportamiento se realizaron tres tipos de mezclas: 1:2, 1:3 y 1:4; es decir una parte de cal por dos, tres y cuatro de arena respectivamente. De manera que había seis probetas para cada tipo de proporción en la mezcla. También se pretendía observar el comportamiento en el caso de que la argamasa estuviese hidrofugada, de modo que la mitad de cada tanda se hidrofugó, y la otra mitad no. Así que el resultado final fue de tres grupos de probetas cada uno con una proporción distinta de cal/arena, y con la mitad de las probetas de cada grupo sin tratar, y la otra mitad tratadas con producto hidrofugante.

La hidrofugación se realizó por inmersión en una cubeta de cada una de las seis caras de la probeta durante 60 segundos de modo que permitiese sumergir aproximadamente unos 5 mm del volumen de la probeta. La cara que se colocó como base por la que se producía la absorción de agua fue una de las caras laterales, por tanto la de dimensiones 40 x 160 mm.

#### V. Imágenes del ensayo y comentarios



Imagen 61. Imagen de una probeta de argamasa mientras se realiza el ensayo.

Se aprecian en las fotos las varillas de vidrio que permiten apoyar la probeta de argamasa de cal sin que ésta toque el fondo, pero permitiendo que aproximadamente unos 5 mm permanezcan sumergidos mientras dura el ensayo. Se colocan las probetas de manera que sea una de las caras laterales del prisma por la que se produce la absorción, de modo que la superficie en contacto es una base de 40x160 mm.

## VI. Datos y expresión de resultados

Nº probeta	Masa después secado	Base	Base	Alto	Superficie bruta	Tiempo	Masa después de la inmersión	Tasa inicial de absorción de agua
Símbolo	$m_{seco,s}$				$A_s$	$t_{so}$	$m_{so,s}$	$C_{wi,s}$
Unidad	gr	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	s	gr	kg/(m <sup>2</sup> x min)
Fórmula								$C_{wi,s}=10^3(m_{so,s}-m_{seco,s})/A_s t$
1	466,2	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	479,3	2,0
2	464,2	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	476,5	1,9
3	456,8	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	468,7	1,9
	<b>462,4</b>						<b>474,8</b>	<b>1,9</b>

Tabla 5. Resultados de las probetas de proporción 1:2 no hidrofugadas

Nº probeta	Masa después secado	Base	Base	Alto	Superficie bruta	Tiempo	Masa después de la inmersión	Tasa inicial de absorción de agua
Símbolo	$m_{seco,s}$				$A_s$	$t_{so}$	$m_{so,s}$	$C_{wi,s}$
Unidad	gr	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	s	gr	kg/(m <sup>2</sup> x min)
Fórmula								$C_{wi,s}=10^3(m_{so,s}-m_{seco,s})/A_s t$
4	467,1	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	467,5	0,1
5	459,7	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	459,9	0,0
6	473,6	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	473,9	0,0
	<b>466,8</b>						<b>467,1</b>	<b>0,0</b>

Tabla 6. Resultados de las probetas de proporción 1:2 hidrofugadas

Nº probeta	Masa después secado	Base	Base	Alto	Superficie bruta	Tiempo	Masa después de la inmersión	Tasa inicial de absorción de agua
Símbolo	$m_{seco,s}$				$A_s$	$t_{so}$	$m_{so,s}$	$C_{wi,s}$
Unidad	gr	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	s	gr	kg/(m <sup>2</sup> x min)
Fórmula								$C_{wi,s}=10^3(m_{so,s}-m_{seco,s})/A_s t$
7	446,7	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	453,9	1,1
8	446,4	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	453,2	1,1
9	437,4	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	445,4	1,3
	<b>443,5</b>						<b>450,8</b>	<b>1,1</b>

Tabla 7. Resultados de las probetas de proporción 1:3 no hidrofugadas

Nº probeta	Masa después secado	Base	Base	Alto	Superficie bruta	Tiempo	Masa después de la inmersión	Tasa inicial de absorción de agua
Símbolo	$m_{seco,s}$				$A_s$	$t_{so}$	$m_{so,s}$	$C_{wi,s}$
Unidad	gr	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	s	gr	kg/(m <sup>2</sup> x min)
Fórmula								$C_{wi,s}=10^3(m_{so,s}-m_{seco,s})/A_s t$
10	448,8	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	449,2	0,1
11	451,2	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	451,6	0,1
12	456,6	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	456,9	0,0
	<b>452,2</b>						<b>452,6</b>	<b>0,1</b>

Tabla 8. Resultados de las probetas de proporción 1:3 hidrofugadas

Nº probeta	Masa después secado	Base	Base	Alto	Superficie bruta	Tiempo	Masa después de la inmersión	Tasa inicial de absorción de agua
Símbolo	$m_{seco,s}$				$A_s$	$t_{so}$	$m_{so,s}$	$C_{wi,s}$
Unidad	gr	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	s	gr	kg/(m <sup>2</sup> x min)
Fórmula								$C_{wi,s}=10^3(m_{so,s}-m_{seco,s})/A_s t$
13	463,8	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	468,9	0,8
14	470,2	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	475,2	0,8
15	477,4	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	483,0	0,9
	<b>470,5</b>						<b>475,7</b>	<b>0,8</b>

Tabla 9. Resultados de las probetas de proporción 1:4 no hidrofugadas

Nº probeta	Masa después secado	Base	Base	Alto	Superficie bruta	Tiempo	Masa después de la inmersión	Tasa inicial de absorción de agua
Símbolo	$m_{seco,s}$				$A_s$	$t_{so}$	$m_{so,s}$	$C_{wi,s}$
Unidad	gr	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	s	gr	kg/(m <sup>2</sup> x min)
Fórmula								$C_{wi,s}=10^3(m_{so,s}-m_{seco,s})/A_s t$
16	477,3	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	477,6	0,0
17	466,4	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	466,8	0,1
18	475,5	160,0	40,0	40,0	6.400,0	60	476,0	0,1
	<b>473,1</b>						<b>473,5</b>	<b>0,1</b>

Tabla 10. Resultados de las probetas de proporción 1:4 hidrofugadas

Los datos que se recogen son los pesos inicial y final, tras un periodo de 60 segundos en los que la probeta está absorbiendo agua por capilaridad por una de sus caras laterales. Medimos la tasa de absorción de agua inicial en las siguientes unidades: kg/(m<sup>2</sup>xmin).

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Los valores medios que se obtienen para las probetas no hidrofugadas son los siguientes:

Proporción cal/arena 1:2	<b>1,9</b> Kg/(m <sup>2</sup> x min)
Proporción cal/arena 1:3	<b>1,1</b> Kg/(m <sup>2</sup> x min)
Proporción cal/arena 1:4	<b>0,8</b> Kg/(m <sup>2</sup> x min)

De la observación de los datos se pueden deducir varias conclusiones. Una de ellas es que existe una gran homogeneidad en los valores obtenidos para cada grupo de probetas. Apreciación que también se puede comprobar en el resto de los ensayos realizados a probetas de argamasa en otros ensayos debido a que se fabrican en laboratorio, de tres en tres a la vez y en el mismo molde, con la misma mezcla y en el mismo ambiente. Las probetas hidrofugadas muestran una elevada impermeabilidad al paso del agua en este ensayo.

Se observa una correlación entre los valores obtenidos en los ensayos y las proporciones de las mezclas. A mayor cantidad de árido, menor tasa de absorción. Desde otra perspectiva también se podría decir que, **a mayor proporción de cal, mayor tasa de absorción inicial de**

**agua**, es decir a mayor cantidad de cal en una mezcla, ésta absorberá más agua y con más rapidez, lo que en principio parece lógico. Como se irá poniendo de manifiesto a lo largo de este capítulo y, sobre todo del siguiente, estos valores van cobrando importancia cuando se ponen en comparación con datos obtenidos en otros ensayos para este mismo material y con los realizados a ladrillos y fábricas.

## ENSAYO 1

## ENSAYO 1.2

### Ensayo según norma UNE-EN 772-11

*Ensayo sobre probetas de ladrillos de tejar antiguos tipo "La Operaria"*

*Determinación de la absorción de agua por capilaridad. Tasa de absorción de agua inicial*

#### IV. Descripción de las probetas

Se realizó este ensayo con seis ladrillos de tejar antiguos. Ladrillos que tienen en torno a los 100 años de antigüedad y son de una fábrica local denominada "La Operaria", de la zona de Serrada (Valladolid). Las dimensiones de estos ladrillos presentan unas variaciones que llegan a los 10 mm entre unas piezas y otras. La media de las dimensiones de los ladrillos con los que se ha realizado el ensayo son de 279 x 140 x 48 mm, y la media de su peso en seco es de 3.180 gr. Se aprecia con claridad el proceso de elaboración manual de las piezas que presentan alabeos e irregularidades significativas propias de los procesos de fabricación con los que se realizaban estas piezas.

#### V. Imágenes del ensayo y comentarios



Imagen 62. Imágenes de ladrillos mientras se ejecuta el ensayo

Se aprecian en las fotos las varillas de vidrio que permiten apoyar el ladrillo sin que éste toque el fondo, con lo que se consigue que aproximadamente unos 5 mm permanezcan sumergidos mientras dura el ensayo. Se colocan los ladrillos de manera que la cara por la

que se produce la absorción sea la que en el proceso de elaboración manual está apoyada en el terreno durante su fase de secado, y que normalmente era como se solían colocar los ladrillos al ejecutar las hiladas. Y la cara que el artesano refrenta con una tabla o con sus propias manos es la que queda hacia arriba.

## VI. Datos y expresión de resultados

Nº probeta	Masa después secado	Largo (soga)	Ancho (tizón)	Superficie bruta	Tiempo	Masa después de la inmersión	Tasa inicial de absorción de agua
Símbolo	$m_{seco,s}$			$A_s$	$t_{so}$	$m_{so,s}$	$C_{wi,s}$
Unidad	gr	mm	mm	mm <sup>2</sup>	s	gr	kg/(m <sup>2</sup> x min)
Fórmula							$C_{wi,s}=10^3(m_{so,s} - m_{seco,s})/A_s t$
1	3.206,4	280,0	143,0	40.040,0	60	3.296,7	2,3
2	3.085,2	279,0	139,0	38.781,0	60	3.135,2	1,3
3	3.154,2	273,7	135,0	36.949,5	60	3.193,0	1,1
4	3.354,8	280,3	140,7	39.438,2	60	3.430,0	1,9
5	3.086,2	283,4	141,5	40.101,1	60	3.145,0	1,5
6	3.192,2	277,2	138,8	38.475,4	60	3.255,2	1,6
	<b>3.179,8</b>	<b>278,9</b>	<b>139,7</b>	<b>38.964,2</b>		<b>3.242,5</b>	<b>1,6</b>

Tabla 11. Resultados de las probetas de ladrillo rústico de tejar tipo "La Operaria"

Los datos que se recogen son los pesos inicial y final, tras un periodo de 60 segundos en los que la probeta está absorbiendo agua por capilaridad por la cara denominada tabla. Los valores que se han obtenido son los que se muestran en la tabla adjunta.

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

El valor medio que se obtiene es de **1,6** Kg/(m<sup>2</sup> x min). Hay que hacer mención a que esta norma no incluye a este material dentro de los elegidos para ser analizados, pero entendemos que aporta información interesante, como se ha comentado, si es comparado con otros. Para entender mejor la relevancia de este dato, ver apartado 5.2 en la discusión de resultados final.

Aunque los valores obtenidos son bastante próximos entre sí, como era de esperar hay una cierta dispersión entre ellos debido a los procesos propios de producción que ya se han expuesto en el apartado 3.1. Esta dispersión de resultados propia de este tipo de ladrillos se puede apreciar igualmente en otros ensayos.

**ENSAYO 1**

**ENSAYO 1.3**

**Ensayo según norma UNE-EN 772-11**

*Ensayo sobre probetas de ladrillos de fabricación moderna por extrusión tipo Santoveña*

*Determinación de la absorción de agua por capilaridad. Tasa de absorción de agua inicial*

**IV. Descripción de las probetas**

Se realizó este ensayo con seis ladrillos macizos fabricados por extrusión, que imitan el acabado rústico. Al estar elaborados con un sistema mecanizado esto les diferencia claramente de los ladrillos de tejar del ensayo anterior. Proviene de una empresa de Santander, de la cerámica Santoveña. Sus dimensiones medias son de 240 x 107 x 38 mm, y un peso que está en torno a los 1.800 gr.

En este caso no hay forma de diferenciar, como ocurría en el caso de los ladrillos de tejar antiguos, una tabla de la otra.

**V. Imágenes del ensayo**



**Imagen 63. Imágenes de ladrillos mientras se ejecuta el ensayo**

Como en los otros ensayos, se aprecian en las fotos las varillas de vidrio que permiten apoyar el ladrillo sin que éste toque el fondo.

## VI. Datos y expresión de resultados

Nº probeta	Masa después secado	Largo (soga)	Ancho (tizón)	Superficie bruta	Tiempo	Masa después de la inmersión	Tasa inicial de absorción de agua
Símbolo	$m_{\text{seco},s}$			$A_s$	$t_{so}$	$m_{so,s}$	$C_{wi,s}$
Unidad	gr	mm	mm	mm <sup>2</sup>	s	gr	kg/(m <sup>2</sup> x min)
Fórmula							$C_{wi,s}=10^3(m_{so,s} - m_{\text{seco},s})/A_s t$
1	1.754,8	238,0	106,0	25.228,0	60	1.776,2	0,8
2	1.741,8	242,0	106,0	25.652,0	60	1.768,3	1,0
3	1.767,6	238,0	107,0	25.466,0	60	1.797,4	1,2
4	1.826,2	241,0	108,0	26.028,0	60	1.852,8	1,0
5	1.771,0	240,0	106,0	25.440,0	60	1.791,5	0,8
6	1.791,7	240,0	106,0	25.440,0	60	1.807,3	0,6
	<b>1.775,5</b>	<b>239,8</b>	<b>106,5</b>	<b>25.542,3</b>		<b>1.798,9</b>	<b>0,9</b>

Tabla 12. Resultados de las probetas de ladrillo de ejecución moderna fabricados por extrusión tipo "Santoveña"

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

El valor medio que se obtiene es de **0,9** Kg/(m<sup>2</sup> x min). Mucho más bajo, casi la mitad, que el obtenido para los ladrillos de tejar. Es decir que el proceso de absorción de estos ladrillos es mucho más lento que en los ladrillos de tejar antiguos. Este dato, como se puede observar, es poco significativo si no se compara con resultados obtenidos en otros ensayos.

Los valores son bastante homogéneos entre sí con una cierta dispersión a diferencia de lo que ocurría con los ladrillos de tejar del ensayo anterior. Lo cual era previsible, ya que la elaboración de estos ladrillos está mucho más sistematizada, mecanizada y sujeta a un control de calidad.

## ENSAYO 1

## ENSAYO 1.4

### Ensayo según norma UNE-EN 772-11

*Ensayo sobre probetas de ladrillos de tejar antiguos  
de recuperación de derribo de edificio histórico de Valladolid*

*Determinación de la absorción de agua por  
capilaridad. Tasa de absorción de agua inicial*

#### IV. Descripción de las probetas

El ensayo se realiza con seis ladrillos de tejar antiguos recogidos del derribo de un edificio en el centro de Valladolid. Sus dimensiones medias son de 268 x 131 x 41 mm, y su peso medio es de 2.697 gr. Aunque también son ladrillos de tejar son diferentes de los otros ensayados.

Se hace este ensayo con el fin de comparar si los valores obtenidos entre ladrillos de tejar de apariencia exterior similar pero sensiblemente distintos y recogidos de entornos geográficos relativamente cercanos están o no dentro de un rango similar de resultados.

#### V. Imágenes del ensayo



Imagen 64. Imágenes de ladrillos mientras se ejecuta el ensayo

## VI. Datos y expresión de resultados

Nº probeta	Masa después secado	Largo (soga)	Ancho (tizón)	Superficie bruta	Tiempo	Masa después de la inmersión	Tasa inicial de absorción de agua
Símbolo	$m_{\text{seco,s}}$			$A_s$	$t_{\text{so}}$	$m_{\text{so,s}}$	$C_{\text{wi,s}}$
Unidad	gr	mm	mm	mm <sup>2</sup>	s	gr	kg/(m <sup>2</sup> x min)
Fórmula							$C_{\text{wi,s}}=10^3 (m_{\text{so,s}} - m_{\text{seco,s}})/A_s t$
1	2.662,2	268,5	132,0	35.442,0	60	2.725,4	1,8
2	2.806,0	267,0	131,5	35.110,5	60	2.869,6	1,8
3	2.791,5	267,5	133,0	35.577,5	60	2.855,6	1,8
4	2.600,4	269,0	129,5	34.835,5	60	2.661,7	1,8
5	2.664,4	267,5	129,0	34.507,5	60	2.727,2	1,8
6	2.657,1	267,0	131,0	34.977,0	60	2.717,2	1,7
	<b>2.696,9</b>	<b>267,8</b>	<b>131,0</b>	<b>35.075,0</b>		<b>2.759,5</b>	<b>1,8</b>

Tabla 13. Resultados de las probetas de ladrillo de tejar

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

El valor medio que se obtiene es de **1,8** Kg/(m<sup>2</sup> x min). Ligeramente más alto, pero muy similar, al obtenido por los ladrillos de tejar de "La Operaria", que era de **1,6** Kg/(m<sup>2</sup> x min) y un poco más del doble, que el de los ladrillos de Santoveña con una tasa de **0,9** Kg/(m<sup>2</sup> x min). Es decir que el proceso de absorción de estos ladrillos, al igual que pasa con los de "La Operaria", es mucho más rápido que en los ladrillos modernos de Santoveña. Como en los casos anteriores, este dato es poco significativo si no se compara este valor con resultados obtenidos en otros ensayos. Se puede deducir de estos ensayos que, aun siendo este tipo de ladrillos productos elaborados con procesos manuales, los valores de absorción están todos en un rango relativamente próximo.

## **ENSAYO SEGÚN NORMA UNE-EN 772-7 SOBRE PROBETAS DE LADRILLO**

- **Ensayo 2**

- **Ensayos sobre ladrillo**

- Ensayo 2.1**

- Ensayo 2.2**

- Ensayo 2.3**

## ENSAYO 2

UNE-EN 772-7

### I. Denominación

Ensayo según norma UNE-EN 772-7. *Determinación de la absorción de agua por inmersión en agua hirviendo de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería que sirven de barrera al agua por capilaridad.*

### II. Objetivo del ensayo

Esta norma europea especifica el método para determinar la absorción de agua de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería que sirven de barrera antihumedad, por inmersión de las probetas en agua hirviendo por un tiempo determinado.

Con este ensayo se puede saber el contenido de agua que es capaz de absorber una probeta y qué porcentaje, en tanto por ciento, supone de incremento respecto del peso inicial de la probeta.

### III. Descripción y procedimiento del ensayo

El primer paso consiste en el secado de las probetas en estufa a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante. La masa constante se alcanza si durante el proceso de secado entre dos pesadas consecutivas realizadas con un intervalo de 24 horas, la diferencia entre las dos pesadas no supera el 0,2% del peso total de la probeta. Una vez llegado a este punto se sacan las probetas de la estufa y se dejan enfriar a temperatura ambiente. Antes de proceder a su inmersión para el siguiente paso se ha de secar la probeta.

A continuación se introduce la probeta en un recipiente que pueda poner el agua en ebullición. Una vez sumergida se pone a calentar durante una hora hasta que llegue al punto de ebullición, donde se deja durante 5 horas en ese estado. Luego se apaga el sistema de calentamiento, de modo que la temperatura vaya descendiendo paulatinamente durante un periodo de al menos 16 horas hasta que el agua se ponga a temperatura ambiente. Para finalizar se saca la probeta, se la deja reposar 2 minutos fuera del agua, se la seca y se procede a su pesado.

La absorción de agua  $W_s$ , de cada probeta, es el aumento de masa de la probeta en estado saturado con relación a su masa en estado seco. Este valor se ha de calcular con una exactitud de 0,1%. Los datos de absorción se calculan con la siguiente fórmula:

$$W_s = (m_s - m_d)/m_d \times 100\%$$

Donde:

$W_s$	es la absorción de agua de la probeta [%]
$m_s$	es la masa de la probeta en estado saturado (g)
$m_d$	es la masa de la probeta en estado seco (g)

## ENSAYO 2

## ENSAYO 2.1

### Ensayo según norma UNE-EN 772-7

*Ensayo sobre probetas de ladrillos de tejar antiguos tipo "La Operaria"*

*Determinación de la absorción de agua por inmersión en agua hirviendo*

#### IV. Descripción de las probetas

Se realizó este ensayo con seis ladrillos macizos antiguos de elaboración manual, los denominados a lo largo de este trabajo como los de "La Operaria".

#### V. Imágenes del ensayo



**Imagen 65. Imágenes de un ladrillo mientras se ejecuta el ensayo y del instrumental utilizado**

Se aprecia en la fotografía, como la pieza cerámica queda totalmente sumergida en el agua hirviendo.

#### VI. Datos y expresión de resultados

Los datos que se recogen son los pesos inicial y final, tras un periodo de 5 horas en el que las probetas están sumergidas totalmente en agua hirviendo. El dato que se obtiene nos da idea de la cantidad de agua en porcentaje, respecto al peso inicial de la probeta, que es capaz de absorber una probeta de ladrillo.

Nº probeta	Masa en estado seco	Masa en estado saturado	Absorción de agua
Símbolo	$m_d$	$m_s$	$W_s$
Unidad	gr	gr	%
Fórmula			$W_s = 100\% \times (m_s - m_d) / m_d$
1	3.206,4	3.817,3	19,1%
2	3.085,2	3.630,9	17,7%
3	2.691,9	3.177,1	18,0%
4	3.355,3	3.934,5	17,3%
5	3.086,2	3.686,3	19,4%
6	3.194,7	3.792,1	18,7%
	<b>3.103,3</b>	<b>3.673,0</b>	<b>18,4%</b>

Tabla 14. Resultados de las probetas de ladrillo de tejar tipo "La Operaria"

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

El valor medio que se obtiene es de **18,4 %**. Este dato, tal y como se ha explicado en otros ensayos, es poco significativo si no se compara con otros resultados obtenidos. Si calculamos la cantidad de agua que supone este dato por volumen de ladrillo, se obtiene un resultado en torno a los **310** litros de agua por m<sup>3</sup> de ladrillo, lo cual es un valor muy elevado y sensiblemente superior al obtenido en el ensayo UNE 67027-84 por inmersión en agua fría que es de **17,2 %**, con un contenido de agua en torno a los **290** litros de agua por m<sup>3</sup>, lo cual parece coherente. El valor obtenido de este ensayo es interesante pero un tanto irrelevante, ya que es una situación a la que nunca va a estar sometida la pieza.

Los valores son relativamente próximos entre sí con una ligera dispersión entre los resultados.

## ENSAYO 2

## ENSAYO 2.2

### Ensayo según norma UNE-EN 772-7

*Ensayo sobre probetas de ladrillos de ejecución moderna por extrusión tipo Santoveña*

*Determinación de la absorción de agua por inmersión en agua hirviendo*

#### IV. Descripción de las probetas

Se realizó este ensayo con seis ladrillos macizos modernos elaborados por proceso de extrusión, los que se han denominado a lo largo de este documento como tipo Santoveña.

#### V. Imágenes del ensayo



Imagen 66. Imágenes de los ladrillos mientras se ejecuta el ensayo

#### VI. Datos y expresión de resultados

Los datos que se recogen son los pesos inicial y final, tras un periodo de 5 horas en el que las probetas están sumergidas totalmente en agua hirviendo. El dato que obtenemos nos da idea de la cantidad de agua en porcentaje, respecto al peso inicial de la probeta, que es capaz de absorber una probeta de ladrillo según la fórmula:  $((m_s - m_d) / m_d) \times 100 \%$ . Siendo  $m_s$  la masa de la probeta en estado saturado, y  $m_d$  la masa de la probeta en estado seco.

Nº probeta	Masa en estado seco	Masa en estado saturado	Absorción de agua
Símbolo	$m_d$	$m_s$	$W_s$
Unidad	gr	gr	%
Fórmula			$W_s=100\% \times (m_s - m_d)/m_d$
1	1.756,2	2.008,2	14,3%
2	1.742,8	1.999,8	14,7%
3	1.767,5	2.023,6	14,5%
4	1.827,3	2.090,2	14,4%
5	1.770,8	2.027,7	14,5%
6	1.789,4	2.030,1	13,5%
	<b>1.775,7</b>	<b>2.029,9</b>	<b>14,3%</b>

Tabla 15. Resultados de las probetas de ladrillo extrusionado tipo "Santoveña"

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

El valor medio que se obtiene es de **14,3 %**, sensiblemente más bajo que el obtenido para los ladrillos de tejar, **18,4 %**, es decir que la capacidad de absorción de agua de los ladrillos ensayados es menor que la que tienen los de tejar antiguos como ya se pudo comprobar en el ensayo según la norma UNE 67027-84 de inmersión en agua fría. Si calculamos la cantidad de agua que supone este dato por volumen de ladrillo, se obtiene un resultado en torno a los **275** litros de agua por m<sup>3</sup> de ladrillo, algo inferior al valor obtenido para los ladrillos de tejar.

Los valores casi no tienen dispersión a diferencia de lo que ocurría con los ladrillos de tejar lo cual era previsible, ya que la elaboración de estos ladrillos está más sistematizada y mecanizada.

## ENSAYO 2

## ENSAYO 2.3

### Ensayo según norma UNE-EN 772-7

*Ensayo sobre probetas de ladrillos de tejar  
de recuperación de edificio antiguo de Valladolid*

*Determinación de la absorción de agua por  
inmersión en agua hirviendo*

#### IV. Descripción de las probetas

Se realizó este ensayo con seis ladrillos macizos de tejar procedentes del derribo de un edificio histórico de la ciudad de Valladolid. Las dimensiones y pesos se muestran en el cuadro correspondiente.

#### V. Imágenes del ensayo



Imagen 67. Imagen de uno de los ladrillos mientras se inicia el ensayo

Se aprecia en la fotografía, como la pieza cerámica queda totalmente sumergida en el agua.

#### VI. Datos y expresión de resultados

Los datos que se recogen son los pesos inicial y final, tras un periodo de 5 horas en el que las probetas están sumergidas totalmente en agua hirviendo.

Nº probeta	Masa en estado seco	Masa en estado saturado	Absorción de agua
Símbolo	$m_d$	$m_s$	$W_s$
Unidad	gr	gr	%
Fórmula			$W_s=100\% \times (m_s - m_d)/m_d$
1	2.662,2	3.083,7	15,8%
2	2.806,0	3.144,1	12,0%
3	2.791,5	3.256,0	16,6%
4	2.600,4	3.007,0	15,6%
5	2.664,4	3.101,1	16,4%
6	2.657,1	3.074,0	15,7%
	<b>2.696,9</b>	<b>3.111,0</b>	<b>15,4%</b>

Tabla 16. Resultados de las probetas de ladrillo extrusionado tipo "Santoveña"

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

El valor medio que se obtiene es de **15,4 %**. Sensiblemente más alto que el obtenido para los ladrillos tipo Santoveña con un valor medio de **14,3 %**.

A diferencia de lo que ocurría con los ladrillos de tejar del ensayo 2.2, cuyo valor medio fue de **18,4 %**, los valores de este ensayo son muy cercanos entre sí con muy poca dispersión, a excepción de una de las seis piezas, cuyo valor es ligeramente inferior. No se desecha el resultado por no estar excesivamente alejado.

## **ENSAYO SEGÚN NORMA UNE-EN 15801 SOBRE PROBETAS DE ARGAMASA Y LADRILLO**

- **Ensayo 3**
  - **Ensayos sobre argamasa**                      **Ensayo 3.1**
  - **Ensayos sobre ladrillo**                      **Ensayo 3.2**

## ENSAYO 3

UNE-EN 15801

### I. Denominación

Ensayo según norma UNE-EN 15801. Conservación del Patrimonio Cultural. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad..

### II. Objetivo del ensayo

Esta norma europea especifica un método para determinar la absorción de agua por capilaridad de los materiales inorgánicos porosos utilizados en el patrimonio cultural y que constituyen bienes culturales. Este método se puede aplicar tanto en materiales inorgánicos porosos no tratados como a los sometidos a cualquier tratamiento o a envejecimiento

El objetivo de este ensayo es el determinar la cantidad y la velocidad a la que una probeta absorbe agua por capilaridad a través de la superficie de ensayo cuando está en contacto con agua.

### III. Descripción y procedimiento del ensayo

El primer paso consiste en colocar un lecho permeable seco (de 5 mm como mínimo de espesor) en el fondo del recipiente, posteriormente se le añade agua hasta que el lecho permeable se sature y se mantienen constante este nivel de agua durante todo el ensayo. Una vez se alcanza la masa constante de las probetas mediante el secado en estufa, se realizan las mediciones de la probeta ( $m_0$ ) y seguidamente se coloca en el recipiente con la superficie bajo ensayo sobre el lecho del soporte, y se inicia el cronometro.

A continuación, se saca la probeta, con un paño húmedo se le retira el agua adherida a la superficie y se pesa. Para medir la absorción de agua los intervalos de tiempo entre pesadas dependen de la velocidad de absorción, aunque las primeras deben efectuarse entre intervalos de tiempo muy cortos. El ensayo finaliza cuando se consigue que la diferencia de peso, entre dos pesadas consecutivas (24 h), no es superior al 1% de la masa de agua absorbida por la probeta. En el caso de no alcanzar este resultado el ensayo finaliza a los 8 días.

La cantidad de agua absorbida por la probeta por unidad de superficie  $Q_i$  ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ ) en el tiempo  $t_i$  (s) se determina con la siguiente fórmula:  $Q_i = ((m_i - m_o)/A)$

Para determinar la curva de absorción de agua por capilaridad, los valores de  $Q_i$  se representan en un gráfico como una función de la raíz cuadrada del tiempo ( $t_i^{1/2}$ ).

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad (AC) es la pendiente de la parte lineal de la curva obtenida representando la variación de masa por unidad de superficie ( $Q_i$ ) en función de la raíz cuadrada del tiempo ( $t^{1/2}$ ), y se calcula por regresión lineal, empleando para ello al menos 5 puntos alineados y consecutivos.

*$m_o$ : masa de la probeta en seco, en Kg.*

*$m_i$ : masa de la probeta en el tiempo  $t_i$ , en Kg.*

*A: superficie de la probeta en contacto con el agua,  $\text{m}^2$ .*

*$t_i$ : tiempo transcurrido desde el comienzo del ensayo, en s.*

*$Q_i$ : cantidad de agua absorbida por unidad de superficie, en  $\text{Kg}/\text{m}^2$ .*

*AC: coeficiente de absorción de agua por capilaridad, en  $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{1/2})$ .*

*$H_i$ : altura del frente de empapamiento, en cm.*

*B: coeficiente de penetración de agua por capilaridad, en  $\text{cm}/\text{s}^{1/2}$ .*

## ENSAYO 3

## ENSAYO 3.1

### Ensayo según norma UNE-EN 15801

*Ensayo sobre probetas de argamasa,  
con diferentes proporciones 1:2, 1:3 y 1:4*

*Determinación de la absorción de agua por  
capilaridad*

#### IV. Descripción de las probetas

Se llevó a cabo este ensayo sobre 45 probetas de argamasa de cal de dimensiones normalizadas 40 x 40 x 40 mm y 40 x 40 x 160 mm, con tres proporciones diferentes en su composición: 1:2, 1:3 y 1:4 (cal/arena), que se someten al proceso de mojado descrito en la norma. Se ensayaron por lo tanto tres grupos, cada grupo de 15 probetas se componía de 12 cubos y de 3 probetas prismáticas de 160 mm de altura, y cada grupo tenía una proporción de mezcla diferente.

#### V. Imágenes del ensayo

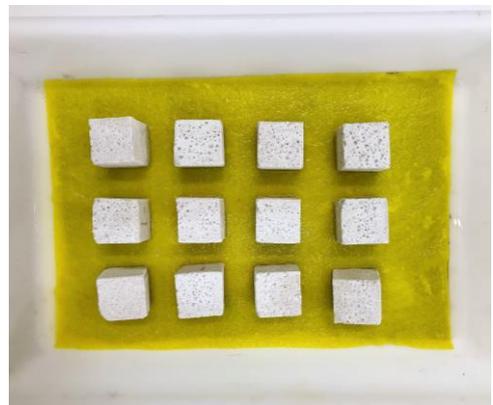


Imagen 68. Imágenes de las probetas durante la ejecución de los ensayos

## VI. Datos y expresión de resultados

En las tablas que a continuación se adjuntan, se representan los valores medios con la cantidad de agua absorbida según cada grupo de probetas en función de la proporción de la mezcla.

La tabla 17 muestra los valores de absorción  $Q_i$  (cantidad de agua absorbida por la probeta por unidad de superficie) de las probetas cúbicas de argamasa de cal de dimensiones 40 x 40 x 40 mm según la proporción de la mezcla. Cada valor es la media de las 9 probetas cúbicas ensayadas.

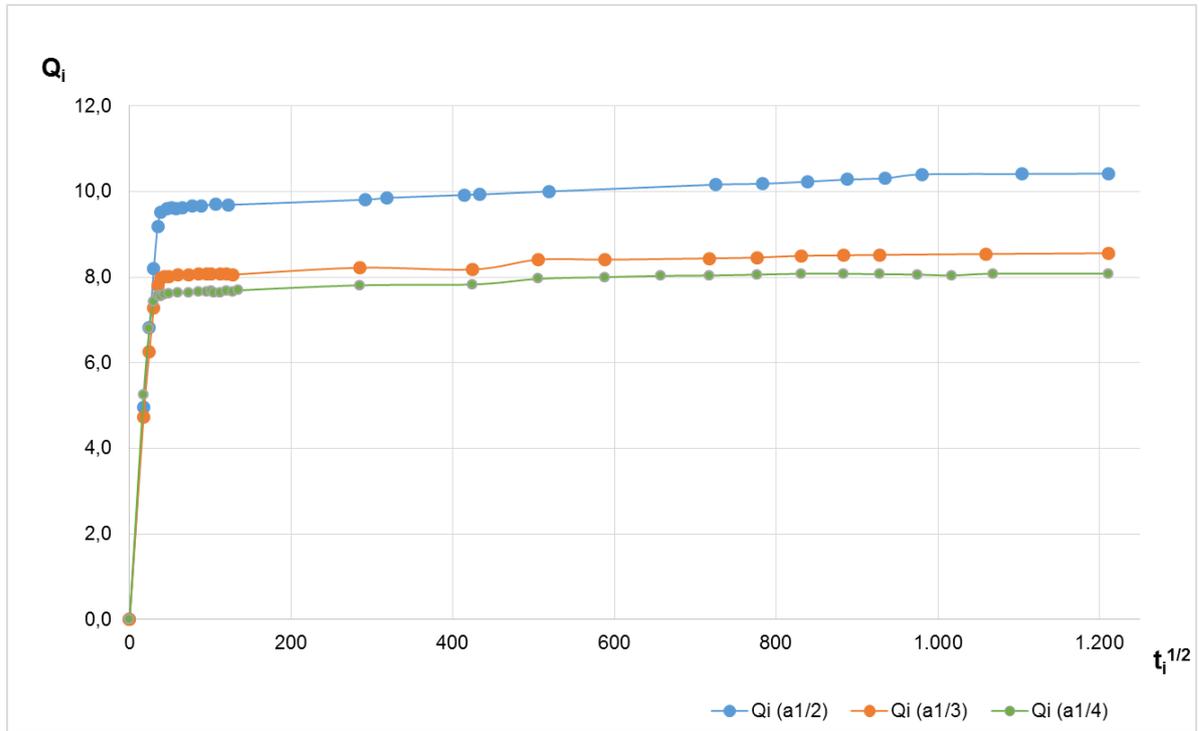
sg	sg	Cubos argamasa 1/2	Cubos argamasa 1/3	Cubos argamasa 1/4					
Total	Total	[(mi-m0)/A]	[(mi-m0)/A]	[(mi-m0)/A]					
$t_i$	$t_i^{1/2}$	$Q_i (a1/2)$	$Q_i (a1/3)$	$Q_i (a1/4)$					
0	0	0,0	0,0	0,0	85.200	292	9,8		
300	17	5,0	4,7	5,3	101.400	318	9,9		
600	24	6,8	6,3	6,8	171.600	414	9,9		
900	30	8,2	7,3	7,4	180.000	424		8,2	7,8
1.200	35	9,2	7,8	7,6	187.800	433	9,9		
1.500	39	9,5	8,0	7,6	190.800	437			
1.800	42		8,0	7,6	255.600	506		8,4	8,0
2.100	46	9,6			268.800	518	10,0		
2.400	49		8,0	7,6	345.600	588		8,4	8,0
2.700	52	9,6			432.000	657			8,0
3.300	57	9,6			514.800	717		8,4	8,0
3.600	60		8,1	7,6	526.200	725	10,2		
4.200	65	9,6			603.000	777		8,5	8,1
5.400	73		8,1	7,6	612.600	783	10,2		
6.000	77	9,7			689.400	830		8,5	8,1
7.200	85		8,1	7,7	702.600	838	10,2		
7.800	88	9,7			779.400	883		8,5	8,1
9.000	95		8,1	7,7	787.200	887	10,3		
10.080	100		8,1	7,7	860.400	928		8,5	8,1
10.800	104			7,6	873.600	935	10,3		
11.400	107	9,7			948.600	974			8,1
12.600	112		8,1	7,6	960.000	980	10,4		
14.400	120		8,1	7,7	1.033.200	1.016			8,0
15.000	122	9,7			1.121.400	1.059		8,5	
16.200	127		8,1	7,7	1.141.200	1.068			8,1
18.000	134			7,7	1.219.200	1.104	10,4		
81.000	285		8,2	7,8	1.465.200	1.210	10,4	8,6	8,1
					<b>Absorción agua l/m<sup>3</sup></b>		<b>249,1</b>	<b>213,0</b>	<b>198,8</b>
					<b>Absorción kg/kg</b>		<b>14,1%</b>	<b>12,1%</b>	<b>11,5%</b>

Tabla 17. Valores de  $Q_i$  de las probetas cúbicas de argamasa de 40 x 40 x 40 mm.

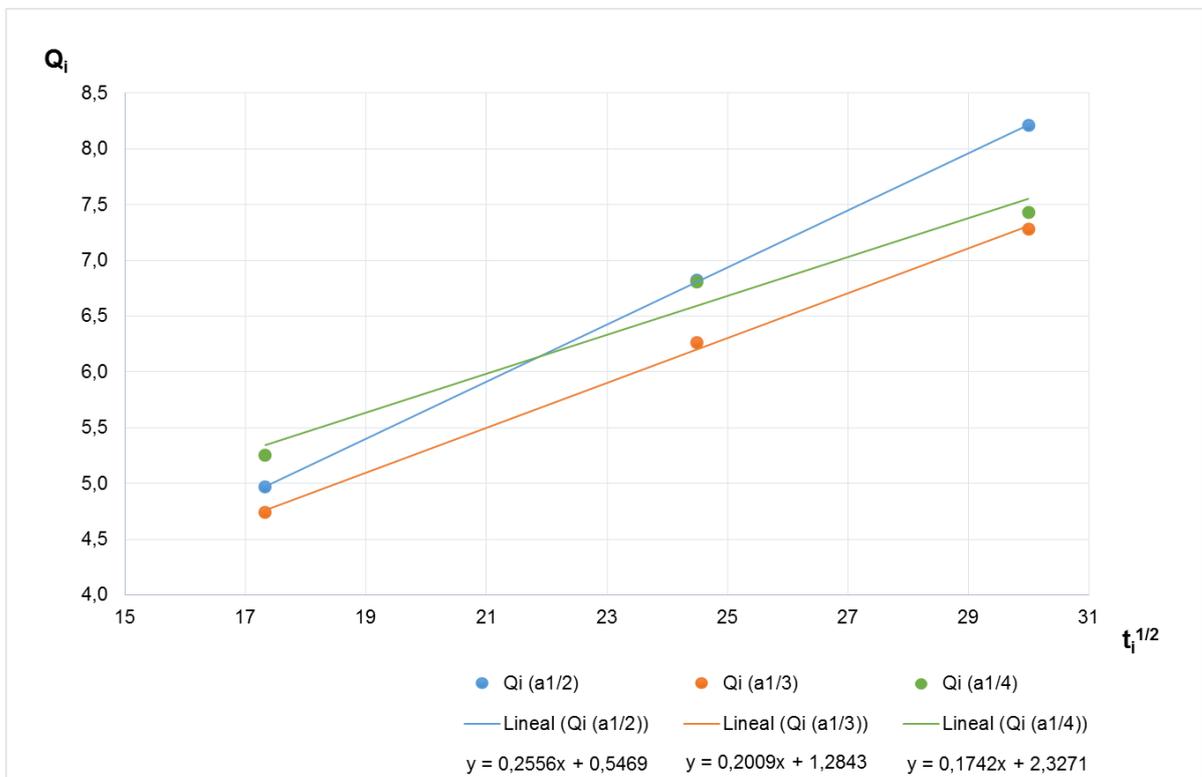
Tabla de valores medios obtenidos de cada grupo de 9 probetas.

La gráfica 1 muestra la curva de absorción de agua por capilaridad, donde se reflejan los valores de  $Q_i$  en función de la raíz cuadrada del tiempo ( $t_i^{1/2}$ ). La gráfica 2 representa el coeficiente de absorción de agua por capilaridad (AC) que es la pendiente de la parte lineal de la curva obtenida representando la variación de masa por unidad de superficie ( $Q_i$ ) en función de la raíz cuadrada del tiempo ( $t_i^{1/2}$ ) y que calculamos por regresión lineal. Deberíamos utilizar al menos 5 puntos alineados pero, en el caso que nos atañe que es el de

las probetas cúbicas, sólo se han podido utilizar tres. Las gráficas mencionadas se basan en los valores mostrados en la tabla 17.



**Gráfica 1. Representa la curva de absorción de agua por capilaridad de las probetas cúbicas de 40 x 40 x 40 mm. El eje horizontal es el tiempo  $t_i^{1/2}$ . El eje vertical el valor de  $Q_i$**



**Gráfica 2. Ampliación de la gráfica en la zona de inicio del ensayo. El valor que multiplica a la "x" es el coeficiente de absorción de agua por capilaridad, el valor de la pendiente**

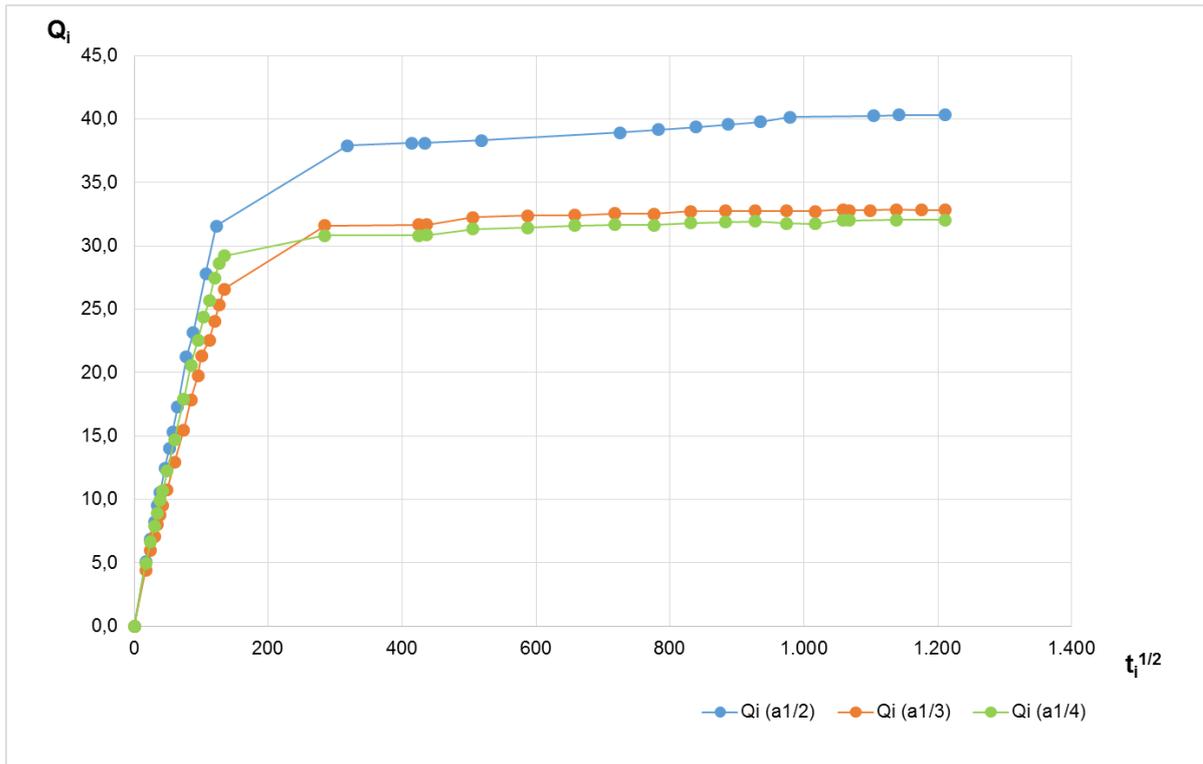
La tabla 18 muestra los valores de absorción  $Q_i$  (cantidad de agua absorbida por la probeta por unidad de superficie) de las probetas prismáticas de argamasa de cal de dimensiones 40 x 40 x 160 mm según la proporción de la mezcla. Cada valor es la media de las 3 probetas prismáticas ensayadas.

sg	sg	Prismas argamasa 1/2	Prismas argamasa 1/3	Prismas argamasa 1/4					
Total	Total	[(mi-m0)/A]	[(mi-m0)/A]	[(mi-m0)/A]					
$t_i$	$t_i^{1/2}$	$Q_i$ (a1/2)	$Q_i$ (a1/3)	$Q_i$ (a1/4)					
0	0	0,0	0,0	0,0	171.600	414	38,1		
300	17	5,1	4,4	5,0	180.000	424		31,7	30,8
600	24	6,9	6,0	6,7	187.800	433	38,1		
900	30	8,3	7,1	7,9	190.800	437		31,7	30,8
1.200	35	9,5	8,0	8,9	255.600	506		32,3	31,3
1.500	39	10,6	8,8	9,9	268.800	518	38,3		
1.800	42		9,5	10,7	345.600	588		32,4	31,4
2.100	46	12,5			432.000	657		32,4	31,6
2.400	49		10,8	12,3	514.800	717		32,6	31,7
2.700	52	14,0			526.200	725	38,9		
3.300	57	15,4			603.000	777		32,5	31,6
3.600	60		12,9	14,7	612.600	783	39,2		
4.200	65	17,3			689.400	830		32,7	31,8
5.400	73		15,5	17,9	702.600	838	39,4		
6.000	77	21,3			779.400	883		32,8	31,9
7.200	85		17,9	20,6	787.200	887	39,6		
7.800	88	23,2			860.400	928		32,8	31,9
9.000	95		19,8	22,6	873.600	935	39,8		
10.080	100		21,3		948.600	974		32,8	31,8
10.800	104			24,4	960.000	980	40,2		
11.400	107	27,8			1.033.200	1.016		32,7	31,8
12.600	112		22,5	25,7	1.121.400	1.059		32,9	32,1
14.400	120		24,1	27,5	1.141.200	1.068		32,8	32,0
15.000	122	31,6			1.207.800	1.099		32,8	
16.200	127		25,4	28,6	1.219.200	1.104	40,3		
18.000	134		26,6	29,2	1.294.200	1.138		32,9	32,0
81.000	285		31,6	30,8	1.305.600	1.143	40,3		
85.200	292				1.382.400	1.176		32,8	
101.400	318	37,9			1.465.200	1.210	40,4	32,8	32,1
					<b>Absorción agua l/m<sup>3</sup></b>		<b>255,2</b>	<b>207,0</b>	<b>202,0</b>
					<b>Absorción kg/kg</b>		<b>14,2%</b>	<b>11,5%</b>	<b>11,3%</b>

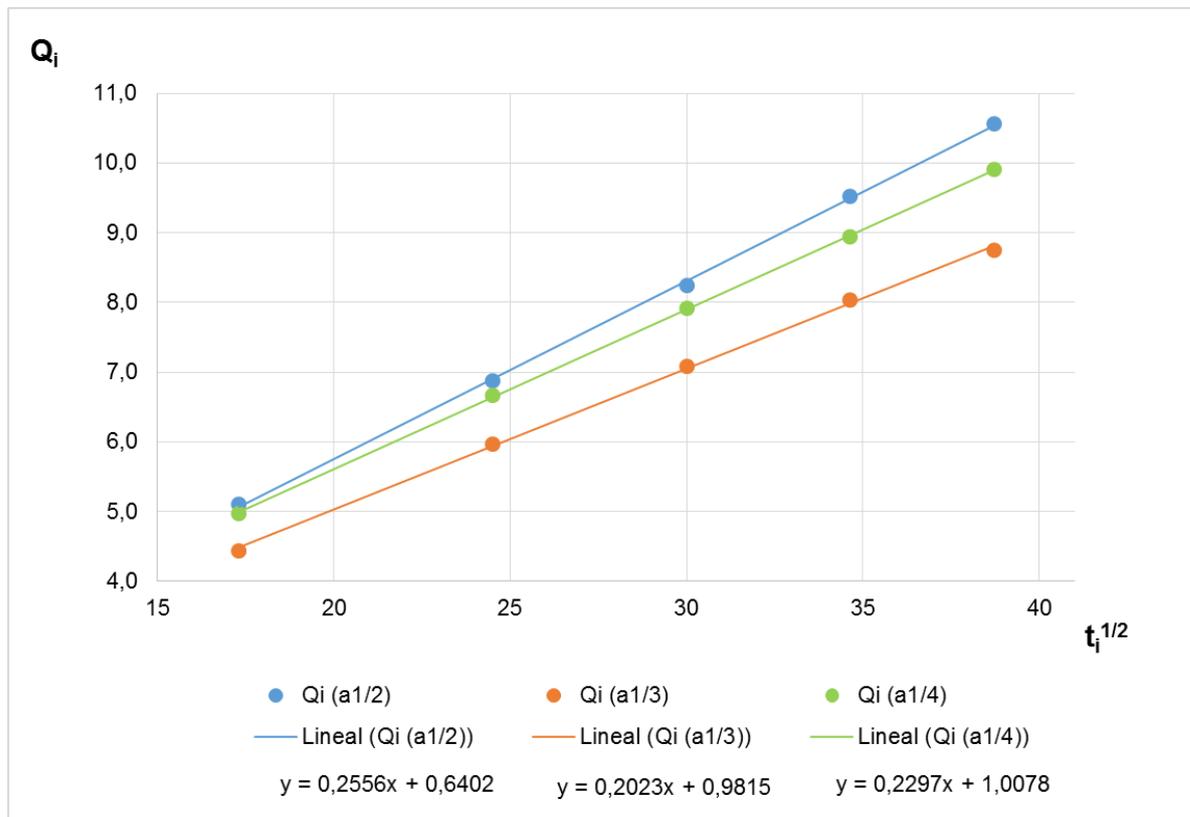
Tabla 18. Valores de  $Q_i$  de las probetas cúbicas de argamasa de 40 x 40 x 160 mm.  
Tabla de valores medios obtenidos de cada grupo de 3 probetas.

A continuación se representan las gráficas correspondientes a las probetas prismáticas, que muestran en líneas los valores de la tabla 18. La gráfica 3 muestra la curva de absorción de agua por capilaridad y la gráfica 4 representa el coeficiente de absorción de agua por capilaridad (AC) que es la pendiente de la parte lineal. En este caso si que se han utilizado al menos 5 puntos alineados como describe la norma.

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO



Gráfica 3. Representa la curva de absorción de agua por capilaridad de las probetas prismáticas de 40x40x160 mm  
El eje horizontal es el tiempo  $t_i^{1/2}$ . El eje vertical el valor de  $Q_i$



Gráfica 4. Ampliación de la gráfica en la zona de inicio del ensayo.

El valor que multiplica a la "x" es el coeficiente de absorción de agua por capilaridad, el valor de la pendiente.

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

A la vista de lo que muestran las gráficas se puede afirmar que **el inicio de las gráficas es prácticamente similar, principalmente cuando las probetas son cúbicas, para los tres tipos de proporciones**. Diferenciándose ligeramente, una vez pasados los momentos iniciales del ensayo, la tendencia de la línea que representa el comportamiento de las probetas con mezcla 1:2. Es decir la mezcla influye muy poco en las primeras fases de la absorción de agua. En las gráficas 1 y 3 se puede observar un comportamiento muy similar para los tres grupos de probetas, las que tienen proporciones 1/3 y 1/4 van muy cercanas en ambas gráficas estando siempre la 1/2 un poco más alejada de ellas sobre todo cuando se acaba la fase inicial lineal y comienza la zona curva.

En las gráficas ampliadas se puede comprobar como **la pendiente**, el valor "AC" que define la norma, es muy similar para todos los tipos de probetas, con pequeñas variaciones que apenas van a influir en el comportamiento de la humedad en la argamasa. Hay que señalar que la norma obliga a que la regresión lineal se haga siempre con al menos 5 puntos, lo que así se hace para las probetas prismáticas, pero que no es posible en el caso de las cúbicas.

En concreto para las mezclas 1/2 y 1/3 las pendientes son prácticamente idénticas independientemente de la geometría de la probeta. Con valores de 0,2556 para ambos tipos de probetas con mezcla 1/2; y con valores de 0,2009 y de 0,2023 para las probetas cúbicas y prismáticas respectivamente de mezcla 1/3. Hay una desviación para las probetas de mezcla 1/4 donde para las cúbicas el valor de la pendiente es de 0,1742 y para las prismáticas es de 0,2297.

También se puede afirmar, como ya se expuso en el apartado de discusión de resultados y conclusiones del ensayo 1.1, que **la argamasa absorbe más cantidad de agua cuanto mayor es la proporción de cal respecto de la arena**. Las probetas con argamasas de proporción 1:2, absorben más cantidad de agua que las de proporción 1:4. Este resultado es perfectamente lógico, ya que el árido absorbe mucha menos agua que la cal. Datos que son coherentes con los obtenidos en el ensayo UNE-EN 772-11 del ensayo 1.1.

### ENSAYO 3

### ENSAYO 3.2

#### Ensayo según norma UNE-EN 15801

*Ensayo sobre probetas de ladrillos de tejar antiguos tipo "La Operaria"*

*Ensayo sobre probetas de ladrillos de ejecución moderna por extrusión tipo Santoveña*

*Determinación de la absorción de agua por capilaridad*

#### IV. Descripción de las probetas

Se realizó este ensayo en dos tandas con dos tipos de probetas de dimensiones distintas. La primera sobre cuatro probetas de ladrillos enteros, dos probetas de cada tipo de ladrillo, de los denominados en este documento como tipo "La Operaria" y tipo Santoveña. Los primeros de dimensiones aproximadas de 280 x 140 x 48 mm y peso 3.175 gr, y los segundos de dimensiones medias de 240 x 107 x 35 mm, y un peso en torno a los 1.750 gr. Para realizar este ensayo se hidrófugo un ladrillo de cada tipo. La segunda tanda se llevó a cabo sobre 24 (12+12) probetas cúbicas de dimensiones aproximadas de 40 x 40 x 40 mm de ladrillos del mismo tipo que los antes descritos obtenidas por corte con sierra de disco.

#### V. Imágenes del ensayo



Imagen 69. Imágenes de las probetas de los ladrillos enteros mientras se ejecuta el ensayo

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO



Imagen 70. Imágenes de probetas de ladrillos enteros mientras se ejecuta el ensayo

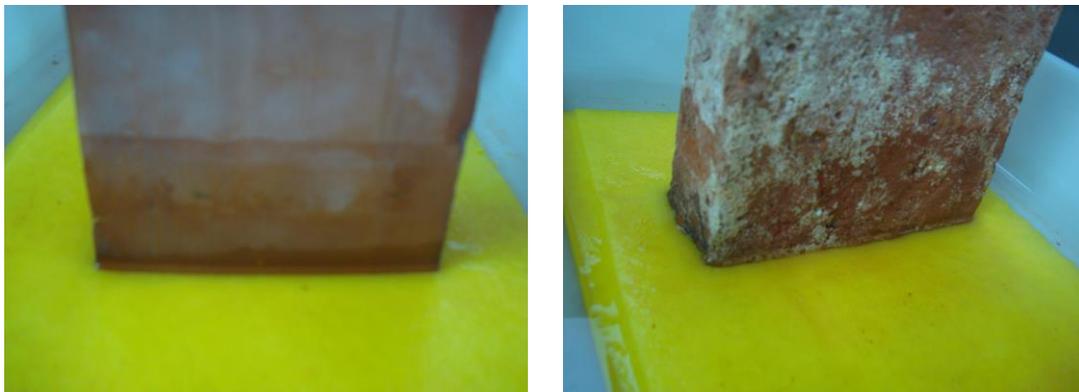


Imagen 71. Imágenes de las probetas con los ladrillos enteros mientras se ejecuta el ensayo



Imagen 72. Imágenes de las probetas cúbicas de ladrillos tipo "La Operaria" mientras se ejecuta el ensayo



Imagen 73. Imágenes de las probetas cúbicas de ladrillos de tejar mientras se ejecuta el ensayo (arriba). Vistas más ampliadas de algunas caras de los cubos una vez ejecutado el proceso de corte (abajo)

## VI. Datos y expresión de resultados

Los datos que se recogen en las tablas siguientes son valores de pesadas. La toma de datos se hace en un primer momento a intervalos de 30 segundos, después de 1 minuto, de 5 minutos, de 15 minutos, de 1 hora y, por fin, de un día, hasta que se estabilizan los datos. De este modo se obtienen, por un lado, datos de velocidad de absorción y, por otro, la cantidad de agua absorbida por superficie en  $\text{kg}/\text{m}^2$ .

Se muestran en primer lugar los datos de los ensayos realizados con las probetas de ladrillos enteros y luego los que se llevaron a cabo con las probetas cúbicas. Con el ladrillo entero de tejar se hicieron ensayos tomando como base además de la testa, el canto y la tabla, con el fin de saber si esto podía influir en la absorción del agua.

### Datos y gráficas de los ensayos realizados con probetas de ladrillos enteros ladrillos tipo “La Operaria” y tipo “Santoveña”

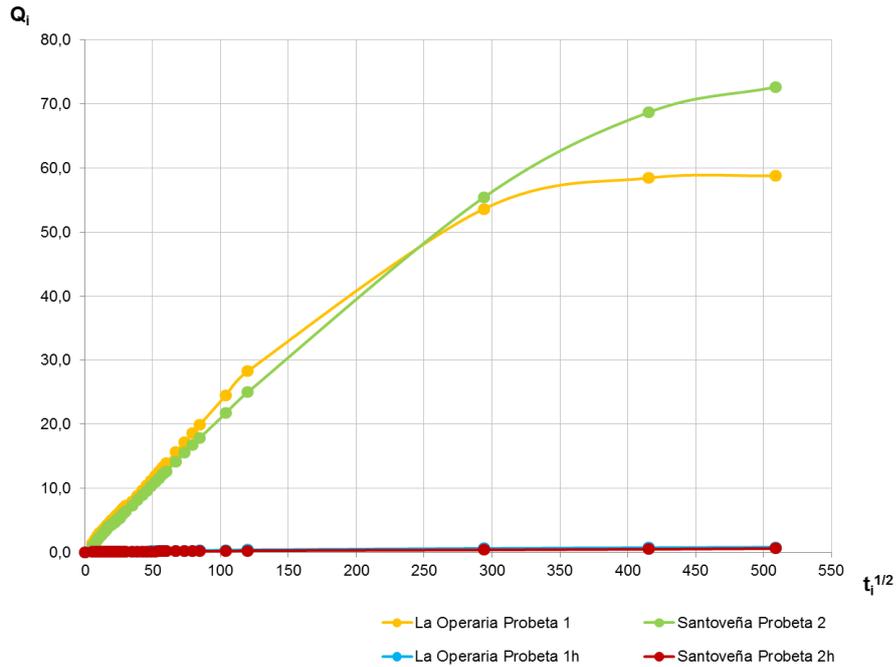
La tabla 19 que se muestra a continuación recoge los valores tomados a los ladrillos enteros del tipo “La Operaria” y “Santoveña” durante la realización del ensayo y el valor de  $Q_i$  obtenido de dichos valores. También se muestran los valores de la altura alcanzada por la humedad.

				Nº probeta	Masa de la probeta en seco	Superficie en contacto con el agua	Altura de la probeta
				Símbolo	$m_0$	A	h
				Unidad	kg	$m^2$	m
La Operaria (47 x 128 x 258)				1	2,6	0,00602	0,3
La Operaria hidrofugada (49 x 141 x 264)				1h	3,2	0,00691	0,3
Santoveña del Valle (Santander) (33 x 108 x 233)				2	1,7	0,00356	0,2
Santoveña del Valle (Santander) hidrofugada (38 x 107 x 226)				2h	1,7	0,00407	0,2

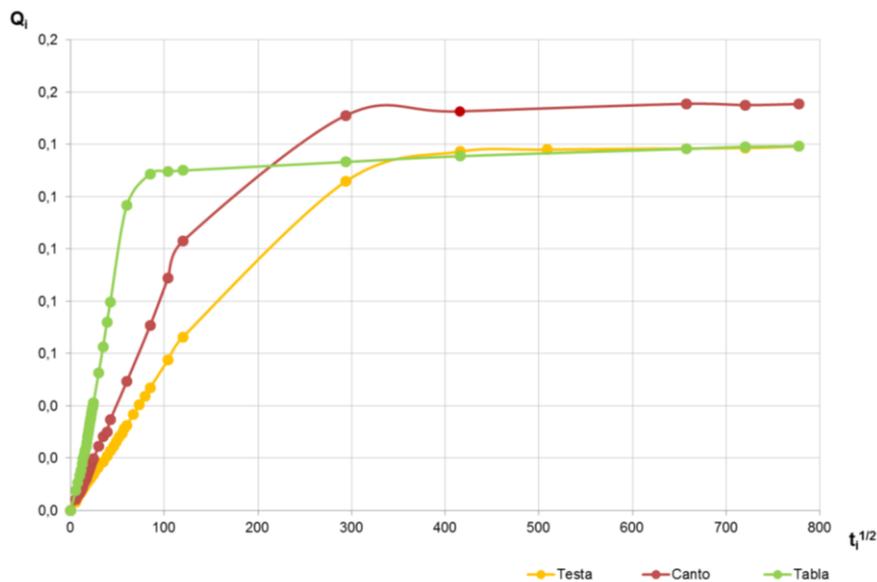
Tiempo ensayo				Masa de la probeta en el tiempo $t_i$	Altura que alcanza el agua	Cantidad de agua absorbida	Masa de la probeta en el tiempo $t_i$	Altura que alcanza el agua	Cantidad de agua absorbida	Masa de la probeta en el tiempo $t_i$	Cantidad de agua absorbida	Masa de la probeta en el tiempo $t_i$	Cantidad de agua absorbida
				kg	mm	$kg/m^2$	kg	mm	$kg/m^2$	kg	$kg/m^2$	kg	$kg/m^2$
				La Operaria Probeta 1			Santoveña Probeta 2			La Operaria Probeta 1h		Santoveña Probeta 2h	
sg	sg	m/h/d	sg	kg	mm	$kg/m^2$	kg	mm	$kg/m^2$	kg	$kg/m^2$	kg	$kg/m^2$
Parcial	Total	Total	Total	Total		$[(m_i - m_0)/A]$	Total		$[(m_i - m_0)/A]$	Total	$[(m_i - m_0)/A]$	Total	$[(m_i - m_0)/A]$
$t_i$	$t_i$	$t_i$	$t_i^{1/2}$	$m_i$	$H_i$	$Q_i (1)$	$m_i$	$H_i$	$Q_i (2)$	$m_i$	$Q_i (1h)$	$m_i$	$Q_i (2h)$
0	0	0	0,0	2,5602		0,00	1,7333		0,00	3,1773	0,00	1,6730	0,00
30	30		5,5	2,5686		1,40	1,7363		0,84	3,1778	0,07	1,6733	0,07
30	60	1m	7,7	2,5730		2,13	1,7385		1,46	3,1778	0,07	1,6733	0,07
30	90		9,5	2,5761	15	2,64	1,7403	8	1,96	3,1778	0,07	1,6733	0,07
30	120	2m	11,0	2,5783	17	3,01	1,7417	9	2,36	3,1778	0,07	1,6733	0,07
30	150		12,2	2,5802	17	3,32	1,7429	10	2,69	3,1778	0,07	1,6733	0,07
30	180	3m	13,4	2,5816	19	3,56	1,7440	10	3,00	3,1778	0,07	1,6733	0,07
30	210		14,5	2,5832	18	3,82	1,7450	12	3,28	3,1778	0,07	1,6733	0,07
30	240	4m	15,5	2,5847	20	4,07	1,7457	12	3,48	3,1778	0,07	1,6733	0,07
30	270		16,4	2,5860		4,29	1,7467		3,76	3,1778	0,07	1,6734	0,10
30	300	5m	17,3	2,5873	28	4,50	1,7475	14	3,98	3,1779	0,09	1,6734	0,10
30	330		18,2	2,5882		4,65	1,7479		4,10	3,1779	0,09	1,6734	0,10
30	360	6m	19,0	2,5891	30	4,80	1,7483		4,21	3,1779	0,09	1,6734	0,10
30	390		19,7	2,5907		5,07	1,7488		4,35	3,1779	0,09	1,6734	0,10
30	420	7m	20,5	2,5912		5,15	1,7493		4,49	3,1780	0,10	1,6735	0,12
30	450		21,2	2,5913	30	5,17	1,7497		4,60	3,1781	0,12	1,6734	0,10
30	480	8m	21,9	2,5927		5,40	1,7501	16	4,71	3,1781	0,12	1,6734	0,10
30	510		22,6	2,5935		5,54	1,7505		4,83	3,1781	0,12	1,6735	0,12
30	540	9m	23,2	2,5947	30	5,73	1,7510	17	4,97	3,1781	0,12	1,6735	0,12
30	570		23,9	2,5953		5,83	1,7516		5,13	3,1781	0,12	1,6735	0,12
30	600	10m	24,5	2,5961	30,5	5,97	1,7520		5,25	3,1781	0,12	1,6735	0,12
60	660	11m	25,7	2,5983	31	6,33	1,7525		5,39	3,1782	0,13	1,6735	0,12
60	720	12m	26,8	2,5997		6,57	1,7539	20	5,78	3,1782	0,13	1,6736	0,15
60	780	13m	27,9	2,6016		6,88	1,7545		5,95	3,1783	0,14	1,6736	0,15
60	840	14m	29,0	2,6022	33	6,98	1,7556		6,26	3,1783	0,14	1,6736	0,15
60	900	15m	30,0	2,6040		7,28	1,7562	23	6,43	3,1784	0,16	1,6736	0,15
300	1.200	20m	34,6	2,6081	40	7,96	1,7595	26	7,35	3,1783	0,14	1,6736	0,15
300	1.500	25m	38,7	2,6134	45	8,84	1,7624	28	8,16	3,1783	0,14	1,6736	0,15
300	1.800	30m	42,4	2,6185	50	9,69	1,7653	31	8,98	3,1784	0,16	1,6736	0,15
300	2.100	35m	45,8	2,6231	55	10,46	1,7676	35	9,62	3,1784	0,16	1,6736	0,15
300	2.400	40m	49,0	2,6278	58	11,24	1,7703	37	10,38	3,1785	0,17	1,6736	0,15
300	2.700	45m	52,0	2,6322	62	11,97	1,7725	40	11,00	3,1786	0,19	1,6736	0,15
300	3.000	50m	54,8	2,6361	66	12,62	1,7744	41	11,53	3,1787	0,20	1,6737	0,17
300	3.300	55m	57,4	2,6401	70	13,28	1,7766	43	12,15	3,1788	0,22	1,6737	0,17
300	3.600	1h	60,0	2,6438	72	13,90	1,7785	45	12,68	3,1788	0,22	1,6737	0,17
900	4.500	1h15m	67,1	2,6544	82	15,66	1,7838	50	14,17	3,1789	0,23	1,6737	0,17
900	5.400	1h30m	73,5	2,6637	91	17,20	1,7886	55	15,52	3,1790	0,25	1,6737	0,17
900	6.300	1h45m	79,4	2,6723	98	18,63	1,7930	60	16,75	3,1792	0,28	1,6737	0,17
900	7.200	2h	84,9	2,6803	106	19,96	1,7971	65	17,90	3,1794	0,30	1,6738	0,20
3.600	10.800	3h	103,9	2,7076	131	24,50	1,8108	78	21,75	3,1798	0,36	1,6739	0,22
3.600	14.400	4h	120,0	2,7303	150	28,27	1,8224	87	25,00	3,1801	0,41	1,6740	0,25
72.000	86.400	1dia	293,9	2,8826	256	53,59	1,9307	196	55,39	3,1816	0,62	1,6747	0,42
86.400	172.800	2 dias	415,7	2,9117	258	58,43	1,9781	233	68,69	3,1824	0,74	1,6751	0,52
86.400	259.200	3 dias	509,1	2,9137	258	58,76	1,9921	233	72,62	3,1829	0,81	1,6756	0,64

Tabla 19. Tabla de recogida de resultados del ensayo con los ladrillos enteros.



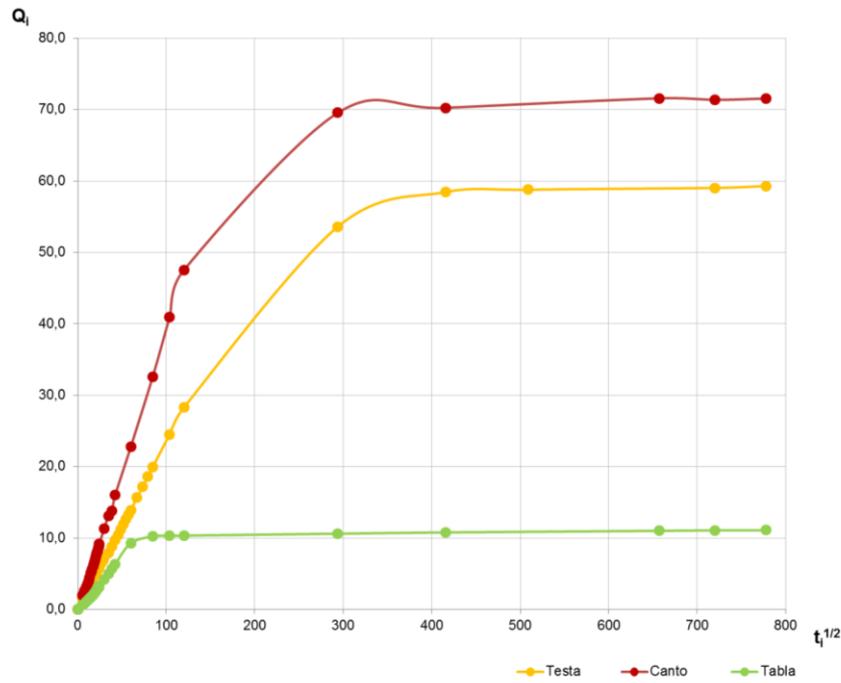
**Gráfica 5. Representa la curva de absorción de agua por capilaridad de las probetas de ladrillos enteros**  
El eje horizontal es el tiempo  $t_i^{1/2}$ . El eje vertical el valor de  $Q_i$

A continuación se muestran dos gráficos interesantes del mismo ensayo realizado con un ladrillo de tejar apoyado en sus tres posiciones diferentes, sobre *canto*, *testa* y *tabla*, con el fin de observar su comportamiento. La razón es que el ladrillo se ha ensayado colocado sobre su testa, pero la realidad es que en obra siempre están colocados sobre su tabla. De manera que si los resultados fuesen muy dispares, esto de alguna manera invalidaría el ensayo, ya que daría resultados que no tendrían que ver con lo que ocurre en la realidad.

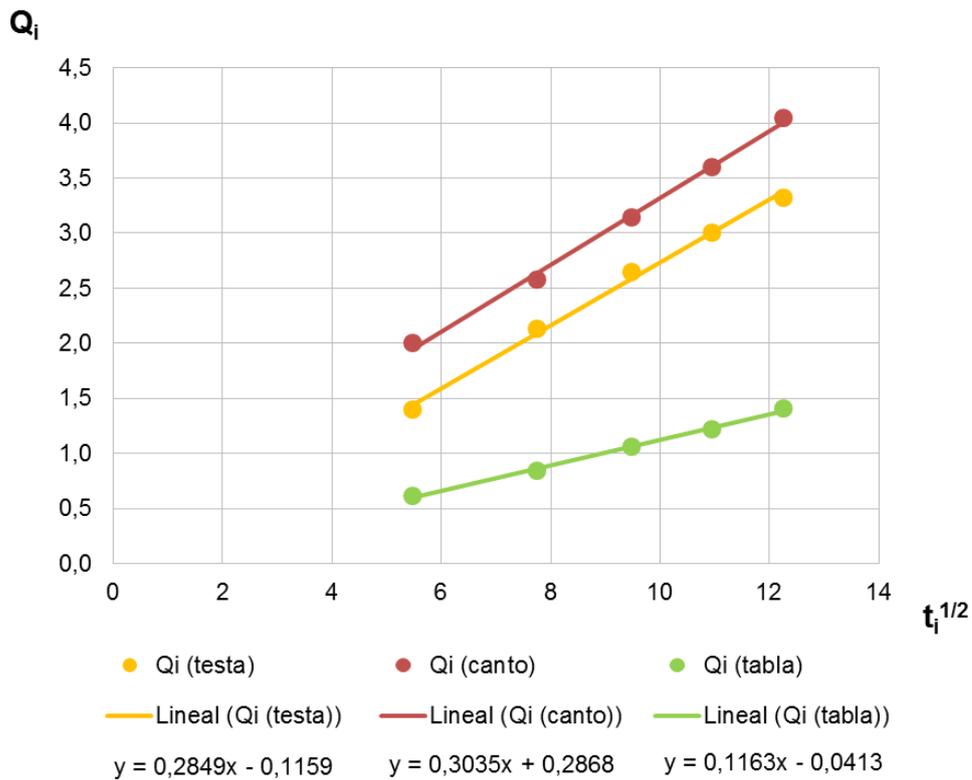


**Gráfica 6. La gráfica representa la ganancia de peso en %.**

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO



Gráfica 7. Representa la curva de absorción de agua por capilaridad de las probetas según la base seca la testa, el canto o la tabla. El eje horizontal es el tiempo  $t_{1/2}$ . El eje vertical el valor de  $Q_i$



Gráfica 8. Ampliación de la gráfica 7 en la zona de inicio. El valor que multiplica la "x" es el valor de AC, la pendiente

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD  
CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

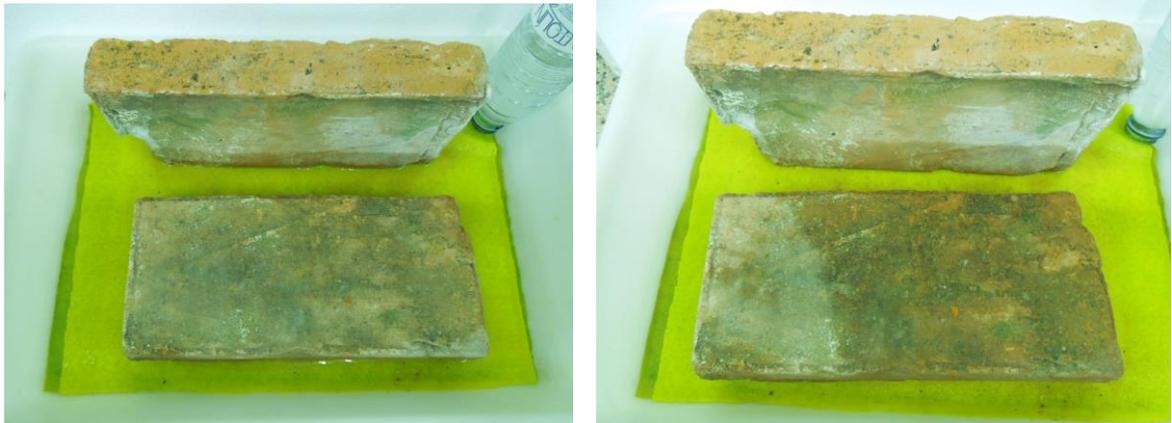


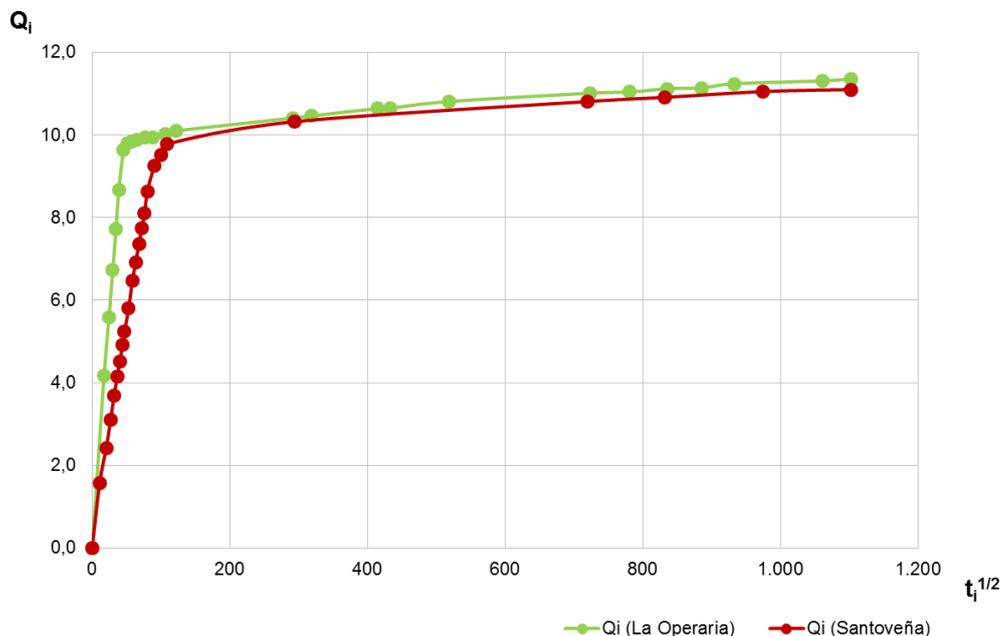
Imagen 74. Imágenes de los ladrillos apoyados sobre tabla y canto mientras se ejecuta el ensayo.

Datos y gráficas de los ensayos realizados con probetas cúbicas de ladrillos tipo “La Operaria” y tipo “Santoveña” de dimensiones 40 x 40 x 40 mm.

sg	sg	Cubos ladrillo La Operaria	Cubos ladrillo Santoveña				
Total	Total	$[(m_i - m_0)/A]$	$[(m_i - m_0)/A]$				
$t_i$	$t_i^{1/2}$	$Q_i$ (La Operaria)	$Q_i$ (Santoveña)				
0	0	0,0	0,0	10.020	100		9,5
120	11		1,6	10.080	100		
300	17	4,2		11.400	107	10,0	
420	20		2,4	11.820	109		9,8
600	24	5,6		12.600	112		
720	27		3,1	14.400	120		
900	30	6,7		15.000	122	10,1	
1.020	32		3,7	16.200	127		
1.200	35	7,7		81.000	285		
1.320	36		4,2	85.200	292	10,4	
1.500	39	8,7		86.400	294		10,3
1.620	40		4,5	101.400	318	10,5	
1.800	42			171.600	414	10,6	
1.920	44		4,9	180.000	424		
2.100	46	9,6		187.800	433	10,7	
2.220	47		5,3	255.600	506		
2.400	49			268.800	518	10,8	
2.700	52	9,8		345.600	588		
2.820	53		5,8	514.800	717		
3.300	57	9,8		518.400	720		10,8
3.420	58		6,5	522.600	723	11,0	
3.600	60			603.000	777		
4.020	63		6,9	609.000	780	11,0	
4.200	65	9,9		689.400	830		
4.620	68		7,4	691.200	831		10,9
5.220	72		7,7	699.000	836	11,1	
5.400	73			779.400	883		
5.820	76		8,1	783.600	885	11,1	
6.000	77	9,9		860.400	928		
6.420	80		8,6	870.000	933	11,2	
7.200	85			950.400	975		11,1
7.800	88	9,9		1.121.400	1059		
8.220	91		9,3	1.127.400	1062	11,3	
9.000	95			1.215.600	1103	11,4	11,1
				1.465.200	1210		
				<b>Absorción agua <math>l/m^3</math></b>	<b>276,0</b>	<b>288,6</b>	
				<b>Absorción kg/kg</b>	<b>14,8%</b>	<b>16,0%</b>	

Tabla 20. Tabla de recogida de resultados del ensayo hecho con las probetas cúbicas de los dos tipos de ladrillos

Se muestra a continuación la gráfica que representa los valores de la tabla 20, que recoge los datos del ensayo realizado con las probetas cúbicas de los dos tipos de ladrillos ensayados.



**Gráfica 9. Representa la curva de absorción de agua por capilaridad de las probetas cúbicas**  
El eje horizontal es el tiempo  $t_i^{1/2}$ . El eje vertical el valor de  $Q_i$

De esta gráfica se puede deducir que el comportamiento de ambos ladrillos difiere ligeramente en el inicio del ensayo con una divergencia en la pendiente inicial. Sin embargo según avanza el ensayo ambas gráficas tienden a coincidir.

Si pasamos estos datos a volumen de agua contenida, los valores son los siguientes:

- Ladrillo de tejar tipo La Operaria: 276 l/m<sup>3</sup>
- Ladrillo por extrusión tipo Santoveña: 289 l/m<sup>3</sup>

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Una conclusión que se extrae de la primera tanda de ensayos realizada a las probetas de ladrillos enteros es que **la hidrofugación es muy efectiva**, ya que las dos probetas hidrofugadas no absorben prácticamente nada de agua en comparación con las otras dos no hidrofugadas.

En cuanto a las dos probetas no hidrofugadas, las dos muestras absorben agua de forma constante y muy similar hasta un punto en el que se dispersan ligeramente los valores.

De la gráfica que compara los valores de absorción (gráfica 6) en incremento de peso, para un mismo ladrillo de tejar, según la cara sobre la que esté apoyado, se puede deducir que los incrementos de peso son prácticamente similares en los tres casos una vez que ha

transcurrido un periodo prolongado en el tiempo aunque en el arranque del ensayo exista alguna ligera disparidad. Este hecho permite validar este ensayo cuando se realiza tomando como base la testa de la pieza. En la gráfica se puede apreciar además que las líneas de las representaciones que describen **el comportamiento cuando el apoyo es sobre la tabla y sobre la testa son prácticamente coincidentes.**

Respecto de la cantidad de agua absorbida por superficie (gráfica 7), los valores son sensiblemente parecidos a los del primer ensayo, salvo para el caso del apoyo sobre la tabla. Esto puede inducir a error, pero hay que tener en cuenta que lo importante es que en el origen la pendiente de las gráficas es bastante similar. La opción en la que el ladrillo está apoyado sobre la tabla hace que la probeta se sature rápidamente y que se detenga la absorción de agua por parte de la pieza. La gráfica 8, que amplía el inicio de la gráfica 7, nos muestra para las opciones de apoyo en testa y canto unas pendientes prácticamente idénticas. Para la opción de apoyo sobre la tabla la pendiente es menor debido a la gran evaporación que se produce con esta disposición de la base.

De la segunda tanda de ensayos se puede concluir, como en la primera, que el comportamiento de los dos tipos de ladrillos es muy similar, si bien, como es lógico, la cantidad de agua absorbida por superficie es mucho menor, ya que el volumen de la probetas es también mucho más reducido.

Una de las conclusiones más importante de este ensayo es corroborar **que la pendiente inicial de todas las gráficas es muy similar en todos los casos.** Es decir, que el comportamiento en la **velocidad de absorción** y en la **cantidad de agua absorbida** es sensiblemente similar para ladrillos y argamasas en el inicio del proceso de absorción, no así en el volumen final de agua contenida ni en la velocidad de ascensión de la humedad.

Otra conclusión importante es que **el ladrillo absorbe más cantidad de agua que la argamasa y a más velocidad, sin embargo, el frente húmedo debido a la ascensión de la humedad por capilaridad sube más rápido por la argamasa de cal que por los ladrillos,** hecho que se verá reflejado con claridad en las imágenes termográficas del ensayo 16.1.

Esto se debe a dos factores. El primero a que la porosidad del ladrillo es superior a la de la argamasa (ver ensayo 6.1), de manera que, aunque entra más agua en el ladrillo que en la argamasa, hay más volumen de huecos que rellenar. El segundo factor apunta al tipo de porosidad de la argamasa, que da indicios de una estructura interna más capilar que la del ladrillo, de modo que el movimiento del agua a través de los poros de la argamasa sería más rápido que a través de los poros del ladrillo.

De los ensayos expuestos hasta ahora y de los que se muestran a continuación, y a la vista

de los datos y de las gráficas obtenidas, se puede concluir que, para el tipo de materiales sobre los que versa esta tesis y de las fábricas con ellas realizadas, todos los ensayos y los procesos que se desarrollan durante periodos de tiempo prolongados dan siempre resultados coherentes y previsibles, aunque los valores iniciales obtenidos puedan presentar discrepancias o disparidades que puedan inducir a confusión. Este hecho es importante, ya que estamos analizando un fenómeno que tiene un componente, el temporal, que es fundamental para los estudios que se han llevado a cabo. De modo que más allá de los datos puntuales obtenidos hay que analizar las tendencias que se pueden observar en tablas y gráficas. El fenómeno de la capilaridad es un proceso que siempre ha de estudiarse en periodos de tiempo prolongados ya que sus efectos tienden a estabilizarse a largo plazo.

## **ENSAYO SEGÚN NORMA UNE 67027 SOBRE PROBETAS DE ARGAMASA Y LADRILLO**

- **Ensayo 4**

- **Ensayos sobre argamasa**                      **Ensayo 4.1**
- **Ensayos sobre ladrillo**                      **Ensayo 4.2**

## ENSAYO 4

UNE-EN 67027

### I. Denominación

Ensayo según norma UNE-EN 67027. *Determinación de la absorción de agua en los ladrillos empleados en construcción, especificados en la norma UNE 67-019 (Ladrillos de arcilla cocida para la construcción. Características y usos).*

### II. Objetivo del ensayo

El ensayo que desarrolla esta norma tiene por objeto la determinación de la absorción de agua en los ladrillos, y está encaminado a determinar el tanto por ciento de agua que es capaz de absorber una probeta. Aunque la norma es para ladrillos, se ha utilizado también para probetas de argamasa. Así pues para este ensayo se han utilizado tanto probetas normalizadas de argamasa como probetas de ladrillos de tres tipos. La razón por la que se han ensayado tres tipos de ladrillos ha sido observar la influencia que pueden llegar a tener los procesos de elaboración en la cantidad de agua que puede llegar a absorber una pieza cerámica.

Si bien es cierto que esta norma ha sido derogada por la UNE-EN 772-21, tras el desarrollo de ensayos y la observación de resultados, se ha comprobado que la que más se adapta a la realidad de lo que realmente ocurre en los materiales y fábricas es la norma que ahora describimos, por lo que es la que se ha tomado como referencia para esta tesis.

### III. Descripción y procedimiento del ensayo

Para este ensayo de absorción específico se han empleado tres tipos de ladrillos enteros y probetas prismáticas normalizadas de argamasa de dimensiones 40x40x160 mm con tres proporciones distintas en las mezclas 1:2, 1:3 y 1:4. Para llevar a cabo las pesadas, se ha empleado una balanza con una sensibilidad de 0,5 g y un tanque de inmersión acorde a las medidas de las probetas.

El primer paso consiste en el secado de las probetas en estufa a una temperatura de 100°C hasta peso constante. La masa constante se alcanza si durante el proceso de secado,

realizando una pesada a las 21 horas y otra a las 24 horas, la diferencia entre las dos pesadas no supera el 0,1% del peso total de la probeta. En caso contrario, habrá que continuar con el secado hasta que esa diferencia entre pesadas consecutivas, siempre con un intervalo entre ellas de 3 horas, sea inferior al 0,1% señalado. Este peso final en seco se denominará  $G_s$ . Una vez llegado a este punto, se sacan las probetas de la estufa y se dejan enfriar a temperatura ambiente. Antes de proceder al mojado se toman medidas y se calcula la superficie de la cara que va a sumergirse en el agua.

A continuación, se rellena un recipiente con agua y se introducen las probetas de canto, de forma que su inmersión completa se consiga en un tiempo mínimo de tres horas. Transcurridas 24 horas desde el inicio de la inmersión, se sacan las probetas del agua, se secan con un paño húmedo y se pesan, y una vez tomados los datos se introducen de nuevo en el agua. Este proceso se repetirá tantas veces como sea necesario en intervalos de 24 horas hasta conseguir que dos pesadas consecutivas tengan una diferencia de peso inferior al 0,1%. Este peso final tras la absorción se denominará  $G_e$ .

Todas las pesadas se deben realizar con un error inferior al 0,05%. Finalmente, la cantidad de agua absorbida será la diferencia entre  $G_e$  y  $G_s$ .

La absorción A de cada probeta se calculará mediante la expresión:

$$A = ((G_e - G_s) / G_s) \times 100$$

La absorción específica que se toma como resultado es la media aritmética de los obtenidos en las probetas.

## ENSAYO 4

## ENSAYO 4.1

### Ensayo según norma UNE 67027-84

*Ensayo sobre probetas de argamasa de cal  
con diferentes proporciones 1:2, 1:3 y 1:4*

*Determinación de la absorción de agua*

#### IV. Descripción de las probetas

Se realizó este ensayo con 18 probetas (6+6+6), todas ellas con unas dimensiones de 40x40x160 mm de argamasa, con tres proporciones diferentes en su composición: 1:2, 1:3 y 1:4 (cal/arena), sumergiéndolas totalmente en agua fría con el fin de conocer la cantidad máxima de agua que son capaces de absorber.

#### V. Imágenes del ensayo



Imagen 75. Imágenes de las probetas mientras se ejecuta el ensayo.

#### VI. Datos y expresión de resultados

Los datos que se recogen son los pesos inicial y final tras un periodo de saturación en el que la probeta está absorbiendo agua, tal y como se ha explicado en puntos anteriores, totalmente sumergida en agua. Se considera que la probeta está saturada cuando en dos pesadas en días consecutivos, su peso no varía en más de un 0,1%.

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD  
CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

Nº probeta	Peso seco	Peso húmedo	Absorción	Peso saturado	Absorción		Volumen agua absorbida	Volumen agua absorbida / Volumen
Unidad	gr	gr	%	gr	%		cm <sup>3</sup>	%
Fórmula			(Peso hum. - Peso seco)100/Peso seco		(Peso sat. - Peso seco)100/Peso seco			
1	454,4	512,5	12,8%	512,6	12,8%	Argamasa 1:2	58,2	22,7%
2	454,6	513,2	12,9%	513,4	12,9%		58,8	23,0%
3	454,4	512,7	12,8%	513,9	13,1%		59,6	23,3%
4	455,4	510,1	12,0%	510,3	12,1%		54,9	21,5%
5	452,1	507,3	12,2%	507,7	12,3%		55,6	21,7%
6	448,5	503,7	12,3%	503,8	12,3%		55,3	21,6%
	453,2	509,9	12,5%	510,3	12,6%		57,0	22,3%

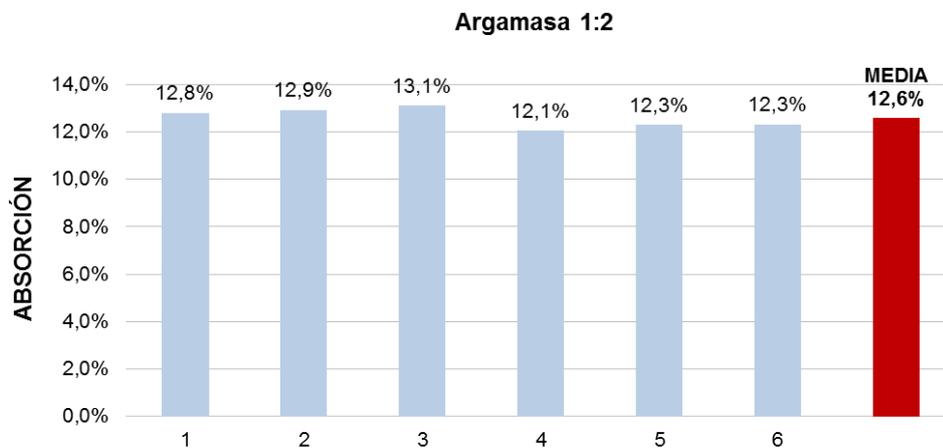
Tabla 21. Tabla de recogida de los datos del ensayo para las probetas prismáticas de argamasa de cal ½

Nº probeta	Peso seco	Peso húmedo	Absorción	Peso saturado	Absorción		Volumen agua absorbida	Volumen agua absorbida / Volumen
Unidad	gr	gr	%	gr	%		cm <sup>3</sup>	%
Fórmula			(Peso hum. - Peso seco)100/Peso seco		(Peso sat. - Peso seco)100/Peso seco			
7	467,0	515,3	10,3%	517,7	10,9%	Argamasa 1:3	50,7	19,8%
8	463,5	514,9	11,1%	517,2	11,6%		53,7	21,0%
9	468,0	518,3	10,7%	520,1	11,2%		52,2	20,4%
10	462,3	515,6	11,5%	517,2	11,9%		54,9	21,4%
11	462,9	513,3	10,9%	514,2	11,1%		51,3	20,0%
12	462,0	513,1	11,1%	514,4	11,3%		52,3	20,4%
	464,3	515,1	10,9%	516,8	11,3%		52,5	20,5%

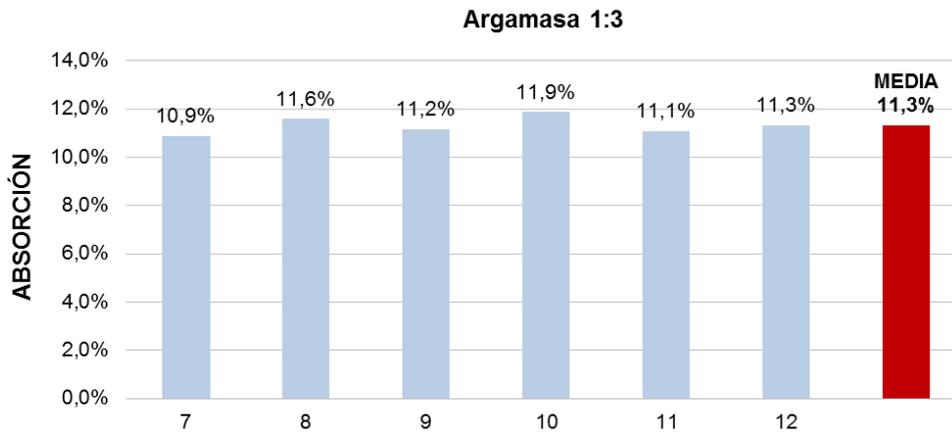
Tabla 22. Tabla de recogida de los datos del ensayo para las probetas prismáticas de argamasa de cal 1/3

Nº probeta	Peso seco	Peso húmedo	Absorción	Peso saturado	Absorción		Volumen agua absorbida	Volumen agua absorbida / Volumen
Unidad	gr	gr	%	gr	%		cm <sup>3</sup>	%
Fórmula			(Peso hum. - Peso seco)100/Peso seco		(Peso sat. - Peso seco)100/Peso seco			
13	474,1	518,3	9,3%	518,5	9,4%	Argamasa 1:4	44,4	17,3%
14	465,1	509,4	9,5%	509,6	9,6%		44,4	17,4%
15	478,0	521,5	9,1%	521,6	9,1%		43,6	17,0%
16	483,2	527,1	9,1%	527,2	9,1%		44,0	17,2%
17	481,6	524,7	8,9%	524,8	9,0%		43,2	16,9%
18	469,9	512,8	9,1%	513,1	9,2%		43,3	16,9%
	475,3	519,0	9,2%	519,1	9,2%		43,8	17,1%

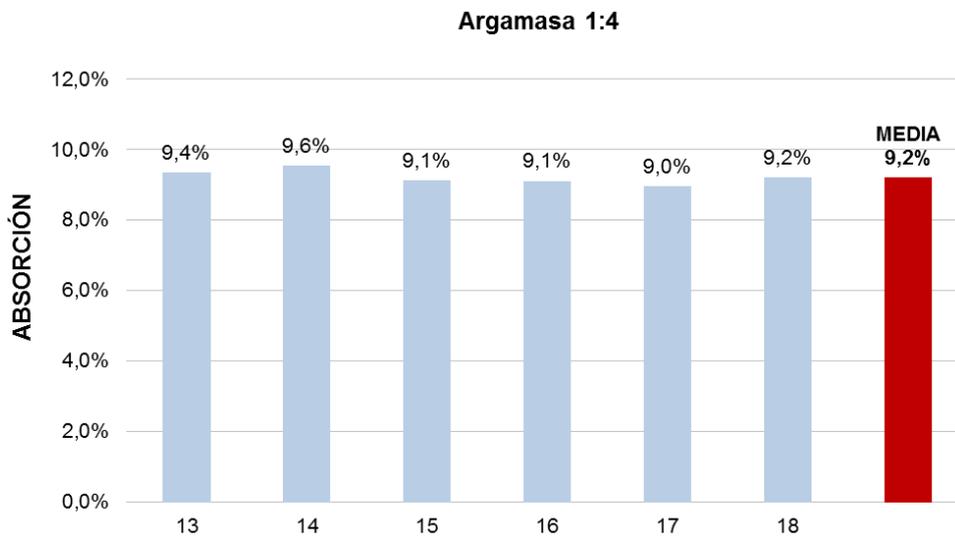
Tabla 23. Tabla de recogida de los datos del ensayo para las probetas prismáticas de argamasa de cal 1/4



Gráfica 10. Gráfico de barras de la tabla 21

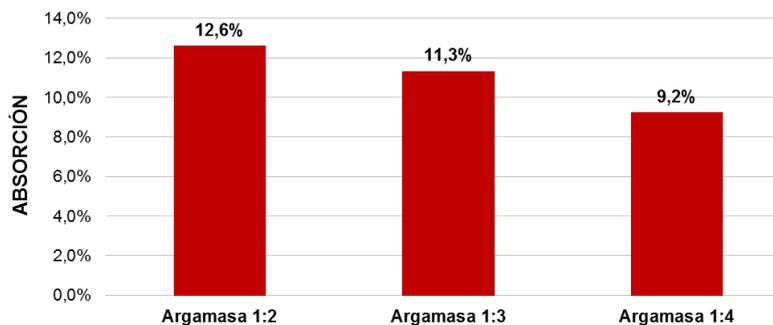


Gráfica 11. Gráfico de barras de la tabla 22



Gráfica 12. Gráfico de barras de la tabla 23

La dispersión de los resultados es muy baja, lo cual era de esperar, ya que las probetas se han fabricado todas a la vez con los mismos materiales y bajo un mismo procedimiento, por lo que sus características deben ser muy similares. A continuación, se realiza la media de los resultados obtenidos por cada grupo de probetas en función de la proporción de la mezcla.



Gráfica 13. Gráfico resumen de las gráficas 10, 11 y 12

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Las probetas con una proporción de mortero 1:2 son las que más agua absorben (media de **12,5%** de aumento de peso), seguidas de las de proporción 1:3 (media de **11,31%** de aumento de peso) y, por último, las que menos absorben son las de proporción 1:4 (con una media de **9,22%** de aumento de peso). De estos datos se puede deducir que a mayor cantidad de árido, menor cantidad de agua absorbida.

La dispersión de resultados es muy baja, tal y como se ha comentado, lo cual era previsible ya que se cuidó que materiales y procedimientos fueran similares para la ejecución de todas las probetas.

Si pasamos estos datos a litros de agua contenido por volumen de argamasa los valores que se obtienen son los siguientes.

PROPORCIÓN DE LA MEZCLA	AUMENTO DE PESO	LITROS / m <sup>3</sup> ARGAMASA
1:2	12,50 %	221,44 l/m <sup>3</sup>
1:3	11,30 %	205,15 l/m <sup>3</sup>
1:4	9,22 %	171,13 l/m <sup>3</sup>

Tabla 24. Tabla resumen del ensayo

La conclusión más importante, que coincide plenamente con lo observado en ensayos anteriores es que **a mayor cantidad de cal en la mezcla, mayor cantidad de agua puede absorber una muestra.**

## ENSAYO 4

## ENSAYO 4.2

### Ensayo según norma UNE-EN 67027-84

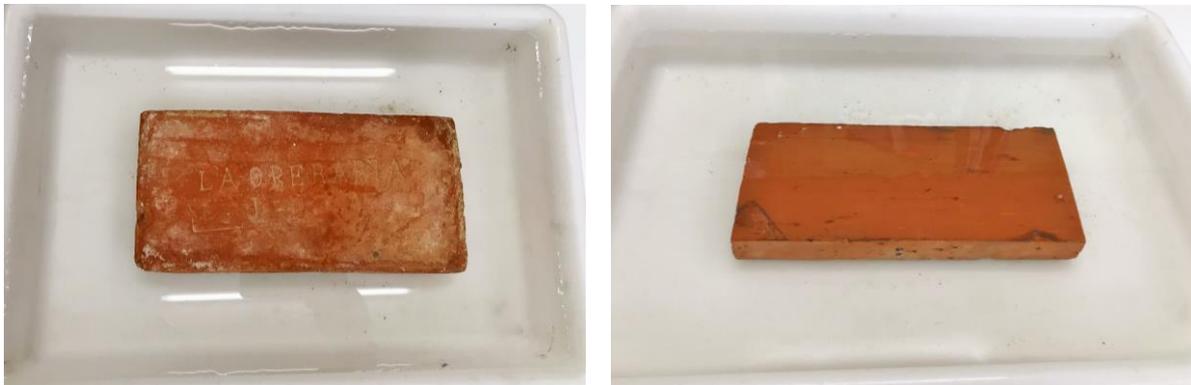
*Ensayo sobre seis probetas de ladrillos de tejar antiguo de elaboración manual tipo "La Operaria"*  
*Ensayo sobre seis probetas de ladrillos de ejecución moderna por extrusión tipo "Santoveña"*

*Determinación de la absorción de agua*

#### IV. Descripción de las probetas

Se realizó este ensayo con los dos tipos de ladrillos que han servido de base a esta tesis. Uno es el que denominamos tipo "La Operaria" cuyas dimensiones aproximadas son 280 x 140 x 48 mm y su peso en seco ronda los 3.175 gr. Los otros son los denominados tipo "Santoveña", cuyas dimensiones medias son 240 x 107 x 35 mm, y un peso en torno a los 1.750 gr.

#### V. Imágenes del ensayo y comentarios



**Imagen 76. Imágenes de algunos de los ladrillos mientras se ejecuta el ensayo.**

Se observa en la imagen la inmersión total en agua de las piezas. El ladrillo de la izquierda es del tipo "La Operaria" y el de la derecha es del tipo "Santoveña". De cada uno de ellos se han ensayado un total de seis piezas.

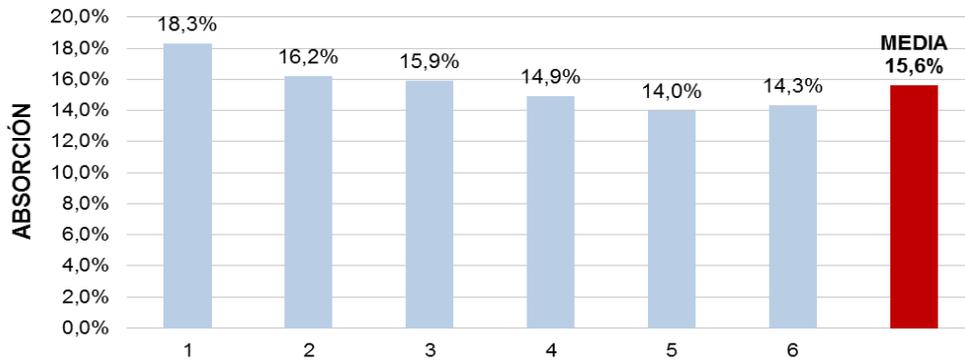
#### VI. Datos y expresión de resultados

Se muestran a continuación las tablas y las gráficas que recogen los valores de los ensayos realizados a los ladrillos de La Operaria, y a los ladrillos Santoveña.

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

La Operaria Nº probeta	Peso seco	Peso saturado	Absorción
Unidad	gr	gr	%
Fórmula			$(\text{Peso sat.} - \text{Peso seco})100/\text{Peso seco}$
1	3.062,7	3.622,5	18,3%
2	3.073,7	3.571,0	16,2%
3	2.386,5	2.766,4	15,9%
4	1.608,0	1.848,0	14,9%
5	2.691,9	3.068,8	14,0%
6	3.194,7	3.652,1	14,3%
	<b>2.669,6</b>	<b>3.088,1</b>	<b>15,6%</b>

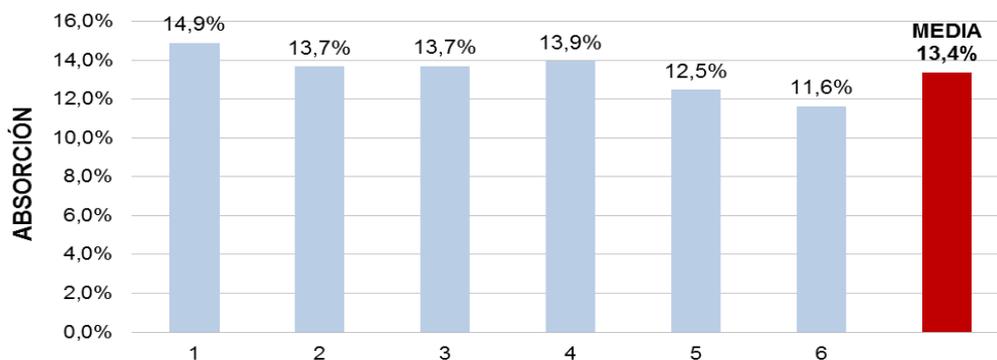
Tabla 25. Datos del ensayo a ladrillos "La Operaria"



Gráfica 14. Gráfico de barras de la tabla 25. Ladrillo "La Operaria"

Santoveña Nº probeta	Peso seco	Peso saturado	Absorción
Unidad	gr	gr	%
Fórmula			$(\text{Peso sat.} - \text{Peso seco})100/\text{Peso seco}$
1	1.715,8	1.970,8	14,9%
2	1.750,3	1.989,5	13,7%
3	1.845,3	2.097,9	13,7%
4	1.782,5	2.030,9	13,9%
5	1.865,8	2.098,4	12,5%
6	1.881,4	2.100,1	11,6%
	<b>1.806,9</b>	<b>2.047,9</b>	<b>13,4%</b>

Tabla 26. Datos del ensayo a ladrillos Santoveña



Gráfica 15. Gráfico de barras de la tabla 26. Ladrillo "Santoveña"

De la observación de los datos de los ensayos se deduce que, en los tres primeros días se produce un incremento de peso que está en torno al 84% del máximo incremento que se puede alcanzar, y a la semana el incremento de peso ya está en torno al 90% para los dos tipos de ladrillos.

Se considera que la probeta está saturada cuando en dos pesadas de días consecutivos, su peso no varía en más de un 0,1%.

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Las probetas de los ladrillos de tejar tipo "La Operaria" ensayados son las que más cantidad de agua absorben, con un valor medio de un **15,60 %** de aumento de peso sobre el peso inicial. Con valores mínimo y máximo de 14,00% y 18,30 % respectivamente. El valor obtenido para los ladrillos tipo "Santoveña" presenta un incremento de peso de un **13,40 %**. Con valores mínimo y máximo de 11,60% y 14,90 % respectivamente. Del desmontaje del ensayo realizado sobre los cuatro muros (ensayo 10.1) se tomaron valores de absorción de los ladrillos situados en la hilada inferior y que estaban sometidos a una situación similar a la de los ladrillos de este ensayo, y los valores medios obtenidos fueron de **15,12 %** para los ladrillos de tejar y de **17,11%** para los ladrillos de ejecución moderna. El hecho de que en este ensayo, los valores para los ladrillos de tejar sean ahora inferiores a los de los ladrillos de ejecución moderna es porque en dicho ensayo hay evaporación y en el ensayo UNE-EN 67027-84 no la hay. Hecho comentado y corroborado en otros apartados de esta tesis en los que queda comprobado que en los ensayos donde se produce evaporación la cantidad de agua absorbida es menor en los ladrillos de tejar antiguos que en los ladrillos modernos fabricados por extrusión. Esto se debe a que los ladrillos de tejar presentan unos poros más grandes que favorecen la evaporación de la humedad contenida.

En cuanto a la dispersión de resultados, es escasa en los ladrillos tipo Santoveña. Al ser ladrillos modernos era de esperar ya que se fabrican con procesos más estandarizados e industrializados.

Otra de las conclusiones que se pueden deducir es que los incrementos más importantes de peso por absorción de agua se producen **en los primeros días** en los que las piezas están en contacto con el agua, si bien es cierto que dichos procesos continúan con más lentitud durante periodos muy prologados en el tiempo antes de estabilizarse. Esta apreciación coincide con lo observado en otros ensayos y con lo publicado en investigaciones similares ya expuestas en el estado del arte de esta tesis.

## **ENSAYO SEGÚN NORMA UNE-EN 1015-18 SOBRE PROBETAS DE ARGAMASA**

- **Ensayo 5**
  - **Ensayos sobre argamasa**
    - Ensayo 5.1**
    - Ensayo 5.2**

## ENSAYO 5

## UNE-EN 1015-18

### I. Denominación

Ensayo según norma UNE-EN 1015-18. *Determinación de la absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.*

### II. Objetivo del ensayo

Esta norma europea tiene por objeto especificar un método de ensayo para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad de los morteros endurecidos que contienen conglomerantes minerales y áridos normales y ligeros. El ensayo está encaminado a determinar la cantidad de agua que es capaz de absorber por capilaridad una probeta prismática de mortero en unas condiciones determinadas, a presión atmosférica.

### III. Descripción y procedimiento del ensayo

Para llevar a cabo la medición de este ensayo específico se emplean una bandeja con profundidad mínima de 20 mm y una superficie plana suficientemente grande para contener las probetas, todo ello equipado con un sistema que mantenga constante el nivel de agua del recipiente, soportes o elementos similares, que con una superficie de contacto mínima permitan elevar la superficie de apoyo de la probeta con respecto al fondo del recipiente empleado, un cronómetro, una balanza con exactitud de 0.1% de la masa total, una estufa ventilada, una paleta o cuchillo, papel de filtro absorbente con una masa específica  $(200\pm 20)\text{g/m}^2$  y capacidad de absorción de agua de  $(160\pm 20)\text{g/m}^2$ , una cámara de acondicionamiento o recinto capaz de mantener una humedad relativa de  $95\pm 5\%$  y del  $65\pm 5\%$ , y por último moldes metálicos para fabricar las probetas prismáticas de 160 mm x 40 mm x 40 mm, como describe la Norma Europea EN 1015-11.

El primer paso consiste en la preparación del mortero en el laboratorio, el tiempo de amasado se debe medir en el momento en el que todos los elementos se encuentran en la amasadora, la consistencia de este mortero es la definida en la Norma Europea EN 1015-2 que se determina de acuerdo con la Norma EN 1015-3. Una vez obtenidos los morteros listos para su empleo, se preparan tres probetas prismáticas con dimensiones 160 mm x 40 mm x 40 mm, se coloca el papel de filtro absorbente bajo el molde metálico y se llena el molde con el mortero y se envasa el excedente con la superficie superior del molde, posteriormente

se dispone una capa de papel de filtro en la superficie del mortero. Una vez realizado se pasa al curado de las probetas bajo las condiciones descritas en la siguiente tabla.

Tipo de mortero	Tiempo de curado a una temperatura de 20°C ± 2°C en días		
	95% ± 5% de humedad relativa (HR)		65% ± 5% de humedad relativa (HR)
	En el molde*	Con el molde retirado	Con el molde retirado
Morteros de cal aérea	5	2	21
Morteros de cal aérea/cemento en los que la cantidad de cal aérea es superior al 50% de la masa total de conglomerante	5	2	21
Cemento y otros morteros de cal aérea/cemento	2	5	21
Morteros con otros conglomerantes hidráulicos	2	2	21
Morteros retardados	5	2	21
* En determinados casos puede ser necesario un tiempo mayor de almacenamiento en el molde			

**Tabla 27. Tabla de tiempos de curado de las argamasas en función del tipo de mortero**

Una vez cumplidas estas condiciones y finalizado el tiempo de curado, se pasa a desmoldar las probetas, y seguidamente se procede a su sellado mediante inmersión superficial en parafina fundida. Para finalizar el proceso se rompen las probetas en dos mitades.

A continuación, el proceso de secado se realiza en una estufa con ventilación hasta conseguir una masa constante, lo que será efectivo cuando en dos pesadas consecutivas efectuadas en un intervalo de 24h, la pérdida de masa sea igual o menor del 0,2% de la masa total. En los morteros de renovación solamente se toma nota de la masa seca.

Con las probetas preparadas se comienza el ensayo colocándolas en la bandeja con las caras rotas de las primeras hacia abajo, sobre los soportes antes mencionados para que no toquen el fondo del recipiente, y a continuación se sumergen en agua hasta una altura de 5 mm a 10 mm durante la duración del ensayo (constante). Las probetas se colocan en el agua inclinándolas para asegurar que la inmersión de las probetas con superficie rugosa es completa y evitar burbujas de aire. Una vez realizado este proceso se inicia el cronometro, se cubre la bandeja o recipiente para evitar la evaporación en la superficie de las probetas sumergidas.

Cuando aparezca una traza visible de humedad sobre la superficie libre de las probetas, se suspende el ensayo, y se rompen las probetas para confirmar que están completamente

saturadas. Si lo están, se pesan los trozos ensamblados, si no lo estuvieran se repite el ensayo con nuevas probetas.

Se retiran las probetas del recipiente después de 10 min, y con un paño húmedo se elimina el agua superficial, se pesan las probetas (M1) y se retiran, del recipiente. Se repite el mismo proceso después de 90 minutos y se pesan (M2).

El coeficiente de absorción de agua se calcula mediante esta expresión:

$$C = 0.1 (M2 - M1) \text{ Kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$$

Nomenclatura:

M1: es la masa de la probeta después de una inmersión de 10 min, en gramos (g)

M2: es la masa de la probeta después de una inmersión de 90 min, en gramos(g)

C : es el coeficiente de absorción de agua de una probeta individual de mortero ( $\text{Kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$ )

$C_m$ : es el coeficiente medio de absorción de agua por capilaridad de una probeta individual de mortero ( $\text{Kg}/\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5}$ ).

## ENSAYO 5

## ENSAYO 5.1

**Ensayo según norma UNE-EN 1015-18**

**Ensayo realizado (por un laboratorio independiente)  
sobre 6 probetas normalizadas de argamasa 1:3**

**Determinación de la absorción de agua  
por capilaridad**

### IV. Descripción de las probetas

Este ensayo fue realizado sobre 6 probetas de argamasa parafinadas, todas ellas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm con el fin de determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. Tienen una dosificación de 3 partes de arena, por 2 de agua, y 1 de cal. La compactación se realizó de forma manual mediante 25 golpes. El estado de la muestra es seca. Ensayo realizado en el laboratorio de una empresa de morteros.

### V. Imágenes del ensayo y comentarios



Imagen 77. Imágenes de la materia prima, de la preparación, del molde y de la ejecución de probetas

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO



Imagen 78. Imágenes de la ejecución de probetas para llevar a cabo el ensayo y secado de las mismas.



Imagen 79. Imágenes del proceso de curado de las probetas.

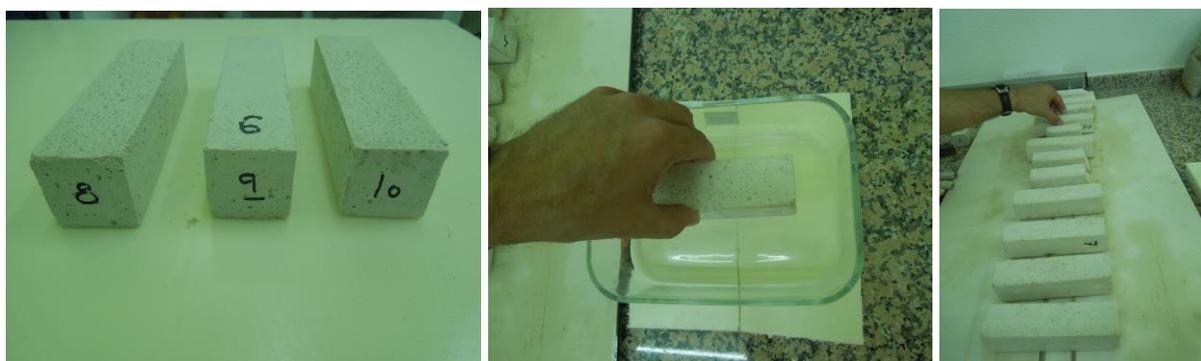


Imagen 80. Imágenes del proceso de parafinado de las probetas.

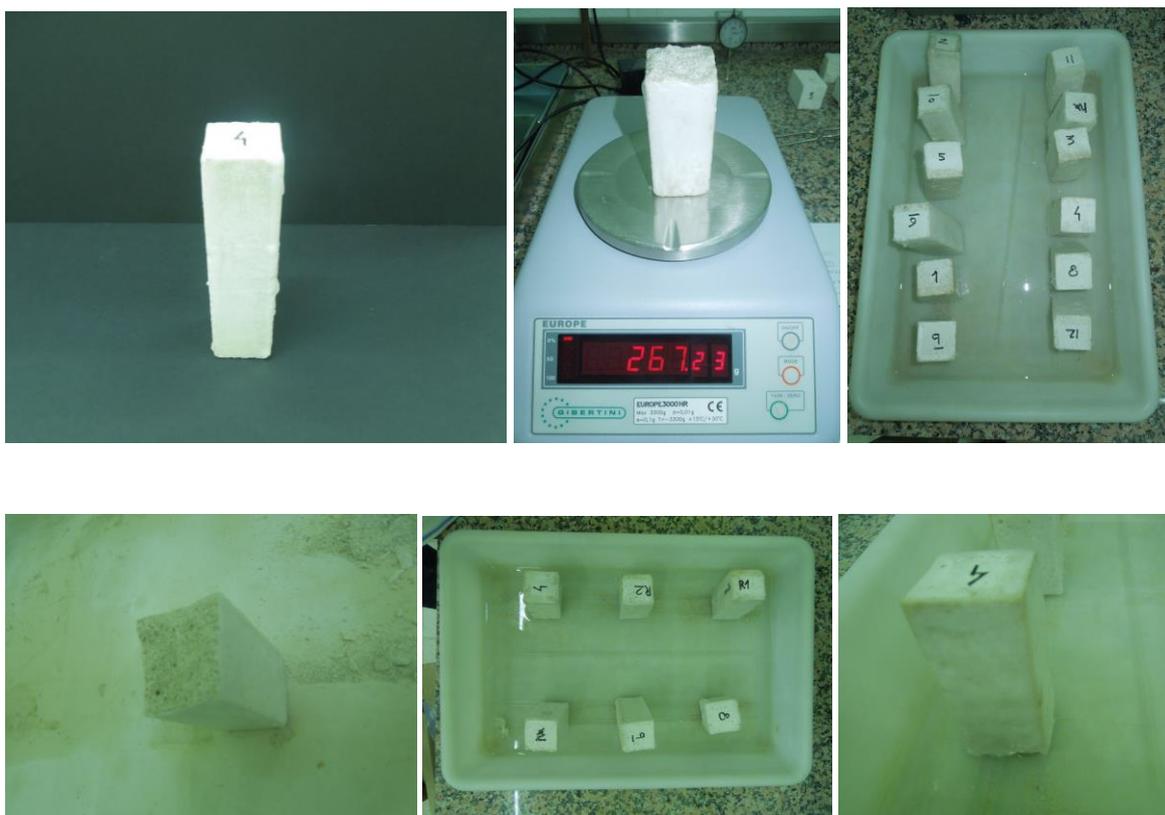


Imagen 81. Imágenes de las probetas durante la ejecución del ensayo.

Todos los procedimientos, como son los de amasado, curado, pesado y otros, así como las dimensiones de las probetas, y todos los descritos en el ensayo se llevaron a cabo siguiendo estrictamente los protocolos establecidos en la norma.

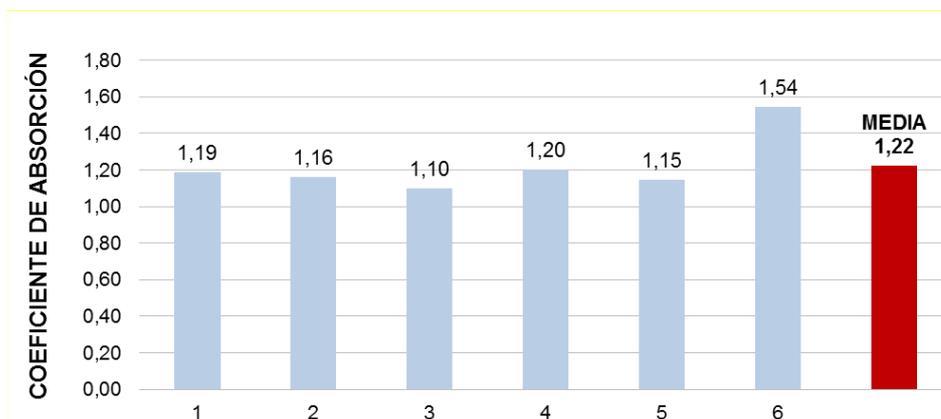
## VI. Datos y expresión de resultados

Nº probeta	Masa después de la inmersión 10 min	Masa después de la inmersión 90 min	Coefficiente de absorción de agua
Símbolo	<b>M1</b>	<b>M2</b>	
Unidad	<b>gr</b>	<b>gr</b>	<b>Kg / (m<sup>2</sup> min<sup>0,5</sup>)</b>
Fórmula			<b>C = 0,1 (M2 - M1)</b>
1	242,00	253,86	1,19
2	259,00	270,61	1,16
3	256,41	267,41	1,10
4	264,22	276,23	1,20
5	257,06	268,51	1,15
6	267,23	282,67	1,54
			<b>1,22</b>

Tabla 28. Tabla de recogida de los datos del ensayo para las probetas prismáticas de argamasa de cal 1/4

Los datos que se recogen son: la masa inicial, la masa a los diez minutos del inicio del proceso de absorción, y la masa final. La inicial, tras someter a las probetas a un proceso de

secado en una estufa, y la final tras un periodo de 90 minutos en los que la probeta está absorbiendo agua por capilaridad por la cara fracturada durante ese tiempo.



Gráfica 16. Gráfica de barras de la tabla 28

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

El valor medio que se obtiene es de **1,22 Kg/(m<sup>2</sup> x min<sup>0,5</sup>)**. Dicho dato es poco significativo en si mismo si no se contrasta con resultados obtenidos en otros ensayos. La comparación entre valores obtenidos para distintas dosificaciones se desarrolla en el siguiente ensayo.

Aunque los valores son bastante cercanos entre sí, hay una probeta que muestra un resultado ligeramente alejado del resto. Esta es la probeta número 6, de la cual obtenemos un resultado de 1,54 Kg/(m<sup>2</sup> x min<sup>0,5</sup>), siendo la media de las otras 5 de 1,16 Kg/(m<sup>2</sup> x min<sup>0,5</sup>). A pesar de ello no se excluye del cálculo ya que se entiende que forma parte de la casuística del estudio de un material, la argamasa, que tiene un componente real de heterogeneidad que ha de ser tenido en cuenta.

## ENSAYO 5

## ENSAYO 5.2

### Ensayo según norma UNE-EN 1015-18

*Ensayo sobre 6+6+6 probetas de argamasa con proporciones 1:2, 1:3 y 1:4 (cal: arena) con todas las caras laterales parafinadas*

*Determinación de la absorción de agua por capilaridad*

#### IV. Descripción de las probetas

Se realizó este ensayo sobre 6+6+6 probetas de argamasa de cal con proporción de cal: arena de la mezcla de 1:2, 1:3 y 1:4. Todas ellas con sus caras laterales parafinadas, y con dimensiones 40 x 40 x 160 mm, con el fin de determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.

#### V. Imágenes del ensayo



Imagen 82. Imágenes de las probetas de argamasa mientras se ejecuta el ensayo.

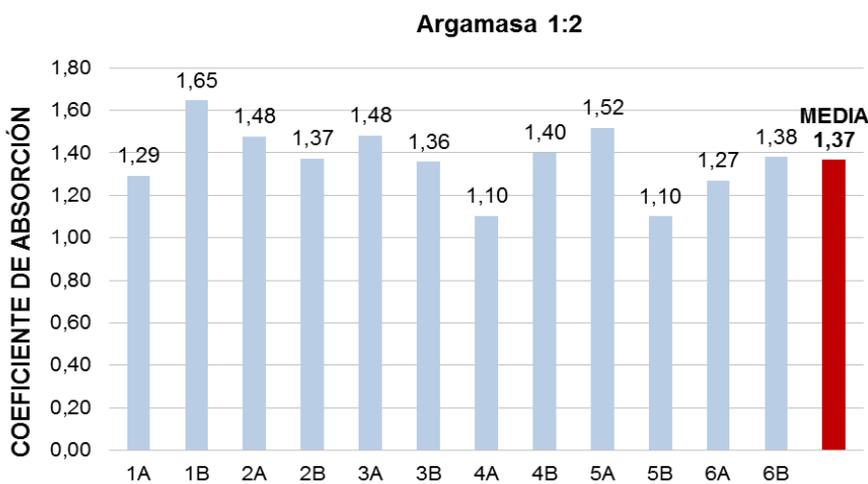
Se aprecian en las fotos las varillas que permiten apoyar las probetas sin que estas toquen el fondo.

## VI. Datos y expresión de resultados

Los datos que se recogen son la masa inicial, masa a los diez minutos y masa final. La inicial, tras someter a las probetas a un proceso de secado en una estufa, y la final tras un periodo de 90 minutos en los que la probeta está absorbiendo agua por capilaridad por la cara fracturada, durante 90 minutos.

Nº probeta	10 Minutos	90 Minutos		Coefficiente de absorción de agua
Símbolo	M1	M2		
Unidad	gr	gr		$\text{Kg} / (\text{m}^2 \text{min}^{0,5})$
Fórmula				$C = 0,1 (M2 - M1)$
1A	230,37	243,29	Argamasa 1:2	1,29
1B	266,12	282,59		1,65
2A	248,95	263,72		1,48
2B	247,83	261,56		1,37
3A	255,00	269,83		1,48
3B	242,04	255,62		1,36
4A	237,05	248,08		1,10
4B	262,80	276,80		1,40
5A	260,06	275,24		1,52
5B	233,17	244,17		1,10
6A	237,84	250,54		1,27
6B	250,49	264,29		1,38
				<b>1,37</b>

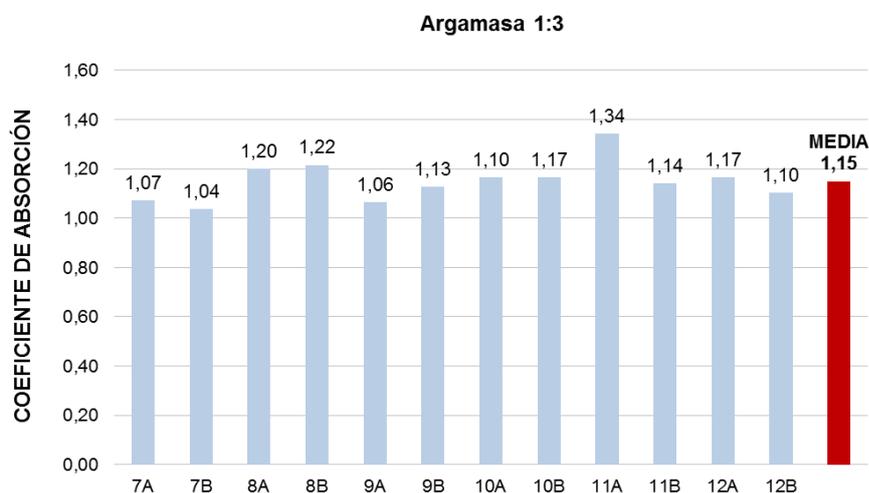
Tabla 29. Tabla que recoge los datos de las probetas hechas con argamasa 1:2



Gráfica 17. Gráfico de barras de la tabla 29

Nº probeta	10 Minutos	90 Minutos	Argamasa 1:3	Coefficiente de absorción de agua
Símbolo	M1	M2		
Unidad	gr	gr		
Fórmula				
7A	265,66	276,38		1,07
7B	238,30	248,68		1,04
8A	263,90	275,90		1,20
8B	235,37	247,53		1,22
9A	247,30	257,94		1,06
9B	239,86	251,14		1,13
10A	244,50	256,17		1,17
10B	248,65	260,32		1,17
11A	256,13	269,55		1,34
11B	235,90	247,30		1,14
12A	244,10	255,75		1,17
12B	247,72	258,75		1,10
				<b>1,15</b>

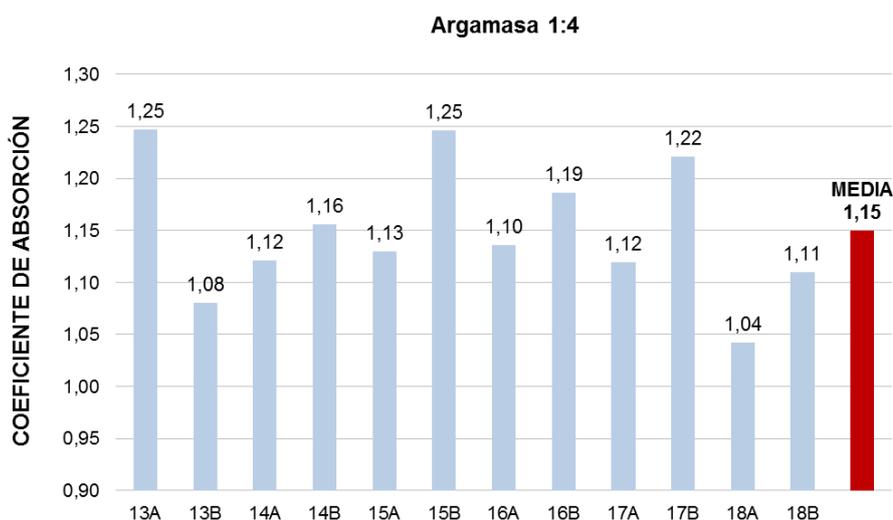
Tabla 30. Tabla que recoge los datos de las probetas hechas con argamasa 1:3



Gráfica 18. Gráfico de barras de la tabla 30

Nº probeta	10 Minutos	90 Minutos	Argamasa 1:4	Coefficiente de absorción de agua
Símbolo	M1	M2		
Unidad	gr	gr		
Fórmula				
13A	265,42	277,89		1,25
13B	242,66	253,46		1,08
14A	246,23	257,44		1,12
14B	253,84	265,40		1,16
15A	257,29	268,59		1,13
15B	259,28	271,74		1,25
16A	254,11	265,47		1,14
16B	257,78	269,64		1,19
17A	254,11	265,30		1,12
17B	264,97	277,18		1,22
18A	261,61	272,03		1,04
18B	241,52	252,62		1,11
				<b>1,15</b>

Tabla 31. Tabla que recoge los datos de las probetas hechas con argamasa 1:4



Gráfica 19. Gráfico de barras de la tabla 31

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Hay que destacar el hecho de que el ensayo 5.1 se realiza por entero en el laboratorio de una empresa de morteros afincada en Valladolid. El resto de ensayos, los descritos en este apartado 5.2 se han realizado, siguiendo los mismos criterios de procedimiento, en el laboratorio de la Escuela de Arquitectura de Valladolid, como así se ha hecho con la mayoría de los ensayos. Es de destacar la proximidad y coherencia entre todos los resultados obtenidos.

Los valores obtenidos en las distintas tandas son bastante cercanos entre sí y la dispersión entre los comportamientos de las probetas con la misma proporción de la mezcla es muy pequeña. Se observa una gran uniformidad de resultados.

El resumen por tanto de este ensayo es:

Proporción <b>1:2</b> dato medio	<b>1,36 Kg/(m<sup>2</sup> x min<sup>0,5</sup>)</b>
Proporción <b>1:3</b> dato medio	<b>1,15 / 1,22 Kg/(m<sup>2</sup> x min<sup>0,5</sup>)</b>
Proporción <b>1:4</b> dato medio	<b>1,15 Kg/(m<sup>2</sup> x min<sup>0,5</sup>)</b>

De lo que se puede deducir que los morteros con proporciones 1:3 y 1:4 tienen un comportamiento más o menos similar, hecho que ocurre con frecuencia en el resto de los ensayos. Para las probetas con proporción 1:2 se obtiene un mayor coeficiente de absorción (en torno a un 18% más alto que en el caso de morteros con proporciones 1:3 y 1:4) para un ensayo realizado en idénticas condiciones de ejecución, como ha sido este, en el que se ha llevado a cabo, con las 18 probetas que conforman la muestra, un procedimiento

exactamente idéntico para todas ellas.

La conclusión más importante es que **a mayor cantidad de cal en la proporción de una argamasa mayor cantidad de agua puede ser absorbida por parte de la misma**. Similar a lo que ya se pudo apreciar en el ensayo 1.1, realizado bajo la norma UNE-EN 772-11, y en el ensayo 3.1, llevado a cabo bajo la norma UNE-EN 15801. En principio es un resultado esperado ya que la cal es capaz de albergar más agua en su interior que el árido.

**ENSAYOS SOBRE PROBETAS DE ARGAMASA Y LADRILLOS PARA  
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE SECA Y LA POROSIDAD  
ABIERTA SEGÚN NORMAS UNE-EN 772-13 Y UNE-EN 772-3**

○ **Ensayo 6**

- **Ensayos sobre argamasa y ladrillo**

**Ensayo 6.1**

**ENSAYO 6**

**ENSAYO 6.1**

**Ensayos de caracterización de los valores de  
Densidad aparente seca y Porosidad abierta  
de las argamasas de cal y ladrillos  
según procedimientos de las normas  
UNE-EN 772-13:2001 y  
UNE-EN 772-3:1999**

**I. Denominación**

Ensayos de caracterización de los valores de densidad aparente seca y porosidad abierta de las argamasas de cal y ladrillos según los procedimientos definidos en las normas *UNE-EN 772-13:2001 Determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería (excepto piedra natural)* y norma *UNE-EN 772-3:1999. Determinación del volumen neto y del porcentaje de huecos por pesada hidrostática de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.*

**II. Objetivo del ensayo**

El objetivo de este ensayo es caracterizar los valores de los materiales utilizados a lo largo de la tesis con el fin de facilitar la comprensión e interpretación de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos. Si bien son ensayos que están destinados a caracterizar ladrillos se han utilizado para argamasas ya que al emplearse el mismo ensayo se entiende que los resultados pueden ser mejor comparados.

Se han analizado ladrillos de dos tipos, los que han sido utilizados en los ensayos de esta tesis, los denominados como ladrillos de "La Operaria" que son ladrillos macizos antiguos de tejar elaborados manualmente, y los ladrillos tipo "Santoveña", que son ladrillos macizos modernos fabricados por extrusión.

Respecto de las argamasas, se han caracterizado varios tipos de ellas.

- Argamasas de cal elaboradas en laboratorio, de proporciones 1:2, 1:3 y 1:4, de dimensiones 40 x 40 x 160 mm, fabricadas en molde.
- Argamasas de cal de proporción 1:3 procedentes del derribo del ensayo 10.1 llevado a cabo sobre cuatro muros.
- Argamasas de cal de recuperación procedentes de muros de edificaciones existentes de una antigüedad en torno a los 100 años.

### III. Procedimiento y descripción del ensayo

Para el desarrollo de los ensayos se secaron en estufa ventilada todas las probetas hasta masa constante a una temperatura de  $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , hasta que entre dos pesadas realizadas con un intervalo de 24 horas no se produce una variación de más de un 0,2% de peso. Una vez estabilizado el peso y anotados los correspondientes valores se procede al cálculo del volumen mediante el uso de la balanza hidrostática según el procedimiento de la norma UNE EN 772-3. Utilizándose las siguientes fórmulas para el cálculo de ambos parámetros:

$$\text{Porosidad abierta} = [ M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}} / M_{\text{sat}} - M_{\text{hidrost}} ] \times 100$$

$$\text{Densidad aparente seca} = [ M_{\text{sec}} / M_{\text{sat}} - M_{\text{hidrost}} ] \times 1000$$

Donde:

$M_{\text{sat}}$  es la masa saturada

$M_{\text{sec}}$  es la masa seca

$M_{\text{hidrost}}$  es la masa obtenida de la pesada con la balanza hidrostática

### IV. Descripción de las probetas

Para los ensayos se han utilizado las siguientes probetas:

Para los ladrillos: - Piezas enteras (dos tipos de ladrillos)

Para las argamasas: - Probetas normalizadas de 40 x 40 x 160 mm (1:2, 1:3 y 1:4)

- Porciones de argamasas procedentes de desmontaje de muros de ensayos y recogidas de edificios antiguos.

## V. Datos y expresión de resultados

Tablas de valores calculados para los ladrillos

MATERIAL: <b>LADRILLO TIPO LA OPERARIA</b>		ENSAYO: <b>DENSIDAD APARENTE SECA /POROSIDAD ABIERTA</b>				
PESO SECO (gr)	PESO SATURADO (gr)	PESO BALANZA HIDROSTÁTICA (gr)	DENSIDAD APARENTE	DENSIDAD AP. SECA MEDIA	POROSIDAD	POROSIDAD AB. MEDIA
1454,90	1691,60	853,00	1.730 kg/m <sup>3</sup>	<b>1.776 kg/m<sup>3</sup></b>	28,20 %	<b>26,60 %</b>
1608,00	1848,00	941,00	1.770 kg/m <sup>3</sup>		26,40 %	
2260,20	2619,70	1326,50	1.750 kg/m <sup>3</sup>		27,80 %	
2228,60	2546,00	1294,00	1.760 kg/m <sup>3</sup>		25,30 %	
2691,90	3068,80	1602,50	1.830 kg/m <sup>3</sup>		25,70 %	
3194,70	3652,10	1901,70	1.820 kg/m <sup>3</sup>		26,10 %	

Tabla 32. Valores de densidad aparente seca y de porosidad abierta de ladrillos "La Operaria"

MATERIAL: <b>LADRILLO TIPO SANTOVEÑA</b>		ENSAYO: <b>DENSIDAD APARENTE SECA /POROSIDAD ABIERTA</b>				
PESO SECO	PESO SATURADO	PESO BALANZA HIDROSTÁTICA	DENSIDAD APARENTE	DENSIDAD AP. SECA MEDIA	POROSIDAD	POROSIDAD AB. MEDIA
1787,40	2023,20	1040,00	1.820 kg/m <sup>3</sup>	<b>1.802 kg/m<sup>3</sup></b>	23,97 %	<b>24,95 %</b>
1736,40	1967,30	1001,50	1.800 kg/m <sup>3</sup>		23,80 %	
1754,10	1986,00	1006,50	1.790 kg/m <sup>3</sup>		23,67 %	
1790,70	2032,00	1044,50	1.810 kg/m <sup>3</sup>		24,50 %	
1828,20	2095,00	1083,50	1.810 kg/m <sup>3</sup>		26,37 %	
1709,20	1972,20	1012,30	1.780 kg/m <sup>3</sup>		27,40 %	

Tabla 33. Valores de densidad aparente seca y de porosidad abierta de ladrillos "Santoveña"

Tablas de valores calculados para las argamasas

MATERIAL: <b>ARGAMASA 1:2, 1:3, 1:4 en PROB. NOMALIZ. 40x40x160</b>		ENSAYO: <b>DENSIDAD APARENTE SECA /POROSIDAD ABIERTA</b>				
PESO SECO	PESO SATURADO	PESO BALANZA HIDROSTÁTICA	DENSIDAD APARENTE	DENSIDAD AP. SECA MEDIA	POROSIDAD	POROSIDAD AB. MEDIA
469,90	526,30	271,90	1.850 kg/m <sup>3</sup>	<b>Argamasa 1:2 1.847 kg/m<sup>3</sup></b>	22,16 %	<b>21,99 %</b>
460,32	515,50	264,80	1.840 kg/m <sup>3</sup>		22,01 %	
468,22	523,50	270,00	1.850 kg/m <sup>3</sup>		21,80 %	

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

466,18	514,30	264,80	1.860 kg/m <sup>3</sup>	<b>Argamasa 1:3</b> <b>1.859 kg/m<sup>3</sup></b>	19,27 %	<b>19,51 %</b>
465,33	514,00	264,70	1.860 kg/m <sup>3</sup>		19,52 %	
461,03	510,10	262,10	1.858 kg/m <sup>3</sup>		19,75 %	
463,40	505,60	252,50	1.830 kg/m <sup>3</sup>	16,67 %	<b>16,62 %</b>	
470,77	512,90	258,50	1.850 kg/m <sup>3</sup>	16,56 %		
477,84	520,70	263,00	1.850 kg/m <sup>3</sup>	16,63 %		

**Tabla 34. Valores de densidad aparente seca y de porosidad abierta de probetas de argamasa 1:2, 1:3 y 1:4**

MATERIAL: <b>ARGAMASA 1:3</b> <b>DESMONTAJE MUROS DEL</b> <b>ENSAYO 10.1</b>		ENSAYO: <b>DENSIDAD APARENTE SECA /POROSIDAD ABIERTA</b>				
PESO SECO	PESO SATURADO	PESO BALANZA HIDROSTÁTICA	DENSIDAD APARENTE	DENSIDAD AP. SECA MEDIA	POROSIDAD	POROSIDAD AB. MEDIA
314,58	354,41	172,30	1.727 kg/m <sup>3</sup>	<b>1.723 kg/m<sup>3</sup></b>	21,87 %	<b>22,04 %</b>
572,64	647,75	311,10	1.700 kg/m <sup>3</sup>		22,31 %	
538,85	609,79	293,50	1.703 kg/m <sup>3</sup>		22,43 %	
432,29	487,09	238,80	1.743 kg/m <sup>3</sup>		22,07 %	
422,27	475,21	231,30	1.731 kg/m <sup>3</sup>		21,70 %	
319,80	360,02	175,80	1.735 kg/m <sup>3</sup>		21,83 %	

**Tabla 35. Valores de densidad aparente seca y de porosidad abierta de porciones de argamasa 1:3 del ensayo 10.1**

MATERIAL: <b>ARGAMASA DE RECUPERACIÓN EDIFICIOS ANTIGUOS</b>		ENSAYO: <b>DENSIDAD APARENTE SECA /POROSIDAD ABIERTA</b>				
PESO SECO	PESO SATURADO	PESO BALANZA HIDROSTÁTICA	DENSIDAD APARENTE	DENSIDAD AP. SECA MEDIA	POROSIDAD	POROSIDAD AB. MEDIA
99,40	114,10	56,30	1.719 kg/m <sup>3</sup>	<b>1.690 kg/m<sup>3</sup></b>	25,43 %	<b>27,26 %</b>
121,10	139,52	68,90	1.714 kg/m <sup>3</sup>		26,08 %	
188,30	217,97	105,40	1.672 kg/m <sup>3</sup>		28,12 %	
83,80	98,30	47,90	1.662 kg/m <sup>3</sup>		28,78 %	
99,30	116,36	57,40	1.684 kg/m <sup>3</sup>		28,93 %	
268,10	310,54	150,10	1.671 kg/m <sup>3</sup>		26,45 %	
354,00	410,07	202,80	1.707 kg/m <sup>3</sup>		27,05 %	

**Tabla 36. Valores de densidad aparente seca y de porosidad abierta de porciones de argamasa procedentes de edificios antiguos**

Tabla resumen de todos los ensayos.

MATERIAL	DENSIDAD APARENTE SECA	POROSIDAD ABIERTA
<b>LADRILLO</b>		
LA OPERARIA	1.776 kg/m <sup>3</sup>	26,60 %
SANTOVEÑA	1.802 kg/m <sup>3</sup>	24,95 %
<b>ARGAMASAS DE CAL</b>		
Probeta 40x40x160 1:2	1.847 kg/m <sup>3</sup>	21,99 %
Probeta 40x40x160 1:3	1.859 kg/m <sup>3</sup>	19,51 %
Probeta 40x40x160 1:4	1.843 kg/m <sup>3</sup>	16,62 %
Desmontaje del ensayo 10.1 (1:3)	1.723 kg/m <sup>3</sup>	22,04 %
Recuperados de edificios	1.690 kg/m <sup>3</sup>	27,26 %

Tabla 37. Tabla resumen de los valores de densidad aparente seca y de porosidad abierta del ensayo 11.1

## VI. Discusión de resultados y conclusiones

Respecto de los valores obtenidos para los ladrillos se observa que los resultados obtenidos para los de la Operaria y Santoveña son bastante similares entre sí.

Respecto de los valores obtenidos para las argamasas de cal se pueden deducir las siguientes conclusiones:

Los datos obtenidos de las probetas ejecutadas en laboratorio son bastante previsibles y coherentes entre sí. Las porosidades son progresivas, de manera que **a mayor cantidad de cal por volumen de argamasa, mayor porosidad**. Lo que indica que las zonas ocupadas por la cal presentan más porosidad que las zonas ocupadas por los áridos.

**Las densidades, sin embargo, son prácticamente idénticas**. Lo cual es también coherente ya que la cal tiene más densidad que la arena de cuarzo, de modo que el volumen de huecos se compensa con la mayor densidad de la cal.

**Los datos de porosidad de las argamasas de probetas normalizadas son más bajos que los obtenidos en las probetas procedentes del ensayo de los cuatro muros y de recuperación de edificios existentes**. Esto es debido a que en los procesos de puesta en obra no se llevan a cabo las operaciones de **compactación** que si se hacen en las probetas normalizadas. Lo mismo que ocurre con los datos de densidad, que son más altos en las muestras

normalizadas, que en las obtenidas del desmontaje y recuperación.

Se comprueba la gran homogeneidad de los valores obtenidos en los ensayos de las probetas normalizadas, y la dispersión en las otras muestras, fruto de la falta de homogeneidad que presenta todo proceso manual de puesta en obra.

La argamasa de cal de recuperación, procedente de edificios antiguos, presenta los valores más bajos de densidad y los más altos de porosidad, fruto sin duda de los procesos de meteorización y pérdida de material de cal por el paso del tiempo. Pero sus valores no son tampoco excesivamente dispares con los del resto de las muestras.

Por último constatar, que los valores obtenidos para las muestras 1:3 de argamasa son bastante aproximados a los de los ladrillos de tejar antiguos, sobre todo en lo que respecta a la densidad. La porosidad es un poco más elevada para los ladrillos que para la argamasa.

## 4.3.3.2. ENSAYOS NO NORMALIZADOS DE DISEÑO PROPIO

### ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE LAS SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS

- **Ensayo 7**
  - Ensayo sobre fábrica                      Ensayo 7.1
  
- **Ensayo 8**
  - Ensayo sobre fábrica                      Ensayo 8.1

## ENSAYO 7

## ENSAYO 7.1

**Determinación de la relación entre los datos  
obtenidos de las sondas termohigrométricas y la  
cantidad de agua contenida en una probeta de fábrica**

### I. Denominación

Ensayo para la determinación de la relación entre los datos de humedad obtenidos de las sondas termohigrométricas y la cantidad de agua contenida en una probeta de fábrica.

### II. Objetivo del ensayo

El objetivo específico del ensayo era intentar establecer la relación lo más exacta posible entre el valor de humedad en tanto por ciento que se obtenía de las sondas termohigrométricas y la cantidad real de agua que tenía dicha probeta. Aunque no era el objetivo principal, también sirvió para conocer la cantidad máxima de agua que es capaz de absorber dicha probeta, y por extensión una fábrica.

### III. Procedimiento y descripción del ensayo

Para llevar a cabo este ensayo se utilizaron seis ladrillos de tejar de La Operaria y se elaboró argamasa de cal a base de: cal aérea, arena de río lavada y agua. La proporción fue de 1:3 (cal/arena). Se utilizó también una base metálica con asas sobre la que se ejecutó la probeta con el fin de poder desplazarla para realizar las correspondientes pesadas.

Una vez recopilados y elaborados los materiales descritos se procedió en primer lugar al secado en estufa (a 100° C) hasta peso constante de los seis ladrillos utilizados. Con este procedimiento se determinó cual era el peso de cada ladrillo.

Posteriormente se determinó según la norma UNE-EN 772-7 la absorción de agua por inmersión, hasta peso constante. Con este procedimiento se pudo deducir la cantidad máxima de agua que era capaz de absorber cada ladrillo. Con los ladrillos totalmente

saturados se ejecutó la probeta. Para ello se realizó la masa, pesándose cada uno de los componentes: agua, cal y arena, por separado. La probeta se ejecutó usando seis ladrillos de tejar modelo "La Operaria" y mortero de cal en proporciones 1/3. Con este procedimiento se pudo determinar con bastante exactitud la cantidad de agua que contenía la probeta ejecutada. Los pesos iniciales de partida fueron:

Pesos:	- Cal + Arena:	9.286,59 gr
	- Agua:	3.850,41 gr
	- Ladrillo:	13.885,00 gr
	- TOTAL PROBETA:	27.022,00 gr

Una vez hecha la argamasa se procedió a la ejecución de la probeta. Se realizó sobre un bastidor metálico, lo que permitía moverla para su pesado. Para su ejecución se colocó una primera hilada de masa y sobre ella se colocaron dos ladrillos adosados por su soga formando una base cuadrada de un asta de lado. Sobre ésta hilada se colocaron otros dos ladrillos contrapeados, y sobre ésta otros dos también contrapeados.

Pasados dos días para que la masa endureciese lo suficiente, se realizó un taladro en la soga de uno de los dos ladrillos que conformaban la hilada central hasta el centro de la probeta. En dicha perforación se colocó el extremo de una sonda termohigrométrica para la toma de datos de temperatura y humedad. El procedimiento operatorio para la toma de datos fue el siguiente:

1. Pesar la probeta cada 24 horas.
2. Toma de datos de humedad y temperatura de la sonda cada hora en la perforación.
3. El ensayo se dio por concluido cuando el dato de humedad de la probeta se estabilizó con el dato de la humedad del laboratorio y el peso era constante con variaciones en 24 horas menores del 0,1.

#### IV. Descripción de la probeta

La probeta se levantó sobre un soporte metálico de dimensiones 500 x 400 mm, y con peso de 6.508 gr. Los datos y dimensiones de la probeta de fábrica fueron:

Medidas de los ladrillos:	dimensión media: 282 x 143 x 48 mm
Modelo de los ladrillos:	de tejar antiguo de elaboración manual tipo "La Operaria"
Procedencia de los ladrillos:	de recuperación de edificio antiguo
Medidas de los tendeles:	30 mm aprox.

Medidas de las llagas:	30 mm aprox.
Medidas de la probeta:	280 x 280 x 200 mm aproximadamente
Volumen de la probeta:	15,68 dm <sup>3</sup>
Peso de cada ladrillo (gr) :	2.100,3/2.154,7/2.280,3
(en seco)	2.394,1/2.478,3/2.477,3
Peso de la probeta saturada:	27.022,00 gr

## V. Imágenes del ensayo



Imagen 83. Imagen de las materias primas, cal y arena y foto del proceso de ejecución.



Imagen 84. Imagen de la probeta una vez realizada.

Se puso especial cuidado en que todos los materiales que se emplearon en el ensayo y que fueron pesados uno por uno, quedasen en todo momento dentro de la base, con el fin de conocer con la mayor precisión posible la cantidad de agua que se iba evaporando de la probeta y que la pérdida de peso fuese exclusivamente la relativa al agua contenida.

## VI. Datos y expresión de resultados

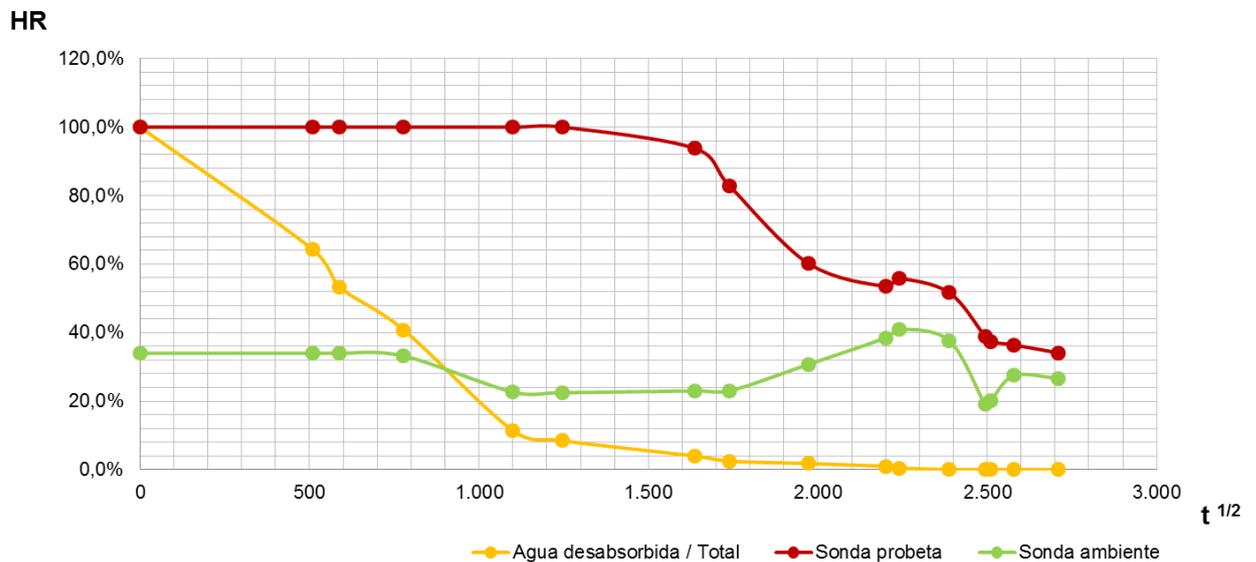
A continuación se muestra una tabla con los siguientes datos: tiempo, desorción de la probeta en gramos, porcentaje de agua evaporada respecto del total y datos de humedad

en tanto por ciento obtenidos de la sonda termohigrométrica y de la estación de toma los datos de ambiente. Se representa en la gráfica, con líneas de distinto color, la variación del porcentaje de humedad de:

- Línea roja: valor de humedad en tanto por ciento suministrado por sonda.
- Línea azul: porcentaje de agua respecto del total que queda en la probeta.
- Línea verde: valor de humedad en tanto por ciento del ambiente.

Fecha	Hora	Tiempo	Masa	Cantidad de agua desabsorbida		Cantidad de agua	Agua desabsorbida / Peso en seco	Desorción de agua / Agua total	Sonda probeta		Sonda ambiente		
				Parcial	Total				HR	T	HR	T	
Símbolo		$t^{1/2}$		gr	gr	gr	kg/kg	%	%	%	°C	%	°C
Unidad		sg	gr	gr	gr	gr	%	%	%	°C	%	°C	
15/11/2010	9:30	0	27.022	0	0	4.010	0,0%	100,0%	100,0%	19,3	34,0%	20,1	
18/11/2010	9:30	509	25.592	1.430	1.430	2.580	6,2%	64,3%	100,0%	20,1	34,0%	21,0	
19/11/2010	9:30	588	25.152	440	1.870	2.140	8,1%	53,4%	100,0%	21,1	34,0%	22,2	
22/11/2010	9:50	778	24.648	504	2.374	1.636	10,3%	40,8%	100,0%	20,0	33,2%	23,4	
29/11/2010	17:45	1.100	23.472	1.176	3.550	460	15,4%	11,5%	100,0%	23,0	22,7%	24,7	
03/12/2010	12:00	1.247	23.352	120	3.670	340	15,9%	8,5%	100,0%	23,0	22,5%	24,8	
16/12/2010	12:00	1.637	23.172	180	3.850	160	16,7%	4,0%	93,8%	22,9	23,0%	24,8	
20/12/2010	12:25	1.739	23.112	60	3.910	100	17,0%	2,5%	82,9%	23,4	23,0%	24,9	
30/12/2010	12:00	1.972	23.084	28	3.938	72	17,1%	1,8%	60,2%	21,6	30,8%	23,1	
10/01/2011	10:30	2.200	23.052	32	3.970	40	17,3%	1,0%	53,5%	18,7	38,5%	21,5	
12/01/2018	13:00	2.239	23.032	20	3.990	20	17,3%	0,5%	55,8%	20,0	41,0%	21,4	
20/01/2011	11:15	2.388	23.014	18	4.008	2	17,4%	0,1%	51,7%	20,4	37,7%	23,0	
26/01/2011	13:00	2.494	23.012	2	4.010	0	17,4%	0,1%	38,8%	24,4	19,1%	24,6	
27/01/2011	9:20	2.511	23.012	0	4.010	0	17,4%	0,1%	37,3%	24,0	20,2%	25,9	
31/01/2011	11:30	2.579	23.012	0	4.010	0	17,4%	0,1%	36,4%	21,2	27,5%	24,1	
08/02/2011	13:10	2.710	23.012	0	4.010	0	17,4%	0,1%	34,1%	22,8	26,7%	24,5	

Tabla 38. Recogida de datos de la sonda introducida en la probeta, de la sonda ambiente y de las pesadas



Gráfica 20. Gráfico correspondiente a la tabla 38

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Del análisis de los valores de la tabla se puede concluir como dato relevante del ensayo y que era en principio uno de los objetivos del mismo, que se puede establecer una cierta correlación o aproximación entre los datos suministrados por la sonda y el agua contenida

en la probeta.

En la tabla adjunta se puede ver la correlación de valores entre los datos recibidos de la sonda y la cantidad de agua contenida en la probeta.

Cantidad en gr de agua evaporada (de una total de 4010 gramos)	Porcentaje de agua evaporada respecto del inicial	Dato de humedad en % que marca la sonda	Cantidad de agua en gramos que queda en la probeta por encima del estado de equilibrio	Cantidad de agua que tiene la probeta en l/m <sup>3</sup> por encima del estado de equilibrio
0	0 %	<b>100 %</b>	4010	<b>255,0 l/m<sup>3</sup></b>
3720	92 %	<b>99 %</b>	290	<b>18,0 l/m<sup>3</sup></b>
3853	96 %	<b>90 %</b>	157	<b>10,0 l/m<sup>3</sup></b>
3912	97,5 %	<b>80 %</b>	98	<b>6,3 l/m<sup>3</sup></b>
3938	98,2 %	<b>60 %</b>	72	<b>4,6 l/m<sup>3</sup></b>
4008	99,9 %	<b>50 %</b>	2	<b>1,3 l/m<sup>3</sup></b>

**Tabla 39. Tabla que muestra los porcentajes de agua, porcentajes de humedad y cantidad de agua contenida**

En ensayos realizados por el equipo de investigación y expuestos en el 9th International Masonry Conference 2014 en Guimarães<sup>82</sup>, se concluye que los datos de absorción máxima de agua por inmersión en agua fría para la argamasa están entre los 172 a 214 l/m<sup>3</sup> (litros por metro cúbico de argamasa) dependiendo del porcentaje de la mezcla (1:4, 1:3 y 1:2) y entre los 185 a 250 l/m<sup>3</sup> (litros por metro cúbico de ladrillo) según el ensayo 4.2; y de 288 l/m<sup>3</sup> para el ladrillo. Lo que permite concluir que el dato de 255 l/m<sup>3</sup> (litros por metro cúbico de fábrica), que nos da en este ensayo para la probeta, suma de ladrillo más argamasa, es perfectamente coherente.

Del análisis de la gráfica se deducen también otras conclusiones interesantes:

1. Hasta que la probeta no ha tenido una **desorción en torno al 90%** de la capacidad máxima de agua que puede contener, este tipo de sondas no marcan datos por debajo del 100%. Expresado de otra manera, este tipo de sondas sólo suministra datos cuando la muestra contiene menos del 10% de la cantidad máxima de agua capaz de albergar.
2. Que la detección de la presencia de agua con este tipo de sondas **es efectiva para cantidades muy pequeñas de agua**. Que es, por cierto, lo que ocurre normalmente cuando estamos ligeramente por encima de la cota del terreno.

<sup>82</sup> LLORENTE, A., CAMINO, M.S., LEON, J., OLIVAR, J.M.: "Contribution of lime and sand mortar in the process of capillary water absorption in old brick masonry". Actas del 9th International Masonry Conference 2014. Universidad de Minho. International Masonry Society. Guimarães, 2014.

3. Cuando la probeta ha perdido gran cantidad de agua, **los datos de humedad de la sonda y los del ambiente van acompasados**. Es decir que para valores muy bajos de humedad en las fábricas hay que tener en cuenta los valores del ambiente si estos son muy extremos, tanto en valores de temperatura como de humedad.
4. De lo observado en este ensayo, se puede prever que **las variaciones ambientales tienen una influencia casi nula en el aporte de humedad en la fábrica**, en línea con lo observado en el ensayo 15. Sin embargo, y parece lógico, si van a influir en la tasa de evaporación, lo cual a su vez influirá en la altura alcanzada por el frente húmedo y en el tiempo en los procesos de secado.
5. Se puede establecer una cierta **correlación entre los datos de humedad en % obtenidos por la sonda termohigrométrica y la cantidad de agua en l/m<sup>3</sup> de una fábrica**.

**ENSAYO 8**

**ENSAYO 8.1**

**Determinación de la relación entre los datos  
obtenidos de las sondas termohigrométricas y la  
cantidad de agua contenida en una probeta de fábrica**

**I. Denominación**

Ensayo para la determinación de la relación entre los datos obtenidos de las sondas termohigrométricas y la cantidad de agua contenida en una probeta de fábrica.

**II. Objetivo del ensayo**

El objetivo de este ensayo era el mismo que el del ensayo anterior, intentar establecer una relación lo más exacta posible entre el valor de humedad en tanto por ciento suministrado por las sondas termohigrométricas y la cantidad real de agua que tenía dicha probeta.

La diferencia es que en el ensayo anterior partíamos de la pesada exacta de todos los materiales que conformaban la probeta, y en este caso una vez hecha ésta, se procedió a secarla en estufa para posteriormente saturarla por inmersión y así conocer la cantidad de agua contenida. De este modo, y mediante pesadas periódicas, se pudo conocer la cantidad exacta de agua que contenía la probeta en cada momento y cotejar ese dato con el dato de humedad que marcaba la sonda.

Otro de los objetivos del ensayo era el de tener al menos dos ensayos similares con el fin de poder compararlos y ver si las conclusiones eran equivalentes para ambos con el fin de darlos por válidos.

**III. Procedimiento y descripción del ensayo**

Para llevar a cabo este ensayo se necesitaron tres ladrillos de tejar de la Operaria y la ejecución de argamasa de cal a base de: cal, hidróxido de calcio CL-90 S; arena de río lavada y agua.

Una vez realizada la argamasa en proporción 1/3 (cal/arena), se procedió a la ejecución de la probeta. Se colocó sobre el primer ladrillo, que hace de base, una primera hilada de argamasa y sobre ella se colocan otros dos ladrillos, adosados por su tabla, con junta de mortero entre ellos de aproximadamente 30 mm de espesor.

Una vez ejecutada la probeta, se dejan pasar unos días hasta que el mortero endurece lo suficiente y se procede a la ejecución de un taladro en el ladrillo intermedio, en el que introduciremos una sonda para la toma de datos de temperatura y humedad. Comenzó el ensayo el 2 de mayo de 2011 y terminó el 11 de julio de ese mismo año.

El procedimiento fue el siguiente. Una vez ejecutada la probeta, se procede al secado en estufa (a 100° C) hasta peso constante. La probeta seca pesó 11.954,20 gr. Posteriormente se saca la probeta de la estufa y se introduce la sonda en la perforación dentro de la probeta, para la toma de datos. Durante unos días, y mediante pesadas, se mide la cantidad de agua que la probeta es capaz de absorber del ambiente. Se toman pesadas hasta que se estabiliza el peso de la muestra y se observa que hay una cantidad poco apreciable de agua que es aportada por el ambiente, concretamente 13,4 gramos. Esto equivale a unos 2 litros por metro cúbico de fábrica, para las condiciones ambientales del laboratorio, que están en valores aproximadamente en torno a los 21 y 24 grados centígrados y en valores entre 45 y 55 por ciento de humedad relativa. Una vez estabilizado el peso de la probeta (cuando ha absorbido toda el agua posible del ambiente), se introduce, por inmersión completa, en un recipiente con agua, con el fin de saturarla. Se pesa cada 24 horas, hasta que no presenta variación de peso alcanzando los 13.193,60 gr, es decir ha sido capaz de absorber 1.436,10 gr de agua, lo que equivale a unos 185 l/m<sup>3</sup>. Una vez alcanzada la saturación, se saca la probeta del recipiente, se coloca una sonda (calibrada para tomar datos de temperatura y humedad cada hora) y se hacen pesadas cada 24 horas con el fin de tomar mediciones para ver la evolución en el proceso de secado. El ensayo se da por concluido cuando el dato de la humedad de la probeta se estabiliza con el dato de la humedad del laboratorio, y el peso es constante.

#### **IV. Descripción de la probeta**

Los datos y dimensiones de la probeta de fábrica fueron:

Medidas de la probeta:	278 x 140 x 201 mm
Medidas de los ladrillos:	dimensión media: 278 x 140 x 47 mm
Modelo de los ladrillos:	tejar antiguo de elaboración manual tipo "La Operaria"
Procedencia de los ladrillos:	de recuperación de edificio antiguo
Medidas de los tendeles:	30 mm

Volumen de la probeta: 7,82 dm<sup>3</sup>  
Peso de la probeta: Seco: 11.757,50 gr  
Saturado: 13.193,60 gr

## V. Imágenes del ensayo



Imagen 85. Imagen de la probeta sumergida en agua fría.



Imagen 86. Imagen de la probeta una vez extraída del agua y comenzando el proceso de desorción y sonda termohigrométrica tomado datos de humedad y temperatura en perforación.

## VI. Datos y expresión de resultados

A continuación se muestra una tabla con los siguientes datos: tiempo, desorción de la probeta en gramos, porcentaje de agua evaporada respecto del total y datos de humedad en tanto por ciento obtenidos de la sonda termohigrométrica y de la estación de toma los datos de ambiente. Se representa en la gráfica, con líneas de distinto color, la variación del porcentaje de humedad de:

- Línea roja: valor de humedad en tanto por ciento suministrado por sonda.
- Línea azul: porcentaje de agua respecto del total que queda en la probeta.
- Línea verde: valor de humedad en tanto por ciento del ambiente.

Fecha	Hora	Tiempo	Masa	Cantidad de agua desabsorbida		Cantidad de agua Total	Agua desabsorbida / Peso en seco	Desorción de agua / Agua total	Sonda probeta		Sonda ambiente	
				Parcial	Total				HR	T	HR	T
Símbolo		t <sup>1/2</sup>		gr	gr	gr	kg/kg	%	%	°C	%	°C
12/05/2011	12:30	0	13.193,6	0,0	0,0	1.406	0,0%	100,0%	99,9%		46,6%	21,2
16/05/2011	10:00	580	12.506,6	687,0	687,0	719	5,8%	52,2%	99,9%	17,7	46,6%	21,2
	11:00	583	12.498,5	8,1	695,1	711	5,9%	51,6%	99,9%	17,8	46,5%	21,7
17/05/2011	9:00	650	12.371,6	126,9	822,0	584	6,9%	42,8%	99,9%	18,9	49,3%	21,1
	13:30	663	12.350,9	20,7	842,7	564	7,1%	41,3%	99,9%	19,2	47,6%	21,9
18/05/2011	9:30	715	12.275,7	75,2	917,9	489	7,7%	36,1%	99,9%	19,3	49,5%	21,2
19/05/2011	9:30	773	12.207,1	68,6	986,5	420	8,3%	31,3%	99,9%	19,5	56,3%	21,4
20/05/2011	9:00	826	12.154,2	52,9	1.039,4	367	8,8%	27,6%	99,9%	20,3	54,5%	21,3
23/05/2011	8:55	970	12.050,3	103,9	1.143,3	263	9,6%	20,4%	99,9%	21,1	54,9%	21,7
24/05/2011	9:00	1.014	12.024,4	25,9	1.169,2	237	9,9%	18,6%	99,9%	21,3	53,0%	22,1
25/05/2011	9:10	1.056	12.001,6	22,8	1.192,0	214	10,1%	17,0%	99,9%	21,9	54,0%	22,3
26/05/2011	9:00	1.096	11.981,4	20,2	1.212,2	194	10,2%	15,6%	99,9%	22,0	53,2%	22,4
27/05/2011	9:04	1.134	11.962,2	19,2	1.231,4	175	10,4%	14,3%	99,9%	21,1	53,2%	22,5
30/05/2011	9:00	1.243	11.917,3	44,9	1.276,3	130	10,8%	11,1%	99,9%	22,2	53,6%	22,4
31/05/2011	8:51	1.277	11.905,1	12,2	1.288,5	118	10,9%	10,3%	99,9%	22,1	54,7%	22,2
01/06/2011	9:16	1.311	11.892,5	12,6	1.301,1	105	11,0%	9,4%	99,9%	21,6	51,3%	21,8
02/06/2011	8:56	1.343	11.880,8	11,7	1.312,8	94	11,1%	8,6%	99,9%	21,2	49,0%	21,5
03/06/2011	9:10	1.376	11.870,7	10,1	1.322,9	84	11,2%	7,9%	99,9%	20,8	49,7%	21,2
06/06/2011	9:03	1.467	11.848,1	22,6	1.345,5	61	11,4%	6,3%	99,9%	21,3	54,1%	21,5
17/06/2011	9:00	1.761	11.799,2	48,9	1.394,4	12	11,8%	2,9%	99,9%	22,0	53,2%	22,2
20/06/2011	9:00	1.833	11.792,6	6,6	1.401,0	5	11,8%	2,4%	91,0%	22,6	51,2%	22,8
22/06/2011	9:00	1.880	11.790,0	2,6	1.403,6	3	11,8%	2,3%	74,4%	23,4	50,4%	23,7
27/06/2011	9:00	1.991	11.787,0	3,0	1.406,6	0	11,9%	2,1%	57,4%	24,5	49,5%	24,7
30/06/2011	9:00	2.055	11.786,6	0,4	1.407,0	-1	11,9%	2,0%	53,2%	23,9	49,6%	24,0
01/07/2011	9:00	2.076	11.787,7	-1,1	1.405,9	1	11,9%	2,1%	52,9%	23,8	50,1%	24,0
05/07/2011	9:00	2.158	11.787,2	0,5	1.406,4	0	11,9%	2,1%	52,7%	24,0	50,3%	24,2

Tabla 40. Recogida de datos de la sonda introducida en la probeta, de la sonda ambiente y de las pesadas



Gráfica 21. Gráfico correspondiente a la tabla 40

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Del análisis de los datos de la tabla se puede concluir, como en el ensayo anterior, como dato relevante del ensayo y que era en principio el objeto del mismo, la relación entre los datos obtenidos por este tipo de sondas y el agua contenida en la probeta.

En la tabla adjunta se puede ver la correlación de valores entre los valores de humedad recibidos de la sonda y la cantidad de agua que contiene la probeta de fábrica analizada.

Cantidad en gr de agua evaporada (de una total de 1436 gramos)	Porcentaje de agua evaporada respecto del inicial	Dato de humedad en % que marca la sonda	Cantidad de agua en gramos que queda en la probeta.	Cantidad de agua que tiene la probeta en l/m <sup>3</sup>
0	0 %	<b>100 %</b>	1436	<b>223,6 l/m<sup>3</sup></b>
1394	97,1 %	<b>99 %</b>	42	<b>6,5 l/m<sup>3</sup></b>
1401	97,5 %	<b>90 %</b>	35	<b>5,4 l/m<sup>3</sup></b>
1402	97,6 %	<b>80 %</b>	34	<b>5,3 l/m<sup>3</sup></b>
1405	97,9 %	<b>60 %</b>	31	<b>4,8 l/m<sup>3</sup></b>
1408	98,2 %	<b>50 %</b>	28	<b>4,3 l/m<sup>3</sup></b>

**Tabla 41. Tabla que muestra los porcentajes de agua, porcentajes de humedad y cantidad de agua contenida**

Es interesante ver la relación entre los datos de las sondas y el contenido real de agua en las fábricas comparando los datos de estos dos ensayos (ensayo 7.1 y 8.1) con el de los cuatro muros en el ensayo 10.1.

Respecto al ensayo anterior se puede deducir, y así se verá en la comparación con el ensayo realizado sobre los 4 muros, que cuanto más grande es la probeta más fiabilidad tienen los datos obtenidos por la sondas.

Respecto de la cantidad máxima de agua que puede contener una probeta, ocurre lo mismo que con el ensayo anterior, si bien con menos proporción de agua por m<sup>3</sup>. Hay que tener en cuenta que en este ensayo la relación entre el volumen de la argamasa y el ladrillo es distinta a la del ensayo anterior, el ensayo 7.1.

Del análisis de la gráfica se deducen algunas conclusiones interesantes, y similares a las descritas en el ensayo anterior:

1. El comportamiento de las gráficas en estos dos ensayos, 7.1 y 8.1, es muy similar.

2. En este caso hasta que la probeta no ha tenido un proceso de desorción en torno al 97% de la capacidad máxima de agua que puede contener, las sondas no marcan datos por debajo del 100%.
  
3. Como en el ensayo anterior, cuando la probeta ha perdido gran cantidad de agua, los datos de humedad de la sonda introducida en ella y los del ambiente van acompasados y también se observa que las variaciones de la humedad ambiente prácticamente no afectan a los datos de la probeta. Durante el desarrollo de este ensayo la humedad del ambiente ha sido un poco más elevada.

## **ENSAYO PREVIO DE OBSERVACIÓN DEL PROCESO DE CAPILARIDAD Y DE COMPROBACIÓN DE LA EFICACIA DE LA BARRERA HIDRÓFUGA**

- **Ensayo 9**

- Ensayo sobre fábrica

Ensayo 9.1

**ENSAYO 9**

**ENSAYO 9.1**

***Ensayo previo de observación del proceso  
de capilaridad y de comprobación de la  
eficacia de la barrera hidrófuga***

**I. Denominación**

Ensayo previo de observación del proceso de capilaridad y de comprobación de la eficacia de la barrera hidrófuga.

**II. Objetivo del ensayo**

El ensayo tiene como objetivo comprobar la eficacia de las barreras químicas de corte hídrico a base de productos hidrofugantes en fábricas de ladrillo frente a la entrada de agua por capilaridad. Los ensayos realizados con fábricas conllevan periodos de tiempo muy extensos, sobre todo por lo lento de los procesos de secado. Por este motivo y antes de ensayar en muros de mayores dimensiones se realiza este ensayo a menor escala, con el fin de comprobar experimentalmente, por una parte, cómo son los procesos de ascensión de humedad por capilaridad, y por otro, el grado de eficacia de las barreras químicas como método de corte hídrico a dicha ascensión capilar del agua. Otra de las intenciones del ensayo era comprobar si era posible hacer un seguimiento del proceso de la subida del agua mediante las sondas.

Para alcanzar dicho objetivo, se diseñó este ensayo que consistió en observar y analizar la ascensión capilar del agua sobre una probeta de fábrica antes y después de proceder a la hidrofugación de la zona de la base. Para ello se procedió a la impregnación con producto hidrofugante de dos de los tendeles inferiores ejecutados con argamasa de cal.

**III. Procedimiento y descripción del ensayo**

Para la ejecución de este ensayo se procedió a la fabricación de una probeta con una base de dimensiones de  $\frac{1}{2}$  asta por un asta y media, y seis hiladas de altura. La argamasa se realizó con una mezcla en volumen de 3 partes de arena, 2 de agua y una de cal, amasada manualmente. Los ladrillos utilizados para este ensayo fueron macizos imitación a los de tejar

y fabricados por procesos de extrusión. Los medios ladrillos se cortaron con máquina de corte radial con aporte de chorro de agua.

La probeta se fabricó dentro un recipiente de plástico y apoyada sobre una cama de arena de unos 50 mm de espesor, que cubría toda la base del recipiente. Sobre la cama de arena se colocó en primer lugar una capa de argamasa de cal, y sobre ella se fue ejecutando el murete.

Cuando la argamasa endureció lo suficiente se procedió a la ejecución de taladros en ambas caras del murete en momentos distintos, unas van a servir para introducir en ellas las sondas termohigrométricas y otras tenían como función la introducción del producto hidrofugante con el que se perseguía la formación de la barrera de corte hídrico que detuviese la ascensión capilar de la humedad proveniente de la base.

Primero se hicieron cuatro taladros (hasta 2/3 de profundidad) en una de las caras, en los ladrillos de las hiladas segunda, tercera, cuarta y quinta empezando a contar desde la base. Estas perforaciones tenían como misión introducir en ellas las sondas termohigrométricas con el fin de tomar datos de humedad y temperatura, y poder observar la evolución de la capilaridad.

Una vez ejecutado el murete y hechas las perforaciones mencionadas, se procedió a introducir sondas termohigrométricas en cada uno de los taladros efectuados en los ladrillos. Se programaron las sondas para que los datos de humedad y temperatura se registrasen con una periodicidad de una hora. Pasado un tiempo se comprobó que los valores suministrados por las sondas introducidas en las perforaciones de la probeta eran más o menos similares a los valores de temperatura y humedad que se obtenían del ambiente. Esto indicaba que el proceso de secado prácticamente había concluido.

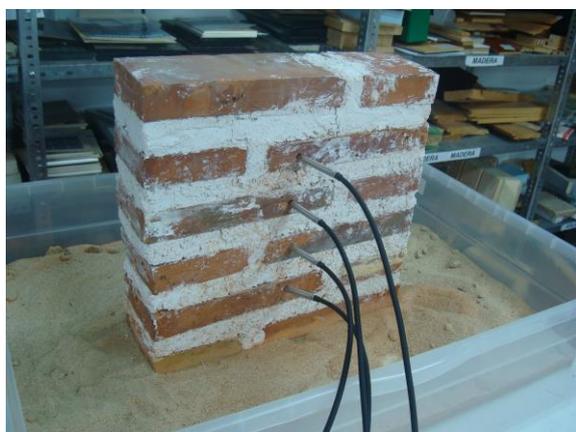


Imagen 87. Imagen del murete una vez finalizado y en la primera fase de secado

Finalizado el proceso de secado de la probeta se procedió a llenar de agua el recipiente

hasta saturar totalmente la cama de arena. La humedad comenzó a subir por capilaridad hasta que la sonda situada en la perforación más alta nos indicó que el frente húmedo había alcanzado dicha cota. Esta operación se hizo con el fin de contrastar esta fase con la siguiente en la que se procedería al tratamiento con producto hidrofugante.



**Imagen 111. Imagen del murete en el 1º proceso de mojado**

La siguiente fase consistió en la hidrofugación de la base. Para ello, por la cara opuesta a la que se taladró anteriormente se ejecutaron en los tendeles 5 taladros hasta 2/3 de profundidad del muro. Tres de las perforaciones se ejecutaron en el tendel situado entre la primera y la segunda de las hiladas inferiores, y otras dos entre las siguientes hiladas, la segunda y la tercera. En estos taladros se procedió a inyectar por gravedad el producto hidrofugante. La inyección se realizó usando unas bolsas de plástico llenas del producto de las que salían unas gomas cuyos extremos se introdujeron en los taladros hechos en la argamasa. La unión entre la perforación y las gomas se selló con silicona con el fin de que el producto impregnase lentamente los tendeles de argamasa. La inyección de este producto eleva de nuevo los datos de humedad que suministran las sondas introducidas en el murete, por lo que se debe dejar de nuevo pasar un tiempo hasta que la humedad vuelve a bajar de nuevo.



**Imagen 112. Sellado de las perforaciones y proceso de hidrofugación por gravedad**

Una vez ha descendido la humedad, se procede de nuevo al llenado de agua de la cubeta observando los datos que se van registrando y comprobando como ciertamente estos datos muestran unos valores mucho más bajos que los obtenidos antes de la hidrofugación certificando así la eficacia de la barrera química. Comenzó el ensayo en febrero de 2010 y finalizó en julio de 2011.



Imagen 88. Imagen del murete con sondas tomando datos una vez ejecutada la barrera hidrófuga.

#### IV. Descripción de la probeta

La probeta ensayada, ejecutada con ladrillos macizos por extrusión, imitación a rústicos y recibidos con argamasa de cal, tenía las siguientes características y dimensiones:

Medidas de la probeta:	110 x 380 x 385 mm
Medidas de los ladrillos:	dimensión media: 240 x 107 x 38 mm
Medidas de los tendeles:	30 mm aproximadamente
Medidas de las llagas:	30 mm aproximadamente

#### V. Imágenes del ensayo y comentarios

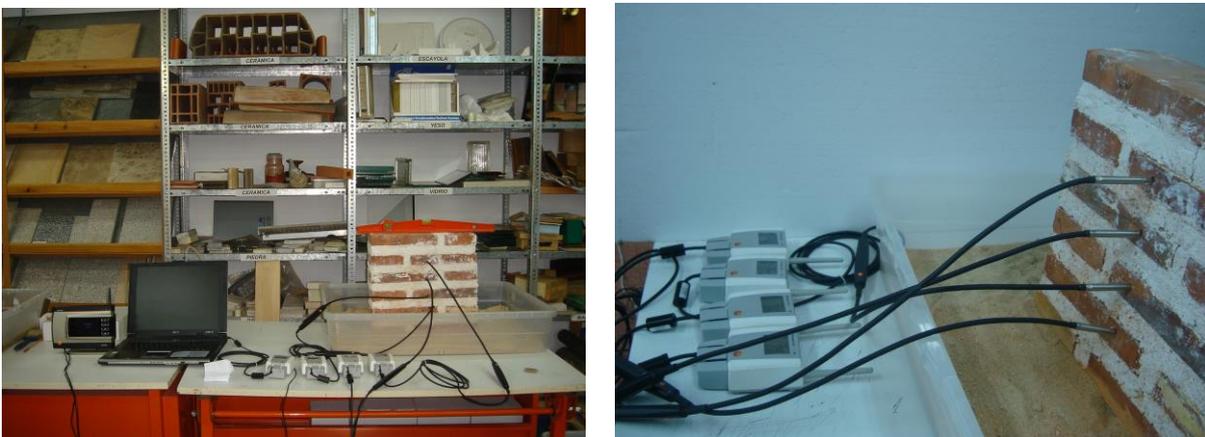


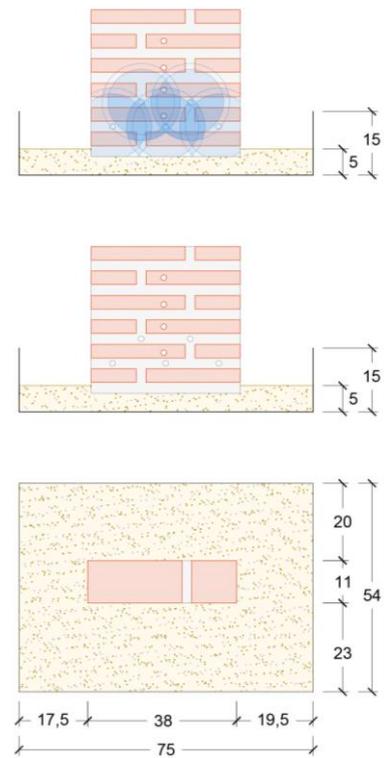
Imagen 89. Imagen de la probeta una vez ejecutada controlando su proceso de secado.



Imagen 90. Preparando la hidrofugación (izqda.) y sondas tomados datos (dcha.)



Imagen 91. Imagen de la probeta ya hidrofugada con las sondas controlando el proceso.



\*Cotas en centímetros

Figura 9: Dibujo de las dimensiones y montaje del ensayo, así como de la ubicación de perforaciones para las sondas y para la inyección del producto hidrofugante.

Uno de los procesos más lentos del trabajo han sido los largos tiempos de espera que hay que asumir para poder llevar a cabo los ensayos, sobre todo en las fases de secado. La hidrofugación se hizo siguiendo las indicaciones de la casa comercial en lo que a cantidad de producto y separación de las perforaciones se refiere.

## VI. Datos y expresión de resultados

Los datos más importantes se muestran para este ensayo en forma de gráficas que recogen la evolución de la humedad en la probeta de fábrica. Para entender con claridad estas gráficas hay que relacionar las mismas con la posición de las sondas, para lo cual se muestran en el dibujo siguiente su localización en la probeta.

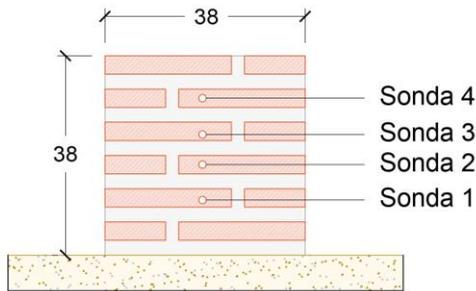
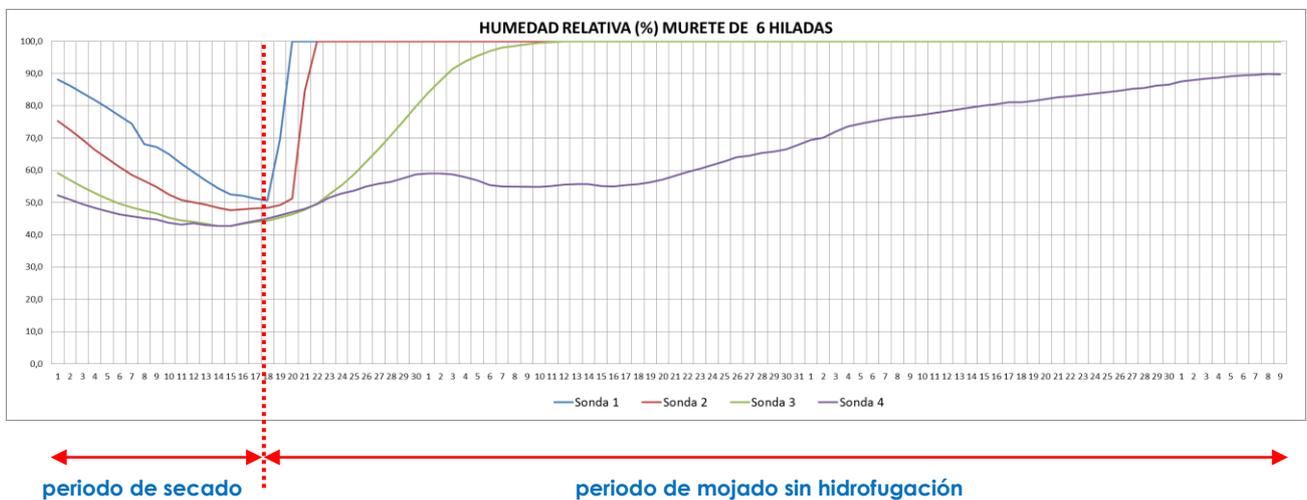
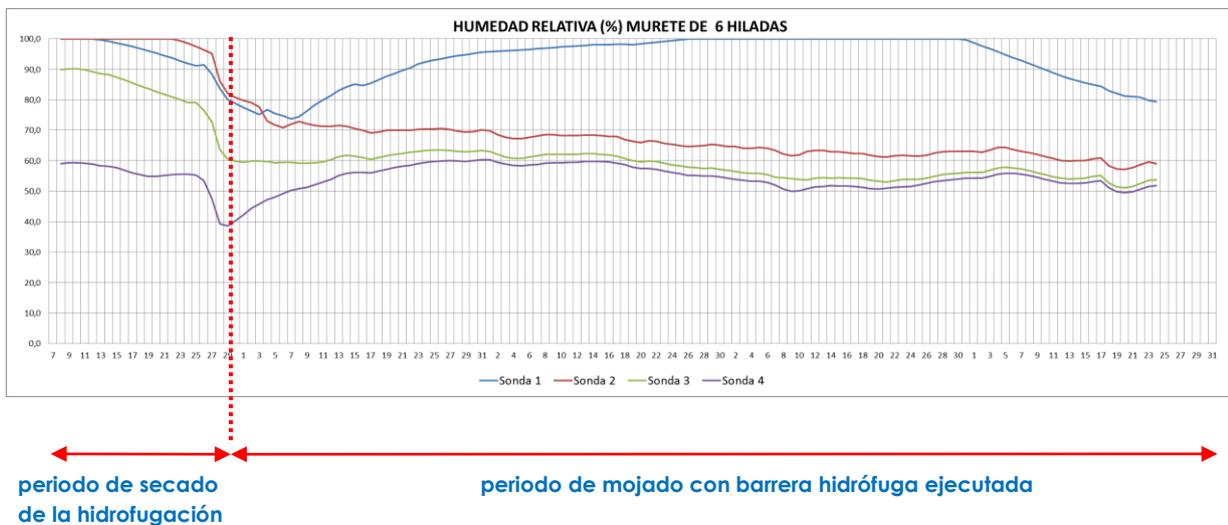


Figura 10: Dibujo explicativo de la posición de las sondas



Gráfica 22. Gráfico explicativo de la evolución de la humedad una vez humedecida la cama de arena con la probeta sin hidrofugar.



Gráfica 23. Gráfico explicativo de la evolución de la humedad una vez humedecida la cama de arena después de producirse la hidrofugación de la probeta.

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Las conclusiones más interesantes de este ensayo se deducen de la interpretación de las gráficas mostradas, en las cuales se representa la evolución de la humedad en la probeta a diferentes cotas. El dato de la humedad es el que suministran las sondas introducidas en las correspondientes perforaciones.

La primera de las gráficas muestra la evolución de la humedad en la probeta una vez producido el llenado de agua de la cubeta sin que se haya llevado a cabo la hidrofugación de los tendeles inferiores.

Se aprecia una primera fase, en la zona izquierda, donde se observa claramente la bajada de la humedad que corresponde con el proceso de secado natural de la probeta después de su ejecución. Cuando los valores de las sondas se aproximan a los valores del ambiente se entiende que se ha producido un secado suficiente como para comenzar el ensayo, y se procede al llenado de la cubeta con el fin de saturar la cama de arena. La sonda inferior (sonda 1) alcanza el 100% de humedad en unos minutos, la siguiente (sonda 2) lo alcanza a los dos días, la siguiente (sonda 3) a los 20 días, y la sonda situada más arriba (sonda 4) no llega a alcanzar el 100%, pero se observa una trayectoria claramente ascendente, por lo que a los dos meses y veinte días se detiene esta fase del ensayo.

La imagen de la segunda gráfica muestra la evolución de la humedad en la probeta una vez producido el llenado de agua de la cubeta tras la hidrofugación de la misma. Se comprueba que la barrera química es altamente eficaz. Como ya se demostró en los ensayos 7.1 y 8.1, las sondas detectan cantidades muy pequeñas de humedad en las fábricas por lo que el hecho de que las sondas 2 y 3, no detecten ninguna variación supone que la barrera impide totalmente el paso del agua por capilaridad a su través. La sonda 1, que está a escasos centímetros del nivel del agua, y que se encuentra entre las dos líneas de hidrofugación tarda 40 días en llegar al 100% de humedad. Las sondas 2, 3 y 4, siguen bajando ligeramente su contenido de humedad a lo largo del ensayo, acercándose paulatinamente a los valores del ambiente.

La conclusión más evidente e importante es la **eficacia de la barrera hidrófuga**. Barrera definida por la junta continua que forma la argamasa en el tendel, demostrando así que si se lleva a cabo una correcta hidrofugación en una banda continua de argamasa se consigue detener casi por completo la ascensión capilar de la humedad en este tipo de fábricas. Barrera que, en este caso y tras seguir las recomendaciones de utilización del producto, está formada por la hidrofugación de dos tendeles consecutivos. Tras la realización de este ensayo, que tuvo una duración de casi año y medio, se estaba en

disposición de poder comenzar uno de los ensayos más relevantes y extensos en el tiempo de esta investigación que se llevó a cabo sobre cuatro muros de mayores dimensiones.

También se ha podido comprobar que las gráficas de humedad y temperatura muestran siempre una imagen sensiblemente simétrica entre ambas, en lo que a la disposición de las sondas se refiere. Quiere esto decir que a mayor porcentaje de humedad menor temperatura detectada por la sonda. Este hecho está vinculado al fenómeno de la evaporación, proceso endotérmico que genera una bajada de temperatura.

## **ENSAYO PARA OBSERVACIÓN DEL PROCESO DE CAPILARIDAD Y DE COMPROBACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA BARRERA HIDRÓFUGA**

- **Ensayo 10**

- Ensayo sobre fábrica

### **Ensayo 10.1**

**ENSAYO 10**

**ENSAYO 10.1.**

***Ensayo sobre cuatro muros para el estudio de la capilaridad en las fábricas de ladrillo antiguo ejecutadas con argamasas de cal y análisis de la eficacia de la barrera hidrófuga***

**I. Denominación**

*Ensayo para el estudio de la capilaridad en las fábricas de ladrillo antiguo ejecutadas con morteros de cal y análisis de la eficacia de las barreras hidrófugas por ensayo sobre cuatro muros, dos ejecutados con ladrillo antiguo de tejar de elaboración manual, y dos con ladrillo macizos de ejecución moderna fabricados por extrusión.*

**II. Objetivo del ensayo**

El objetivo de este ensayo es observar y analizar, primero, el fenómeno de la absorción de agua por capilaridad, ya no en elementos constructivos aislados, sino en un elemento constructivo como son los muros, así como la cantidad y la velocidad a la que una fábrica absorbe humedad por capilaridad a través de la superficie de ensayo cuando está en contacto con agua. Y segundo, comprobar la eficacia de las barreras químicas de corte hídrico que generan, cuando son tratadas con productos hidrofugantes, las retículas continuas que forma la argamasa de cal en llagas y tendeles, impidiendo o dificultando la ascensión de agua por capilaridad cuando se aplica el hidrofugante en perforaciones de las juntas de argamasa.

**III. Procedimiento y descripción del ensayo**

Se han realizado cuatro probetas diferentes sobre las cuales realizar ensayos, dos muros fabricados con ladrillos macizos antiguos de tejar de elaboración manual tipo "La Operaria" de anchos de muro de un asta y un asta y media y otros dos muros ejecutados con ladrillos macizos de ejecución actual fabricados por extrusión, tipo Santoveña, también de anchos de muro de un asta y de un asta y media. La argamasa con la que se reciben los ladrillos es

una argamasa hecha con cal aérea, arena y agua con una proporción de la mezcla 1:3.

El comienzo de los trabajos necesarios para la ejecución de este ensayo sobre cuatro muros de fábrica fue el día 29 de mayo de 2010 en el laboratorio de la E.T.S.A. de Valladolid, bajo las condiciones previstas y siguiendo las pautas de la construcción tradicional. La construcción se realiza sobre una balsa impermeable formada por varias láminas sobre la que se extiende una cama de arena de unos 5 cm de espesor. Una vez finalizada la construcción de los muros, el día 13 de julio de 2010, se colocan varias sondas en perforaciones realizadas sobre los mismos a diferente cota y se lleva a cabo una toma de datos de humedad y temperatura durante el proceso de secado posterior a su construcción. En concreto a cada muro se le realizan un total de seis perforaciones que llegan justo hasta la mitad de los muros, y otras seis más superficiales con el fin de comparar valores en función de la profundidad.

No es hasta mes y medio después, cuando se obtiene por primera vez un valor por debajo del 99.9% en una de las sondas colocadas en la zona superior de uno de los muros, lo que da una idea de lo lento del proceso de secado. Es necesario que todas las sondas indiquen valores por debajo de ese valor si se quieren utilizar para detectar la presencia y variación de la cantidad de agua en las muestras y la evolución de la humedad y del frente húmedo. Se ha requerido de un periodo de varios meses hasta alcanzar unos niveles de humedad aceptables como para considerarlos secos, con humedades cercanas a las del ambiente. En concreto no es hasta casi **diez meses después de su construcción**, cuando se consideran suficientemente secos como para pasar a la siguiente fase del ensayo.



Imagen 92. Imágenes del proceso de construcción de la balsa y de los muros.

Una vez concluida la primera fase donde el objetivo simplemente ha sido la evaporación del agua que contenían los muros debido a su proceso de construcción, se comienza la

aplicación de un tratamiento experimental en dos de las probetas anteriores, en el muro de fábrica antigua de un asta y media, y en el muro de fábrica moderna, de un asta y media. Se eligen estos dos muros dado que son los más desfavorecidos ante la influencia del fenómeno de la capilaridad, ya que la superficie de absorción de agua (en contacto con la arena saturada) es mayor para una superficie de evaporación (superficie en contacto con el aire atmosférico) muy similar a los otros dos, y con un espesor tal que ralentiza los procesos de evaporación.

Este tratamiento consiste en la inyección por gravedad de un producto hidrofugante sobre perforaciones realizadas al tresbolillo a una cota aproximada de unos 20 cm desde la base de los muros, a una distancia entre sí de 10 cm, y con una profundidad aproximada de dos tercios del ancho de la fábrica. Las perforaciones se hicieron con una inclinación aproximada de unos  $10^\circ$  lo que permitió que todas ellas discurriesen por el tendel de la argamasa. Todo esto siguiendo las recomendaciones del fabricante del producto.



**Imagen 93. Imágenes del proceso de hidrofugación de los muros de asta y media.**

Se introduce una goma más o menos hasta la mitad del ancho del muro, y se sella con silicona la junta entre ella y el muro en una profundidad de unos 30 o 40 mm. Esta disposición permitió la introducción gradual por gravedad del producto hidrófugo en la junta de argamasa. El producto, suministrado por la casa BASF y denominado *Rasajil BLF*, es un compuesto de silicato potásico y siliconato metílico de potasio. Se llevó a cabo mediante unas bolsas, las cuales contenían el producto, colocadas elevadas respecto de la perforación, y conectadas directamente al conducto antes descrito, por lo que el proceso de llenado por presión es únicamente debido a la gravedad. La inyección del producto fue un proceso que se prolongó a lo largo de varios días hasta la absorción del mismo por parte del muro de fábrica. Una vez se absorbió la totalidad del producto en la cantidad descrita por el fabricante se extrajeron dichas entubaciones y se rellenaron los orificios con argamasa de cal, la misma utilizada para su construcción. El proceso se llevó a cabo en dos fases,

primero se inyectó la fila inferior y posteriormente la fila superior, siempre en los tendeles.

Una vez se llevó a cabo la aplicación del producto hidrofugante las sondas detectaron que aumentaba la cantidad de humedad contenida en los muros tratados de modo que hubo que esperar de nuevo a que se produjese el secado. Este proceso duró aproximadamente unos tres meses.

En el momento en el que los cuatro muros de fábrica se encontraron en unos niveles de humedad tal que las sondas marcaban unos valores cercanos a los del ambiente del local como para considerarlos secos, se procedió al vertido de agua sobre la cama de arena hasta su saturación. Concretamente se realizó por primera vez el vertido el día 12 de septiembre de 2011. A partir de este momento se inició un proceso de toma de datos de humedad y temperatura, a intervalos de una hora. El análisis de dichos datos junto con los obtenidos por la toma de imágenes con cámara termográfica y los datos obtenidos por pesadas durante el desmontaje de los muros dan lugar a una gran cantidad de resultados y conclusiones que se exponen a continuación en el desarrollo de este ensayo.



**Imagen 94. Imágenes de las sondas tomando datos de humedad y temperatura.**

Durante un periodo de varios meses se va observando la evolución de la ascensión de la humedad por capilaridad hasta que se produce una estabilización del proceso. Con fecha de 20 de abril de 2012 se procede a una toma final de datos del estado de los cuatro muros, se da por finalizado el ensayo y se procede a la demolición programada de los mismos. Durante la demolición se realizan fotos de todos y cada uno de los estratos del muro (hiladas de ladrillos y tendeles de argamasa) con la cámara termográfica, y a continuación se realiza una medida del peso de todas y cada una de las piezas cerámicas que han conformado las cuatro probetas de fábrica y de porciones de argamasa de cal de todos y cada uno de los niveles de llagas y tendeles. Una vez concluida la demolición, se introducen estas piezas durante una semana dentro de un horno de secado en el laboratorio a 100°C

para proceder al secado total de las muestras y extraer toda el agua que contenían dichas piezas, momento en el cual se procede su pesado de nuevo para, de esta forma, conocer la cantidad exacta de agua que contenían las mismas en el momento de la demolición.

#### IV. Descripción de las probetas

Se llevó a cabo este ensayo sobre cuatro muros utilizando ladrillos ya descritos y con las siguientes dimensiones aproximadas

Dimensiones y tratamiento de las probetas:

Muro de 1 asta de ladrillo moderno sin barrera hidrófuga	1000 x 650 x 240 mm
Muro de 1 ½ asta de ladrillo moderno con barrera hidrófuga	1000 x 650 x 380 mm
Muro de 1 asta de ladrillo rústico sin barrera hidrófuga	1000 x 800 x 280 mm
Muro de 1 ½ asta de ladrillo rústico con barrera hidrófuga	1000 x 800 x 440 mm

#### Documentación gráfica

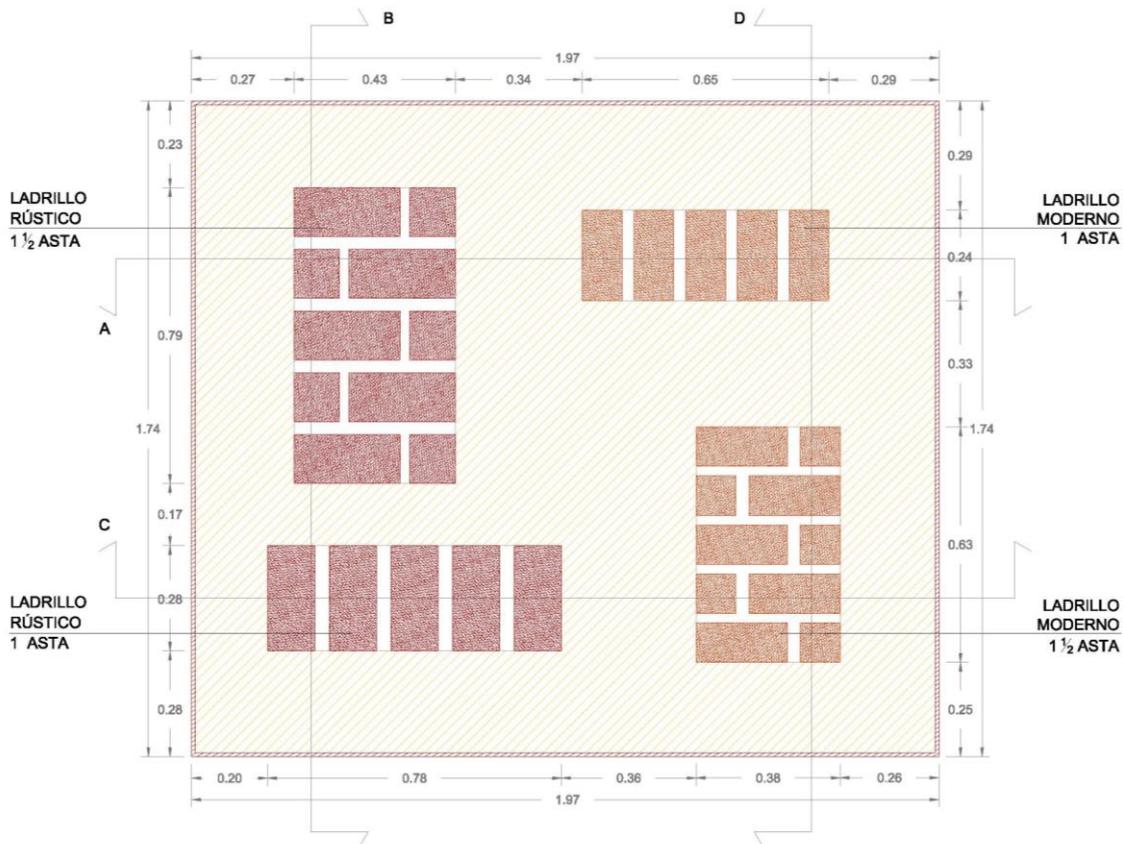


Figura 11. Plano de la implantación de los muros

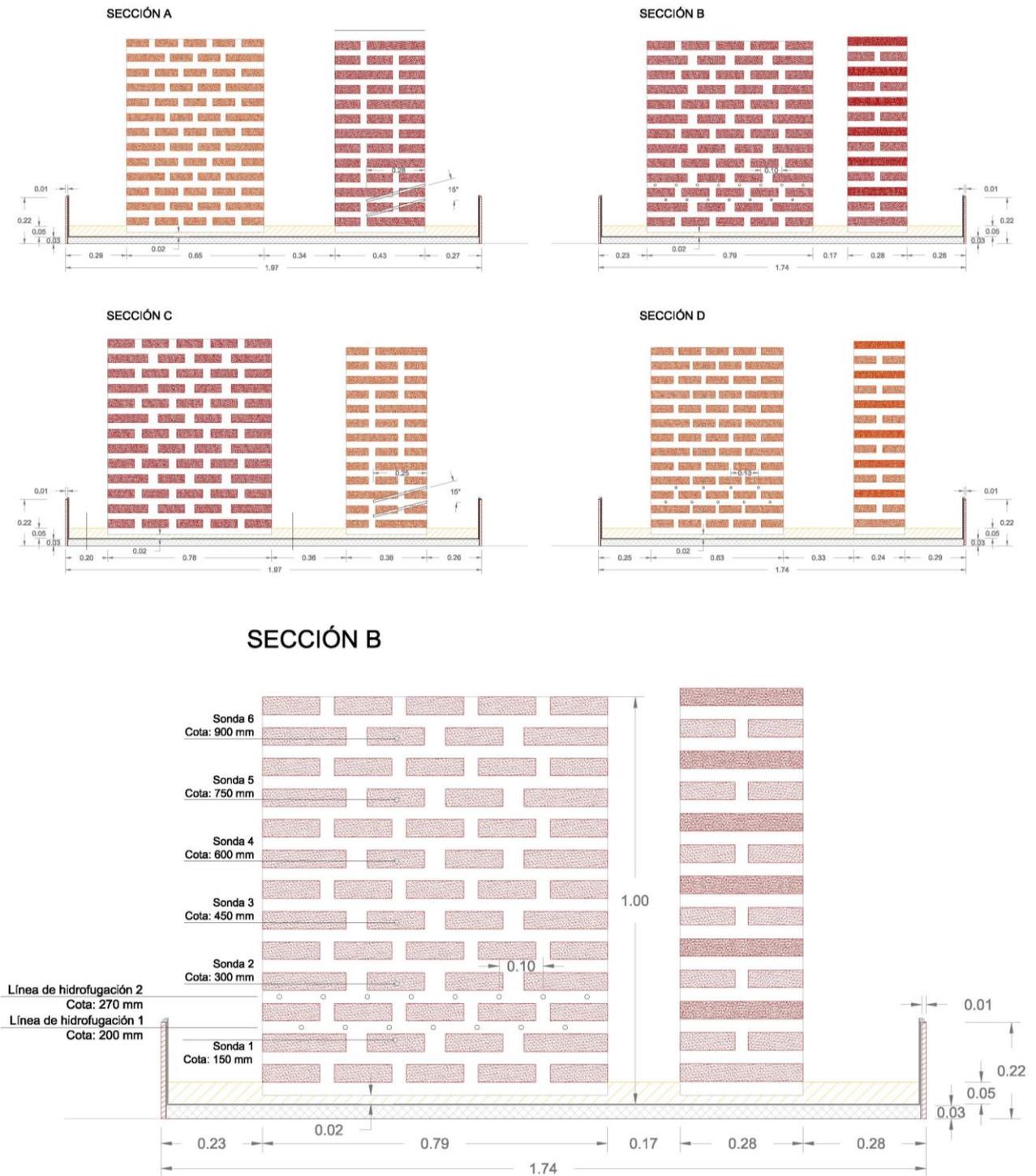


Figura 12. Planos de alzados y secciones de los muros

## VI. Datos y expresión de resultados y discusión de los mismos.

Para este ensayo se han unido en este apartado VI, además de la exposición de datos y de resultados, la discusión de los mismos, por entender que es más fácil su comprensión con las

imágenes o los gráficos expuestos.

Al ser este un ensayo que ha generado una gran cantidad de datos, la información se organiza de la siguiente manera:

La información del **apartado 1**, es la que se muestra una vez ha **finalizado** el ensayo, es decir cuando las sondas se estabilizan y se ha llegado al estado de equilibrio. Ya no se repone más cantidad de agua en el lecho húmedo de arena, y se procede a la toma de datos de las sondas, a la toma de imágenes por medio de la cámara. Llegado al final del ensayo se procede al desmontaje de todos los muros pesando y clasificando todos y cada uno de los ladrillos con los que se construyeron, y tomando muestras de la argamasa de llagas y tendeles de cada hilada.

Se organiza por cada tipo de muro y se exponen los datos de cada uno de ellos.

En los gráficos se muestran los valores de humedad que se obtuvieron de los cuatro muros según el método de obtención en este orden:

- Por datos obtenidos de las sondas
- Por pesada
- Por imagen obtenida por cámara termográfica

Es necesario hacer las siguientes puntualizaciones:

a) En los muros de un asta, el gráfico de la izquierda muestra por gama de colores la variación de la humedad según los datos obtenidos por las sondas. En el caso de los muros de asta y media son los dos gráficos de la izquierda, que además suministran información de sondas colocadas superficialmente y de sondas colocadas en el centro de la probeta.

b) En el caso de los muros de un asta, el gráfico mostrado a continuación, y en el caso de los muros de asta y media, los dos siguientes gráficos del medio muestran por gama de colores la cantidad máxima de agua absorbida, deducida por pesada en porcentaje respecto del peso inicial de la probeta, según la fórmula de la UNE-EN 772-7:  $W_s = (m_s - m_d)/m_d \times 100\%$

Donde:

$W_s$	es la absorción de agua de la probeta. [%] (dato del gráfico)
$m_s$	es la masa de la probeta en estado seco (g)
$m_d$	es la masa de la probeta en estado saturado (g)

c) El siguiente, o los dos siguientes gráficos situados a continuación más a la derecha, son imágenes obtenidas por la cámara termográfica que muestran la presencia de humedad en la probeta de fábrica.

d) Los gráficos situados a la derecha del todo, dispuestas como bandas verticales, muestran, a modo de resumen y con colores, la media de cada una de las imágenes anteriores.

e) Las imágenes de la fila superior se refieren siempre a la humedad en el ladrillo, y las imágenes de la fila inferior se refieren siempre a la argamasa.

En el **apartado 2**, se comparan datos entre los muros y se extraen conclusiones derivadas de poner unos datos en relación con otros. Los datos e imágenes expuestos en este apartado son los mismos que los que se presentan en el apartado 1, pero colocados en orden diferente, con el fin de poder apreciar mejor las comparaciones.

Comparación entre muros del mismo material:

- muro de 1 asta L. rústico sin hidrofugar – muro de 1 ½ asta de L. rústico hidrofugado
- muro de 1 asta L. moderno sin hidrofugar – muro de 1 ½ asta de L. moderno hidrofugado

Comparación entre muros de distinto material:

- muro de 1 asta L. rústico sin hidrofugar – muro de 1 asta de L. moderno sin hidrofugar
- muro de 1 ½ asta L. rústico hidrofugado – muro de 1 ½ asta de L. moderno hidrofugado

En el **apartado 3**, se analiza la evolución temporal del ensayo. Comentando las gráficas de cada uno de los muros.

Aunque parte de los datos que se muestran a continuación se pueden deducir de los gráficos o planos mostrados en páginas anteriores, en el apartado *IV: Descripción de las probetas*, recordamos algunos de ellos.

Cotas de las sondas (desde la base de los muros):

Sonda 1:	150 mm
Sonda 2:	300 mm
Sonda 3:	450 mm
Sonda 4:	600 mm
Sonda 5:	750 mm
Sonda 6:	900 mm

Cotas de las líneas de hidrofugación (desde la base de los muros):

Línea hidrofugación 1:	200 mm
Línea hidrofugación 2:	270 mm

También es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

En los muros de 1 asta se muestra la información sobre el alzado principal, que es donde se

han hecho las perforaciones para la colocación de las sondas, y es donde se han hecho los taladros por donde se ha introducido el líquido hidrofugante. Es también la cara de la probeta de la cual se han sacado las imágenes tomadas con la cámara termográfica. Se entiende que la información que se puede obtener de una de las caras es similar para las dos.

En los muros de 1 ½ asta se muestra la información de los dos alzados. El motivo es comprobar si la cara principal, por donde se ha realizado la hidrofugación, presenta alguna diferencia respecto de la cara posterior.

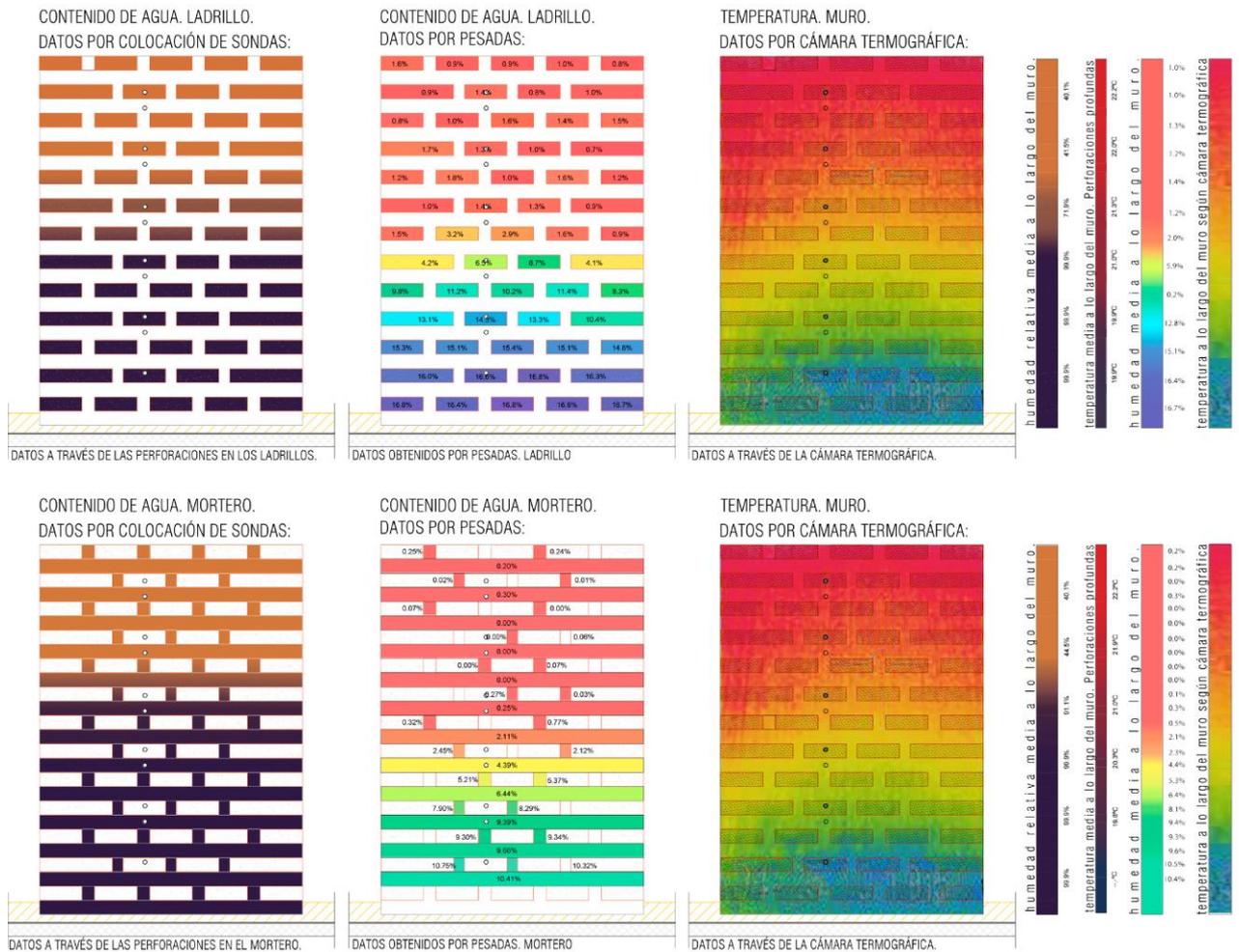
Las imágenes que se obtienen de la cámara termográfica no se pueden considerar totalmente equiparables unas con otras ya que el ajuste y la sensibilidad de la cámara y las condiciones de temperatura del entorno, hacen casi imposible un ajuste exacto entre unos ensayos y otros. Esto no quiere decir que no se puedan comparar resultados, ya que la información que suministran estas imágenes es muy precisa en lo que se refiere a la presencia de la humedad en cada probeta y como es su distribución, y esta información sí permite comparar unos estados hídricos con otros.

En el **apartado 4**, se aportan unos interesantes gráficos que muestran una comparativa entre la cantidad de agua almacenada en argamasas y en ladrillos dentro de un mismo muro cuantificado en litros de agua por metro cúbico de material.

Al final de la documentación de este ensayo se adjuntan en formato DIN A-3 láminas resumen de cada uno de los muros. Con información, en el momento previo al desmontaje, de porcentajes de humedad obtenida de pesadas, de datos de las sondas termohigrométricas, y de imágenes obtenidas con la cámara termográfica, para mejor visualización de la información al estar a mayor escala. Igualmente también se reproducen a mayor escala las gráficas 24, 25, 26 y 27, que representan la evolución temporal de la humedad en cada uno de los cuatro muros.

**Apartado 1. Información por muros.**

**Muro de 1 asta de ladrillo moderno sin barrera hidrófuga**



**Figura 13. Alzados muro de 1 asta de ladrillo moderno sin barrera hidrófuga. Datos en ladrillos (fila superior) y en argamasa (fila inferior)**

De la observación de las imágenes se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Si bien ya se ha apuntado con anterioridad, se recuerda que dentro de este apartado la fila superior corresponde a datos e imágenes relativos a los ladrillos y la fila inferior a los datos relativos a la argamasa.
- La información obtenida por los tres métodos es totalmente coherente entre sí.
- El incremento de peso que se produce respecto del valor de partida por la absorción de agua, es superior en el ladrillo que en la argamasa. Sin embargo el frente húmedo, es decir la cota máxima alcanzada por el agua, se manifiesta a la misma altura tanto para el ladrillo como para la argamasa, alcanzando una altura significativa. Como así parece que apuntan los estudios de Hoff y Hall.<sup>83</sup>

<sup>83</sup> WILSON, MOIRA A. HOFF, W. D. HALL, CHRISTOPHER. "Water Movement in Porous Building Materials -XIV. Absorption into a Two-Layer Composite ( $S_A < S_B$ )" *Building and Environment*, Vol. 30, No. 2, pp. 221-227, 1995

- La altura de equilibrio se alcanza aproximadamente a una cota de unos 60 cm, dato que coincide con los estudios de Guimaraes<sup>84</sup>, y de Zhang, en su trabajo de recopilación de artículos y estudios relacionados con el tema.<sup>85</sup>
- Se observa claramente la curva que origina la “mancha” de humedad en forma de montaña, típico de procesos de humedad capilar, en los que el frente húmedo asciende más en el centro que en los laterales cuando hay desorción por las caras laterales.

---

<sup>84</sup> GUIMARAES AS, DELGADO JMPQ, DE FREITAS VP. *Mathematical analysis of the evaporative process of a new technological treatment of rising damp in historic buildings*. Build Environ 2010 ;45:2414–20.

<sup>85</sup> ZHANG Z. *A review of rising damp in masonry buildings*. Advanced polymer and composite research group. Department of Mechanical and Design Engineering, University of Portsmouth, Anglesea Building, Portsmouth, Hampshire. (<http://www.wykamol.com/images/pictures/damproofing/lectros/a-review-of-rising-damp-in-masonry-buildings.pdf>)

**Muro de 1 asta de ladrillo de tejar sin barrera hidrófuga**

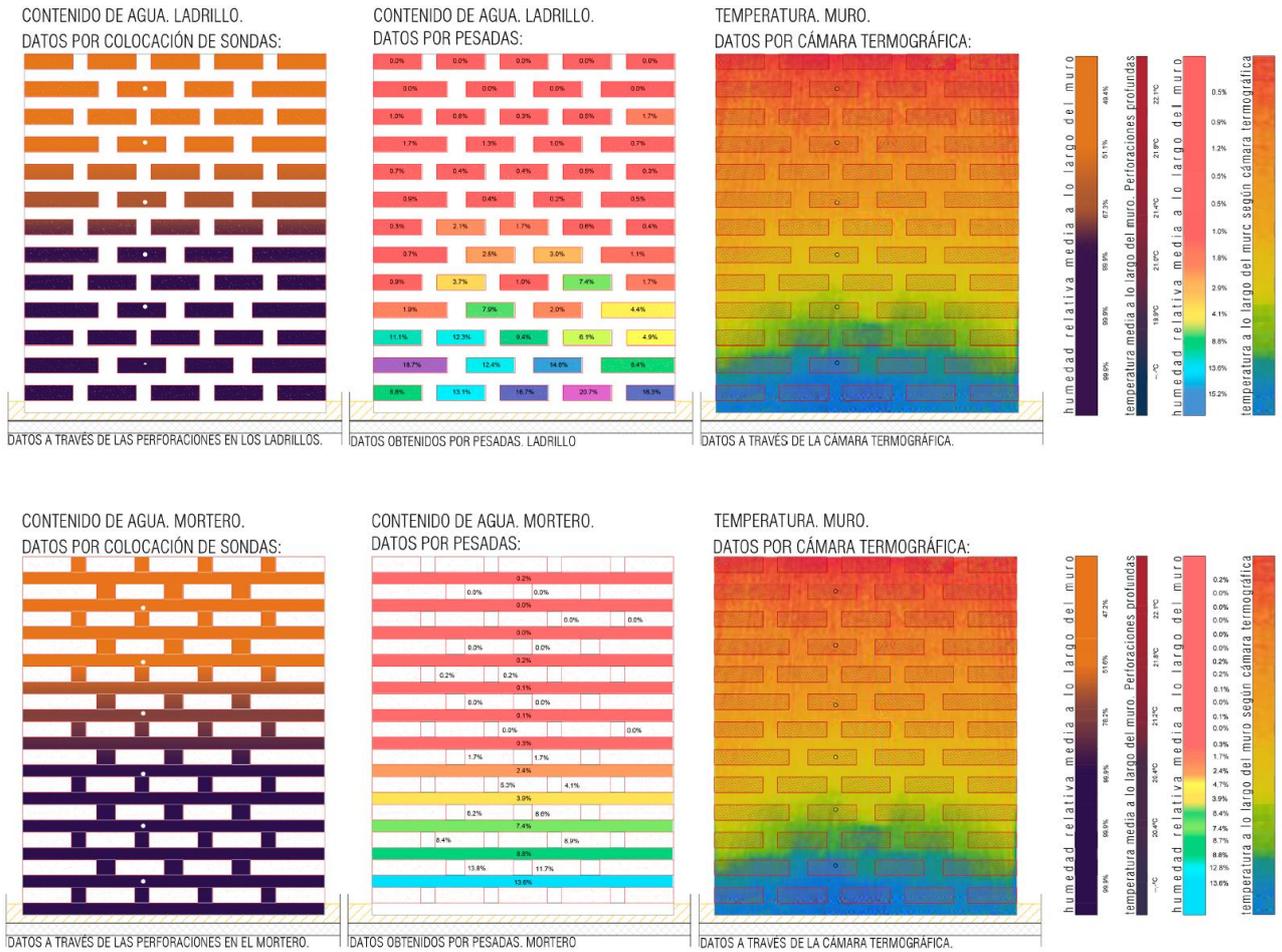


Figura 14. Alzados muro de 1 asta de ladrillo rústico de tejar sin barrera hidrófuga. Datos en ladrillos (fila superior) y en argamasa (fila inferior)

De la observación de las imágenes se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- La información obtenida por los tres métodos es totalmente coherente entre sí.
- El incremento de peso respecto del peso original que acumula el ladrillo por absorción de agua, como ocurre en el muro anterior, es superior al de la argamasa.
- La altura de equilibrio se alcanza aproximadamente a los 55 cm, dato que coincide, al igual que en el ensayo anterior, con datos similares a los obtenidos en los estudios de Guimaraes y Zhang, citados en la argumentación del muro anterior.
- También se observa claramente la curva que origina la “mancha” de humedad en forma de montaña, típico de los procesos de humedad capilar, cuando hay desorción en las caras laterales.
- La dispersión de valores en estos ladrillos de tejar es más alta.
- La cota alcanzada por el agua es inferior en este muro que en el anterior y aunque la diferencia de cota es pequeña la razón es debida a que este tipo de ladrillos evapora agua con más velocidad que el ladrillo de extrusión y esto provoca que el frente húmedo coja menos cota en el muro de ladrillo de tejar.

**Muro de 1 1/2 asta de ladrillo moderno con barrera hidrófuga**



Figura 15. Alzados muro de 1 1/2 asta de ladrillo moderno con barrera hidrófuga. Datos en ladrillos (fila superior) y en argamasa (fila inferior)

De la observación de las imágenes, y teniendo en cuenta que las perforaciones se han realizado por el alzado principal, al igual que la hidrofugación, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Se aprecia claramente que en la cara por la que se ha producido la hidrofugación hay una mayor eficacia de la barrera que en la cara posterior. Se podría decir que una pequeña parte del agua se filtra por capilaridad por dicha cara posterior en donde, según se observa, la barrera no se ha cerrado totalmente. Esto tiene relación con las indicaciones de la casa que no recomienda su uso para muros de un espesor superior a los 500 mm de espesor, y los muros ensayados son de 440 mm, cerca del límite. Para muros de más de 500 mm de espesor se recomienda la hidrofugación por ambas caras.
- Como las perforaciones se hacen hasta una profundidad de 2/3 del muro, es previsible

que el producto haya penetrado más y mejor en la cara principal que en la posterior.

- La altura de equilibrio se alcanza aproximadamente entre los 25 y los 30 cm en la cara anterior, y entre los 25 y los 35 cm en la cara posterior. Lo que da idea de la eficacia de la barrera de corte hídrico.

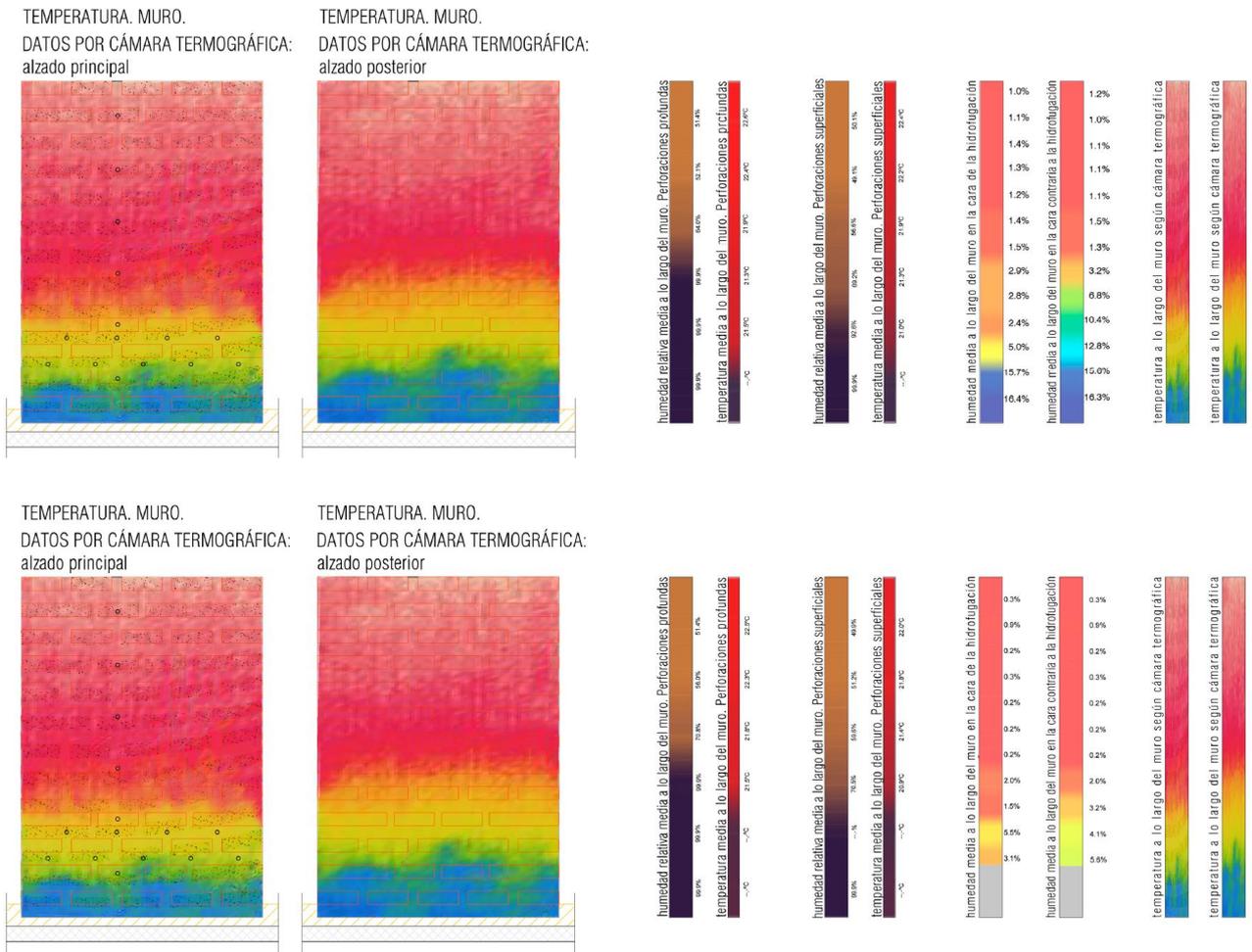


Figura 16. Alzados muro de 1 ½ asta de ladrillo moderno con barrera hidrófuga.

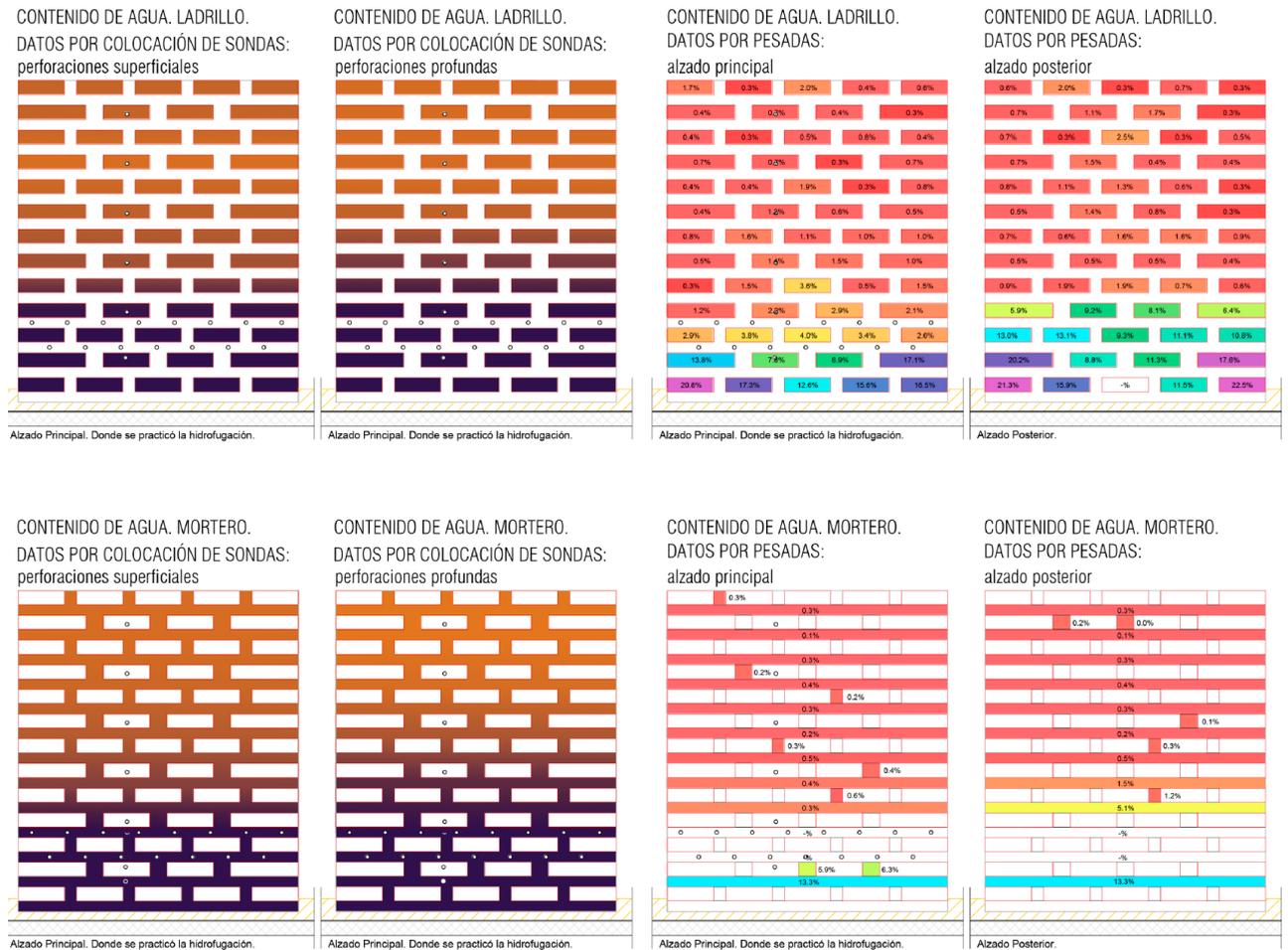
De la observación de las imágenes se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Ya no se observa tan claramente la curva que origina la “mancha” de humedad en forma de montaña. Ahora parece que el frente húmedo es prácticamente horizontal.
- Se aprecia claramente con la termografía cómo la humedad ha ascendido algo menos por la cara en la que se ha producido la hidrofugación, la anterior.
- Respecto de la imagen de la página anterior hay que destacar la gran diferencia que existe entre el incremento de peso en porcentaje por agua absorbida que acumula el ladrillo con respecto al de la argamasa. Mucho más significativo de lo que ocurría en los muros de 1 asta. La razón es que la hidrofugación se realiza sobre la argamasa, y aunque el ladrillo seguramente también absorbe algo del producto, la mayor parte de la

absorción se la va a llevar la retícula conformada por el conjunto de los tendeles y llagas de argamasa.

- También se aprecia cómo la variación entre la cara anterior y la posterior es menor en el mortero que en el ladrillo por el mismo motivo que el explicado en el párrafo anterior.
- (Como ya se ha apuntado, y para que no lleve a confusión la información mostrada, recordar que en el caso de la información termográfica las imágenes superior e inferior son idénticas. La razón es que con la cámara termográfica, como se puede comprender, no se pueden discriminar imágenes entre la argamasa y el ladrillo).

**Muro de 1 ½ asta de ladrillo de tejar con barrera hidrófuga**



**Figura 17. Alzados muro de 1 ½ asta de ladrillo de tejar con barrera hidrófuga. Datos en ladrillos (fila superior) y en argamasa (fila inferior)**

De la observación de las imágenes se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Se aprecia una cierta diferencia en la eficacia de la barrera hidrófuga entre la cara anterior, por donde se introduce el hidrofugante y la cara posterior. Pero la diferencia no es tan notable, como lo que se percibe en el muro de ladrillo moderno. Quiere esto decir que la barrera funciona mejor en este tipo de material, en las fábricas de ladrillo de tejar.
- La altura de equilibrio se alcanza aproximadamente entre los 20 y los 25 cm en la cara anterior, y entre los 25 y los 35 cm en la cara posterior.
- La dispersión de valores en los ladrillos sí es significativa, a diferencia de lo que ocurre con los ladrillos de ejecución moderna.
- La argamasa, como en los demás ensayos, tiene unos valores muchos más bajos en incremento de peso sobre el peso inicial que los valores del ladrillo
- En este ensayo fue prácticamente imposible recoger muestras de argamasa de las hiladas inferiores, ya que se disgregaban con mucha facilidad y ello impidió recoger porciones con las que hacer ensayos fiables.

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

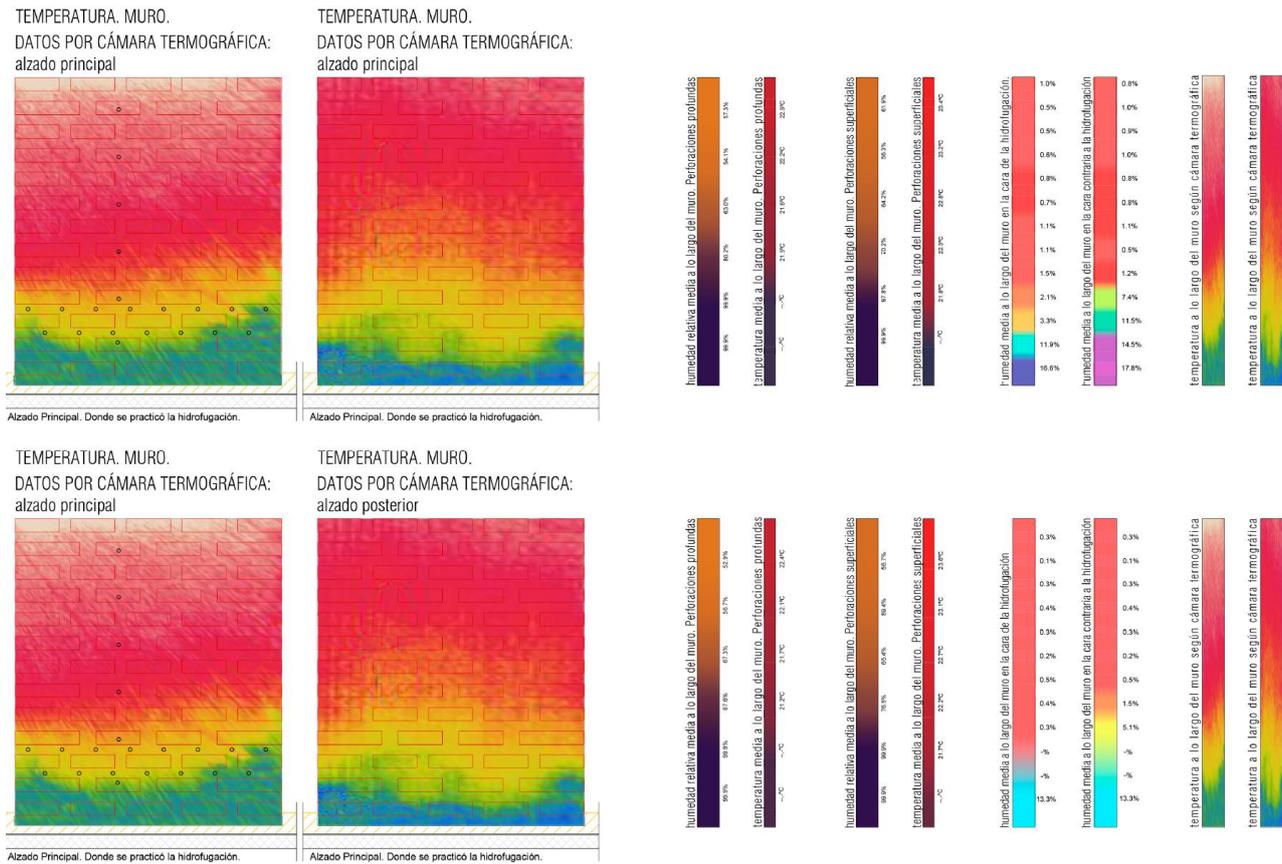


Figura 18. Alzados muro de 1 ½ asta de tejar moderno con barrera hidrófuga.

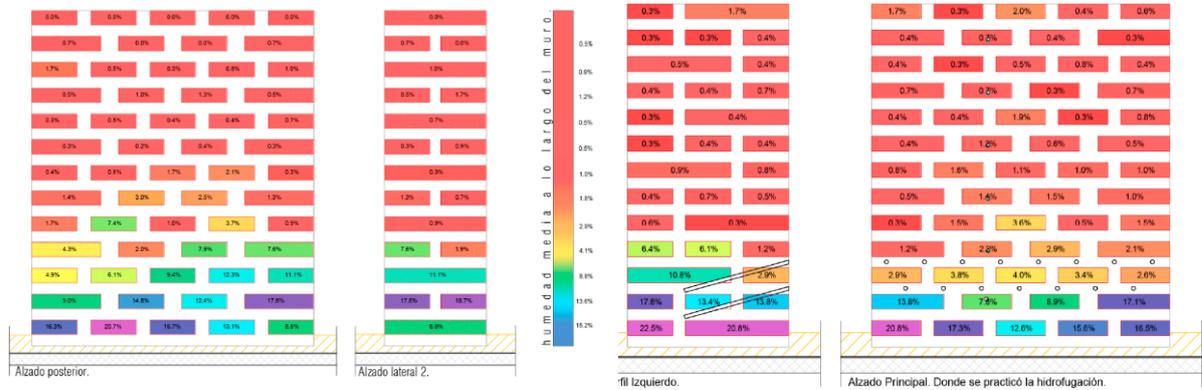
De la observación de las imágenes se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Como en el ensayo anterior, tampoco se observa la curva que origina la “mancha” de humedad en forma de montaña. Ahora parece que el frente húmedo es más horizontal, pero con muchas más irregularidades que en caso anterior, lo que coincide con las dispersiones observadas en general en los ensayos donde se utilizan ladrillos de tejar.
- Se aprecia claramente con la termografía cómo la humedad ha ascendido menos por la cara en la que se ha producido la hidrofugación.
- Respecto de la imagen de la página anterior se observa la gran diferencia que existe entre el porcentaje de agua respecto del peso original del material que acumula el ladrillo con respecto al de la argamasa. Mucho más significativo de lo que ocurría en los muros de un asta. También se aprecia como la variación entre la cara anterior y la posterior es menor en el mortero que en el ladrillo.
- (Como ya se ha comentado anteriormente, y para que no lleve a confusión la información mostrada, cabe recordar que en el caso de la información termográfica las imágenes superior e inferior son idénticas).

## Apartado 2. Comparación entre muros.

### Comparación entre muros del mismo material

Muro de 1 asta L. de tejar sin barrera hidrófuga – Muro de 1 ½ asta de L. de tejar con barrera hidrófuga

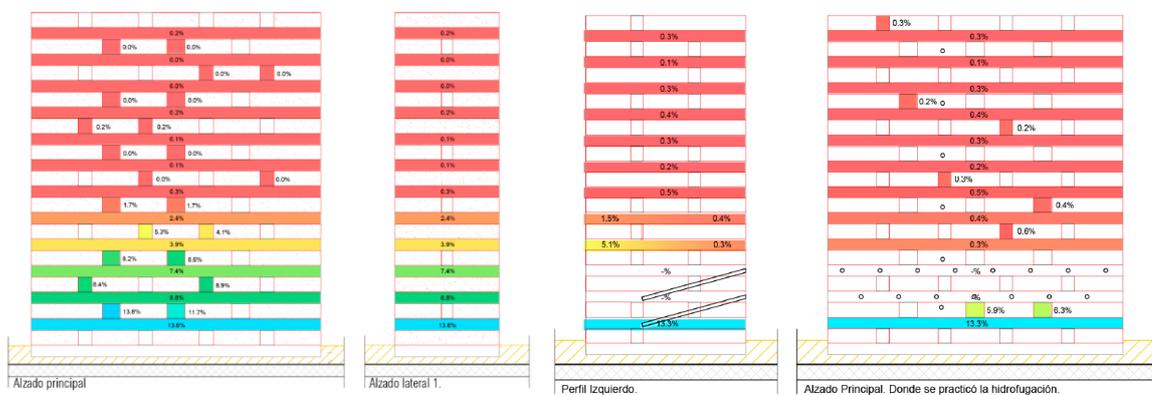


MURO DE 1 ASTA SIN BARRERA HIDRÓFUGA

MURO DE 1 ½ ASTA CON BARRERA HIDRÓFUGA

Figura 19. Alzados para comparar datos de los ladrillos de los dos muros de ladrillo de tejar de 1 y 1 ½ asta de espesor, sin y con barrera.

- A la vista de estos gráficos se puede deducir la eficacia de la barrera hidrófuga. Los ladrillos situados justo encima de la segunda fila de hidrofugación, a una cota de unos 30 cm, tienen una media de absorción cuando el muro no tiene barrera hidrófuga del **5,5%**, y del **2,0%** cuando si lo está. Hay que tener en cuenta que este es un valor que se mantiene estable después de estar la probeta durante un periodo de 5 meses sobre un lecho de arena muy húmedo. Este dato, para un ladrillo de peso medio, supone que en vez de contener entre **115-120** gr de agua, contenga **45-50** gr, lo cual es una cantidad apreciable.
- La dispersión de los valores de absorción es muy significativa, lo que da una idea de lo heterogéneo que es el comportamiento de las fábricas ejecutadas con este tipo de ladrillos de tejar.



MURO DE 1 ASTA SIN BARRERA HIDRÓFUGA

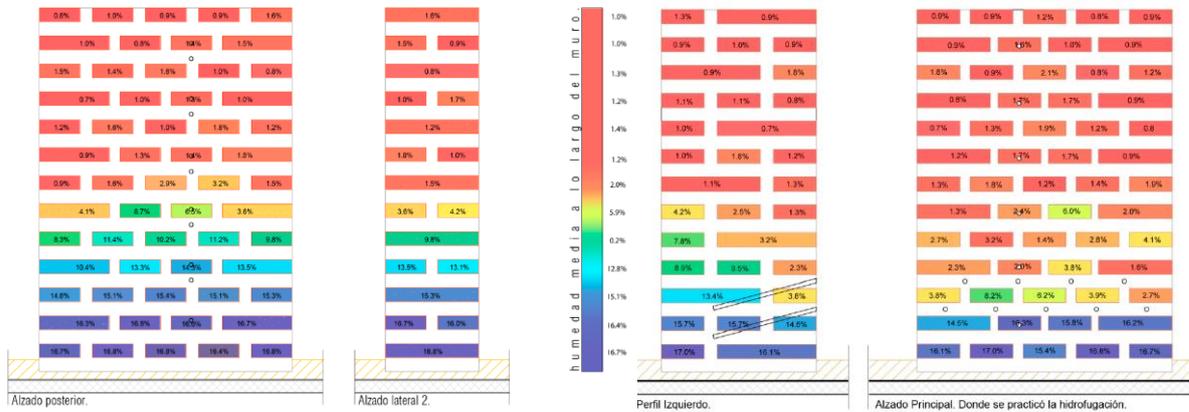
MURO DE 1 ½ ASTA CON BARRERA HIDRÓFUGA

Figura 20. Alzados para comparar los datos de la argamasa de los dos muros de ladrillo de tejar de 1 y 1 ½ asta de espesor, sin y con barrera.

- Sin embargo los datos de la tasa de absorción de la argamasa no presentan variaciones sustanciales, aunque si apreciables, de lo que en principio podemos deducir, que es el ladrillo el material más beneficiado por el corte hídrico. Lo que así parecen corroborar los ejemplos de edificios de fábricas con lesiones por humedad donde los ladrillos pueden estar muy deteriorados mientras que mantienen sus juntas de argamasa intactas. Salvo que la presencia de sales sea muy elevada, lo cual perjudica a las juntas al ser el material que más evapora.
- Hay que hacer constar que para el muro de 1 ½ asta de espesor fue imposible tomar muestras de argamasa de los tendeles donde se generó la barrera hidrófuga para poder ensayarlas. Por lo que no se ha podido facilitar información en dicha zona.

### Comparación entre muros del mismo material

Muro de 1 asta L. moderno sin barrera hidrófuga – Muro de 1 ½ asta de L. moderno con barrera hidrófuga

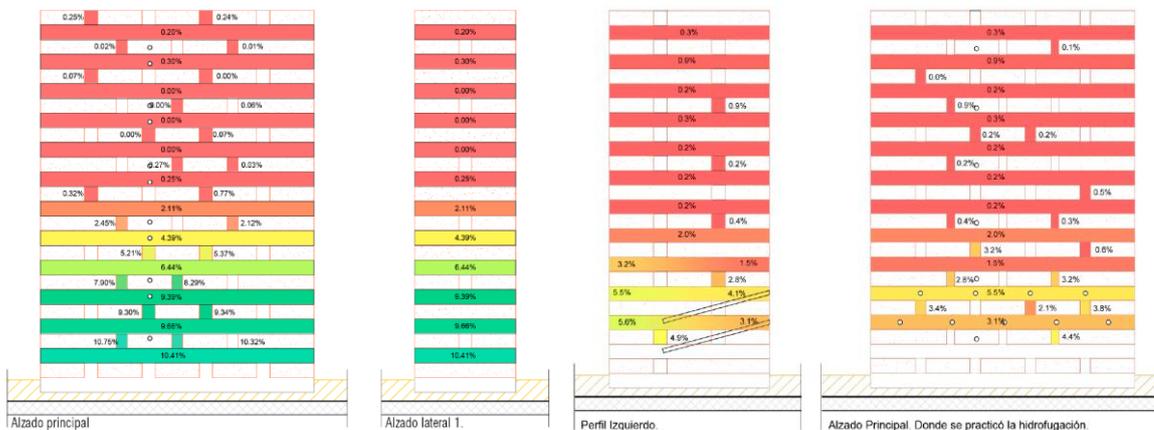


MURO DE 1 ASTA SIN BARRERA HIDRÓFUGA

MURO DE 1 ½ ASTA CON BARRERA HIDRÓFUGA

Figura 21. Alzados para comparar datos de los ladrillos de los dos muros de ladrillo moderno de extrusión de 1 y 1 ½ asta de espesor, sin y con barrera.

- Como se puede comprobar, y al igual que ocurre en los muros de ladrillo rústico, la barrera hidrófuga es altamente eficaz. Los ladrillos situados justo encima de la segunda fila de hidrofugación, a una cota de unos 30 cm, tienen una media en la tasa de absorción, cuando el muro no tiene la barrera hidrófuga, de **15,1%**, y de **4,9%** cuando sí lo está. Dato significativo cuando la probeta ha estado durante un periodo de 5 meses sobre un lecho de arena muy húmedo. Este dato, para un ladrillo de peso medio, supone que en vez de contener entre **285-290** gr de agua, contenga **85-90** gr, lo cual es una cantidad muy apreciable para un ladrillo de estas características.
- A diferencia de lo observado entre los ladrillos rústicos, en este caso la dispersión de los valores de la tasa de absorción no es muy significativa. Esto confirma la idea sobre la homogeneidad de estos ladrillos frente a los del otro tipo.



MURO DE 1 ASTA SIN BARRERA HIDRÓFUGA

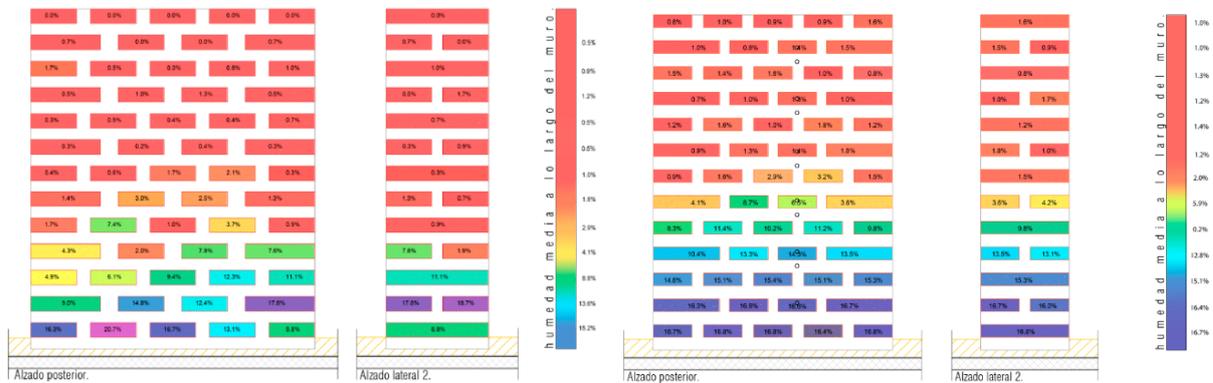
MURO DE 1 ½ ASTA CON BARRERA HIDRÓFUGA

Figura 22. Alzados para comparar los datos de la argamasa de los dos muros de ladrillo moderno de extrusión de 1 y 1 ½ asta de espesor, sin y con barrera.

- A diferencia de lo que ocurre en los muros de ladrillo rústico, en estos hay una diferencia más apreciable entre lo que ocurre con la argamasa en los distintos muros. Las porciones de argamasa situadas justo encima de la segunda fila de hidrofugación, a una cota aproximada de unos 30 cm, tienen una media en de absorción, cuando el muro no tiene la barrera hidrófuga, de **6,44%**, y de **1,50%** cuando si lo está.
- La explicación podría ser que los ladrillos modernos de extrusión, como se puede comprobar en los ensayos correspondientes, retienen más el agua y evaporan menos que los otros ladrillos, y este agua es transvasada a la argamasa, mientras que los ladrillos rústicos la expulsan con más facilidad en vez de transferir esa agua a la argamasa.

**Comparación entre muros de distinto material:**

Muro de 1 asta L. de tejar sin barrera hidrófuga – Muro de 1 asta de L. moderno sin barrera hidrófuga

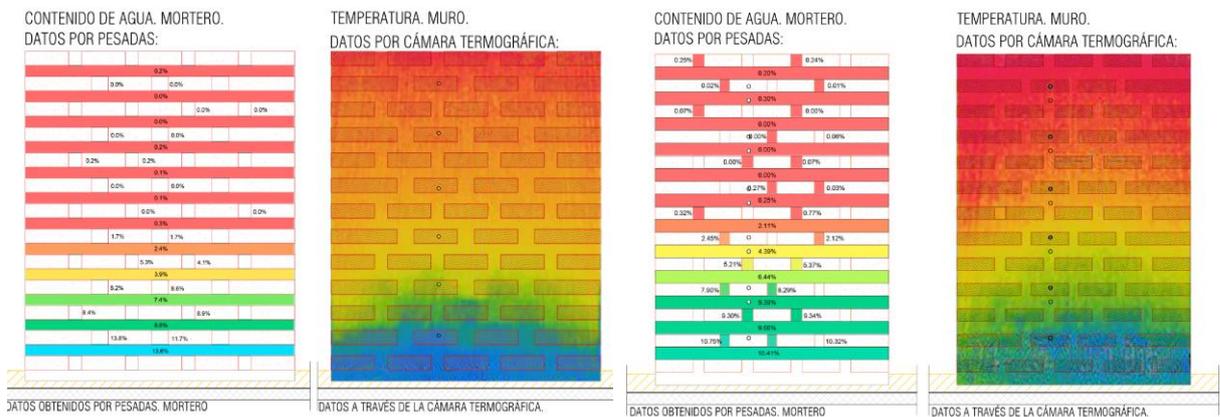


**MURO DE 1 ASTA SIN BARRERA HIDRÓFUGA**

**MURO DE 1 ASTA SIN BARRERA HIDRÓFUGA**

**Figura 23. Alzados para comparar datos de los ladrillos de los dos muros de 1 asta de espesor, de ladrillo de tejar y de ladrillo moderno, sin la barrera hidrófuga. A la izquierda muro de ladrillo de tejar. A la derecha muro de ladrillo moderno**

- La ausencia de la barrera hidrófuga hace que la humedad alcance una altura en torno a los 55 cm y los 60 cm, para cada tipo de ladrillo.
- Se aprecia con nitidez que el ladrillo rústico retiene mucha menos cantidad de agua en su interior que el moderno. Lo que demuestra que este tipo de muro evapora el agua con mucha más facilidad. Sin embargo aun conteniendo menos cantidad de agua, da la impresión que la altura del frente húmedo es muy similar.



**MURO DE 1 ASTA SIN BARRERA HIDRÓFUGA**

**MURO DE 1½ ASTA CON BARRERA HIDRÓFUGA**

**Figura 24. Alzados para comparar datos de la argamasa de los dos muros de 1 asta de espesor, de ladrillo de tejar y de ladrillo moderno, sin la barrera hidrófuga. A la izquierda muro de ladrillo de tejar. A la derecha muro de ladrillo moderno**

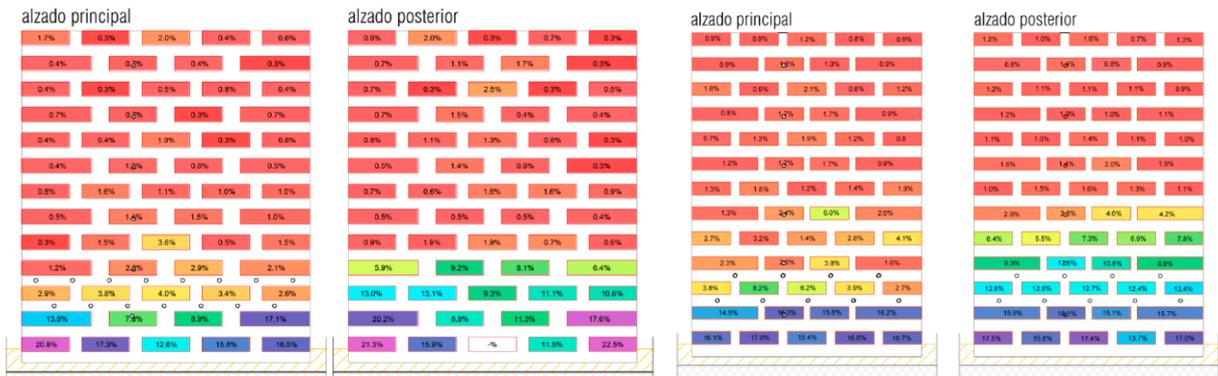
- Las juntas de argamasa tienen sin embargo unos valores similares en ambos muros, parece que actúen como meros transmisores de la humedad por capilaridad a su través al diseñar una retícula en continuidad conformada por las llagas y los tendeles. Por otra parte es lógico este comportamiento ya que la argamasa es un material

prácticamente idéntico, a diferencia de los que ocurre con los ladrillos, en todos los muros y ensayos. Las proporciones son de 1:3 (cal/arena) y la forma de amasado y de colocación ha sido muy similar en todos los casos.

- La cámara termográfica nos aporta una imagen muy reveladora de la presencia de la humedad, con esa forma característica en forma de montaña, cuando existe desorción por las caras laterales.

**Comparación entre muros de distinto material:**

Muro de 1 ½ asta L. de tejar con barrera hidrófuga – Muro de 1 ½ asta L. moderno con barrera hidrófuga

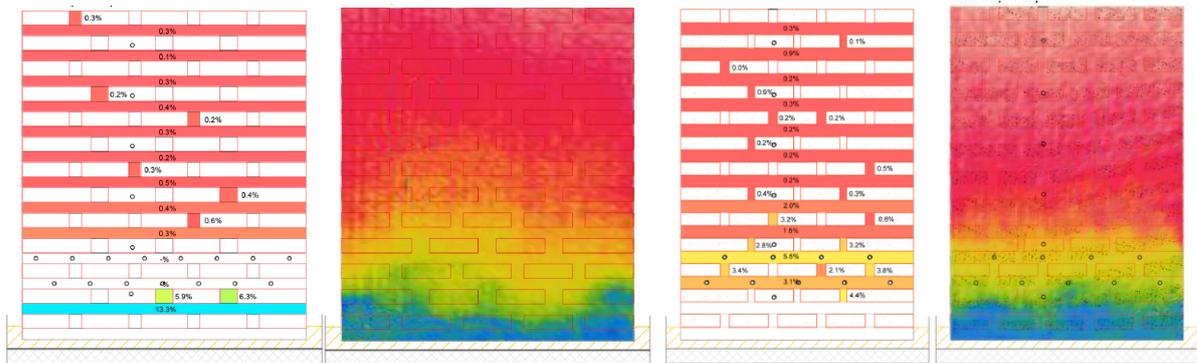


**MURO DE 1½ ASTA CON BARRERA HIDRÓFUGA**

**MURO DE 1½ ASTA CON BARRERA HIDRÓFUGA**

**Figura 25. Alzados para comparar datos de los ladrillos de los dos muros de 1½ asta de espesor, de ladrillo de tejar y de ladrillo moderno, con barrera hidrófuga. A la izquierda muro de ladrillo de tejar. A la derecha muro de ladrillo moderno**

- La barrera hidrófuga genera un corte hídrico muy eficaz en ambos muros, de modo que por encima de la línea superior de hidrofugación, sobre todo en la cara por donde se produce la inyección del producto, la cantidad de agua absorbida por los ladrillos en ambos casos es mínima y se reduce sustancialmente respecto de las hiladas inferiores. Pasando de valores que oscilan entre el **8%** y el **17%** a valores entre el **2,6%** y el **4%** en el caso del muro de ladrillos modernos, y de valores que están entre el **15%** y el **16%** a valores que se sitúan entre el **2,7%** y el **8%** para el ladrillo de tejar.



**MURO DE 1½ ASTA CON BARRERA HIDRÓFUGA**

**MURO DE 1½ ASTA CON BARRERA HIDRÓFUGA**

**Figura 26. Alzados para comparar datos de las argamasas de los dos muros de 1½ asta de espesor, de ladrillo de tejar y de ladrillo moderno, con barrera hidrófuga. A la izquierda muro de ladrillo de tejar. A la derecha muro de ladrillo moderno**

- Se muestran en estas imágenes los valores de absorción de la argamasa en las caras principales de las probetas de 1 ½ asta hidrofugadas, y las correspondientes imágenes termográficas. El resultado es la confirmación de la eficacia de la barrera de corte hídrico, y como varía la forma del frente húmedo, que parece “adivinar” los puntos débiles de la barrera, por donde se intenta filtra irregularmente la humedad capilar.

### **Apartado 3. Comparación de gráficas temporales**

Se muestran y comentan a continuación las gráficas que recogen todo el proceso de absorción y desorción del ensayo realizado. Hay cuatro gráficas, una por cada muro. El proceso temporal se puede dividir en tres fases:

- Ejecución de los muros

**FASE 1:** Tiempo de secado inicial una vez ejecutados los muros

- Hidrofugación de dos de los muros

**FASE 2:** Tiempo de secado de la humedad aportada por los hidrofugantes

**FASE 3:** Tiempo de subida de la humedad por ascensión capilar

- Fin del ensayo y desmontaje

La **FASE 1** transcurre desde la ejecución de los cuatro muros hasta que se han secado lo suficiente como para que las sondas marquen todos ellos valores por debajo del 100% de humedad. Una vez llegado a este punto, se procede al inyectado por gravedad del producto hidrofugante. Este proceso comienza en mayo de 2010, con la construcción de los cuatro muros y finaliza en mayo de 2011 con la hidrofugación de las dos hiladas inferiores. Un proceso que se prolonga por lo tanto durante un año.

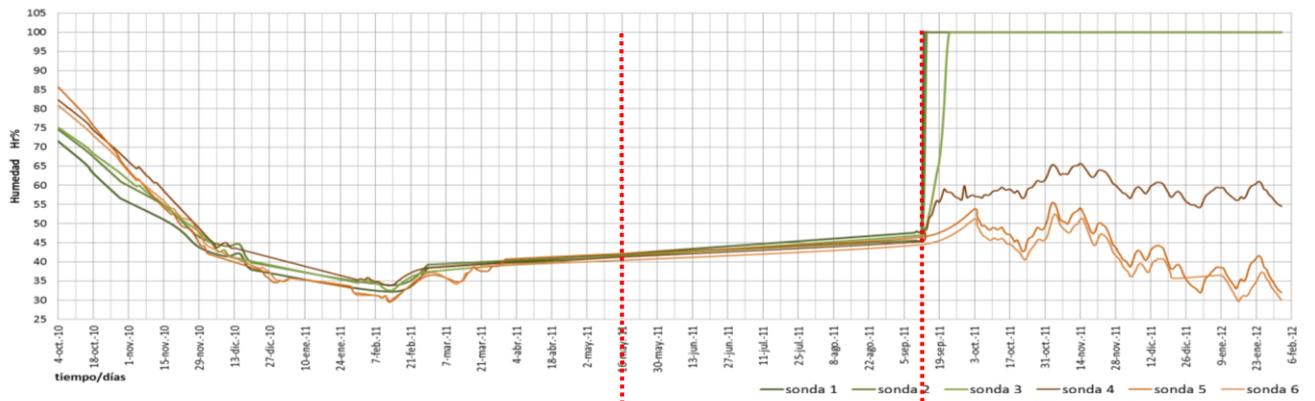
La **FASE 2** es el periodo de tiempo que tarda en bajar la humedad debida al proceso de hidrofugación. El motivo es que al realizar la inyección del hidrofugante algunas de las sondas vuelven a disparar sus valores hasta el 100% de humedad, y es necesario volver a esperar a que se produzca un nuevo secado y esos valores se reduzcan. Se prolonga desde mayo del 2011 hasta septiembre de 2011.

La **FASE 3** es aquella en la que se produce el llenado de la balsa con agua, de modo que se forme un lecho húmedo que será el causante de la ascensión del agua por capilaridad. Abarca esta fase desde septiembre de 2011 hasta el desmontaje que se realizó en mayo de 2012.

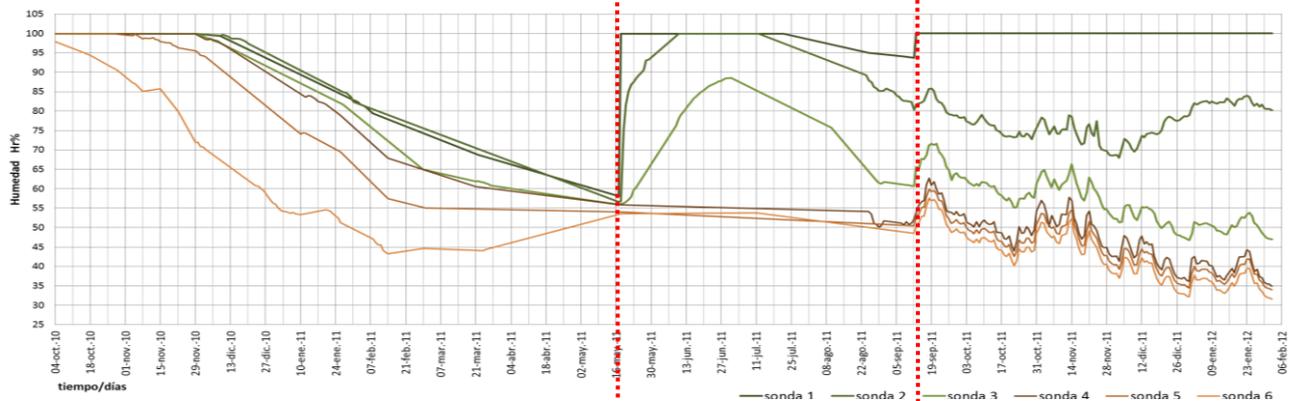
El ensayo termina cuando los datos recogidos por las sondas se estabilizan o sufren incrementos muy leves y con tendencias predecibles.

Se muestran a continuación las cuatro gráficas conjuntas, si bien en este caso quedan excesivamente reducidas, para poder apreciar y comparar el comportamiento de los cuatro muros simultáneamente, pero también se muestran por separado en los correspondientes DIN A-3, al final del capítulo de este ensayo.

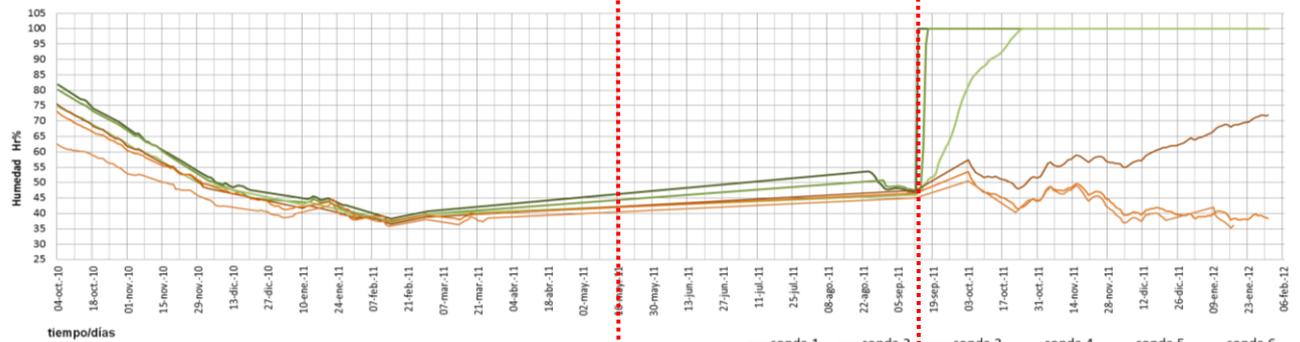
INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGO



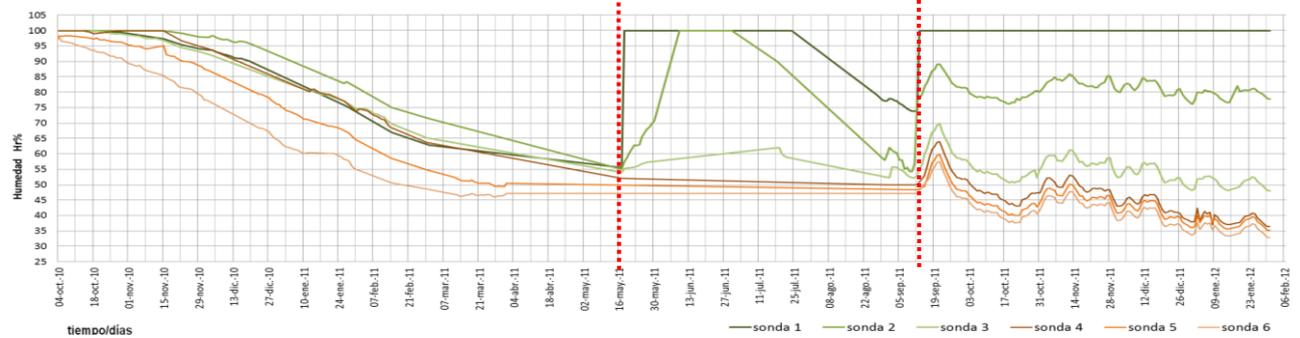
Gráfica 24. Muro de 1 asta de espesor de ladrillo de tejar sin barrera hidrófuga



Gráfica 25. Muro de 1 1/2 asta de espesor de ladrillo de tejar con barrera hidrófuga



Gráfica 26. Muro de 1 asta de espesor de ladrillo de moderno de extrusión sin barrera hidrófuga



Gráfica 27. Muro de 1 1/2 asta de espesor de ladrillo de moderno de extrusión con barrera hidrófuga

Gráficas para cada tipo de muro que muestran la evolución, a lo largo del tiempo, de la humedad en % detectada por las sondas. Las líneas rojas delimitan las distintas fases descritas.

De la observación de las cuatro gráficas se pueden deducir las siguientes consideraciones:

- Lo primero que llama la atención es lo **extensos** que son en el tiempo los procesos de entrada y de salida de agua de las fábricas. Estos procesos son diferentes uno del otro. Por un lado están los procesos de absorción de agua por capilaridad, y por otros los de desorción.
- Los procesos de secado tienen duraciones diferentes según el espesor del muro, así pues, desde su construcción hasta que tienen unos valores relativamente cercanos a los del ambiente **los muros de un asta de espesor han necesitado un periodo de aproximadamente 9 meses**, y **los muros de 1 ½ asta de unos 12 meses**, en las condiciones de humedad y temperatura del laboratorio.
- Los procesos de secado de los muros más estrechos tienen la gráfica en forma de rama de parábola y los más gruesos se aproximan más en su forma a la de una rama de parábola invertida, es decir su descenso es diferente.
- Si analizamos los dos muros de ladrillo de 1 asta, podemos observar que el ejecutado con ladrillos antiguos de tejar, en el proceso de desorción de la Fase 1, pierde agua más rápidamente que el ejecutado con ladrillo moderno. Podemos también comprobar que todas las gráficas de las sondas de ambos muros, cuando ya han perdido una cantidad considerable de agua, convergen en unos valores muy cercanos entre sí y a los del ambiente.
- En los procesos de absorción de los muros de un asta, (ver gráficas relativos a las primeras 72 horas y los primeros 4 meses) el realizado con ladrillos modernos aumenta sus valores mucho más lentamente que el muro ejecutado con ladrillos de tejar. De tal manera podemos concluir que **las fábricas ejecutadas con ladrillos de tejar, tienen más facilidad y rapidez tanto para los procesos de absorción como para los procesos de desorción**. Lo cual parece lógico al tener una red de poros mucho más grandes.
- En los muros de 1 asta de espesor se observa que ambos mantienen, durante toda la duración del ensayo, tres de las seis sondas por debajo del 100% de humedad. El muro ejecutado con ladrillos modernos muestra la cuarta sonda en un proceso lento, pero imparable, de ascensión. Coincide esta observación con lo expuesto por Z. Zang sobre la extensión de los ensayos de laboratorio y los lentos procesos de absorción de agua<sup>86</sup>

---

<sup>86</sup> ZHANG Z. *A review of rising damp in masonry buildings*. Advanced polymer and composite research group. Department of Mechanical and Design Engineering, University of Portsmouth, Anglesea Building, Portsmouth,

- Una vez que se produce el llenado de agua de la base, se pueden describir los siguientes comportamientos:

*En los muros de 1 ½ asta de ladrillo de tejar y de ladrillo moderno hidrofugados.*

- En los muros de 1 ½ asta de espesor, aquellos en los que se ha procedido a la hidrofugación, ninguna de las sondas, excepto la que se sitúa por debajo de la línea de hidrofugación alcanza en ningún momento el 100% de humedad. Por lo tanto **la hidrofugación ha sido altamente eficaz.**
- Las tres sondas superiores de estos muros (sondas 4, 5 y 6, por encima de la cota de los 55-60 cm) “caminan” prácticamente a la par y con valores cercanos a los del ambiente, ajenas totalmente a la influencia de la humedad.
- Son las dos sondas restantes, (sondas 2 y 3, a 30 y 45 cm de altura respectivamente) las que presentan una muy leve influencia de la humedad que proviene del lecho inferior; y de las dos, la sonda 3, prácticamente no se ve afectada.

*En los muros de 1 asta de ladrillo de tejar y de ladrillo moderno NO hidrofugados.*

- En dichos muros de 1 asta de espesor, los que no han sido sometidos a ningún proceso de hidrofugación, tres de las sondas alcanzan rápidamente el valor del 100% en las sondas termohigrométricas. La influencia de la humedad por capilaridad alcanza los 45 cm, sin problema.
- La sonda 4, situada a 60 cm de cota, se ve afectada ligeramente por la humedad en el muro de los ladrillos de ejecución moderna.
- Las dos sondas superiores de estos muros (sondas 5 y 6, por encima de la cota de los 75 cm) prácticamente son ajenas totalmente a la influencia de la capilaridad.

#### Apartado 4. Comparativa entre la cantidad de agua almacenada en argamasas y en ladrillos

En las gráficas adjuntas de los muros de un asta sin hidrofugar se muestran las cantidades de agua en litros/m<sup>3</sup> (litros de agua por metro cúbico de muro) que alberga cada uno de los dos materiales. Se pueden apreciar las distintas cantidades de agua que albergan las bandas de argamasa de cal y los ladrillos. Las gamas de color muestran con nitidez que, en ambos casos, **la argamasa contiene menos cantidad de agua que los ladrillos**. Encontramos variaciones, en los valores de volumen de agua por m<sup>3</sup> de material, de la argamasa respecto del ladrillo, situados a la misma cota, que pueden llegar al **70%** y al **61%** para el caso los ladrillos de tejar y de los modernos respectivamente.<sup>87</sup>

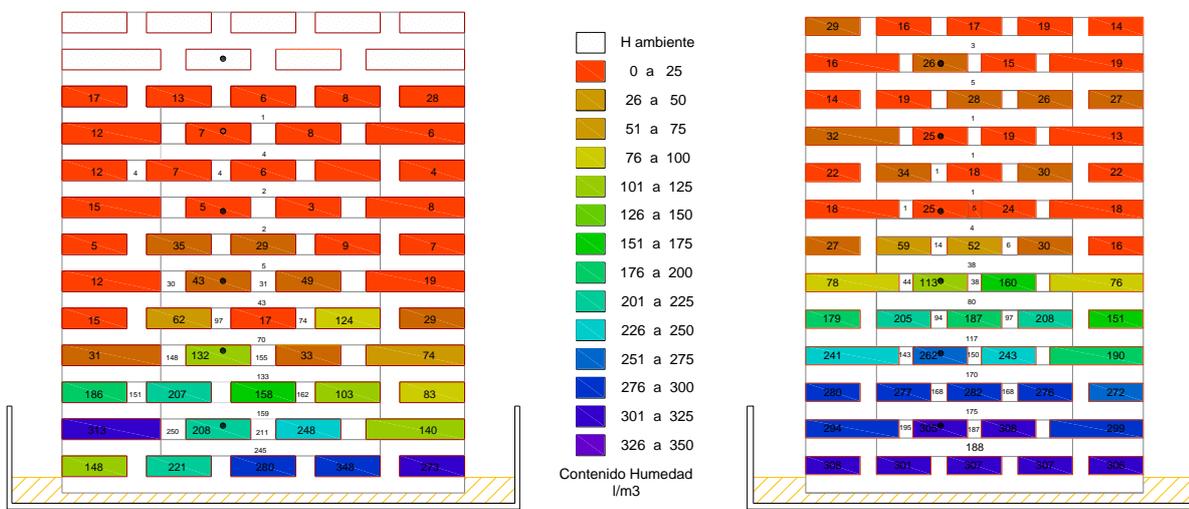


Figura 27. Contenido de humedad en l/m<sup>3</sup> en los ladrillos de los dos muretes. A la izquierda ladrillo de tejar, y a la derecha ladrillo moderno



Figura 28. Contenido de humedad en l/m<sup>3</sup> en las juntas de argamasa de los dos muretes. A la izquierda ladrillo de tejar, y a la derecha ladrillo moderno

<sup>87</sup> Camino, M.S.; León, F.J.; Llorente, A.; Olivar, J.M. (2014). Evaluation of behavior of brick tile masonry and mortar due to capillary rise of moisture Mater. Construcc. 64 (314), e020 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.02513>

Se aprecia con claridad la homogeneidad en la gradación de los colores en las argamasas de cal en ambos muros, y en los ladrillos modernos fabricados por extrusión, y mayor heterogeneidad en los ladrillos de tejar.

## VII. Conclusiones

Tras lo expuesto en los apartados anteriores, del ensayo sobre los cuatro muros se pueden deducir las siguientes conclusiones:

1. **La termografía es una técnica muy eficaz para evaluar la presencia de agua** en las fábricas. Además cuenta con la ventaja de ser una técnica No Destructiva.
2. Los comportamientos de la argamasa y del ladrillo dentro de la fábrica son muy diferentes. **La argamasa acumula en su interior mucha menos agua que el ladrillo**. Sin embargo **la subida capilar es más rápida en la argamasa que en el ladrillo y la velocidad de evaporación también lo es**.
3. En fábricas no hidrofugadas, con espesores como los que tienen los muros ensayados, la influencia del agua por capilaridad permite que el frente húmedo pueda alcanzar cotas que puede llegar a situarse entre los **45 y los 60 cm**.
4. En fábricas cuyas juntas de argamasa están tratadas con barreras químicas de corte hídrico, ejecutadas con productos hidrofugantes de las características que hemos utilizado o similares, la humedad por capilaridad prácticamente no alcanza los **30 cm**. Se puede afirmar que esta cota descenderá a la altura a la que se efectúe la hidrofugación, y que en principio debería ejecutarse lo más bajo posible que permita la ejecución material de dicha hidrofugación. Por lo tanto **la barrera de corte hídrico** realizada a base de productos hidrofugantes, **es altamente eficaz**. Consiguiéndose en la hilada situada justo a continuación de la hidrofugación las siguientes reducciones en el porcentaje de humedad:

REDUCCIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD QUE SE PRODUCE EN LOS MATERIALES			
En las fábricas de ladrillo "moderno"		En las fábricas de ladrillo de tejar	
En el ladrillo	En la argamasa	En el ladrillo	En la argamasa
<b>49,9 %</b>	<b>63,5 %</b>	<b>40,2 %</b>	<b>39,7 %</b>

Tabla 42. Tabla que muestra la reducción los porcentajes de agua debido a la existencia de la barrera hidrófuga

Para el cálculo de estos porcentajes se han tomado como referencia y se han comparado los valores de los porcentajes de humedad de cada uno de los ambos materiales cuando están situados en la misma hilada y según estén en el muro con la barrera hidrófuga o no. Así pues se ha comparado la media del porcentaje de humedad de todos los ladrillos situados justo encima de la línea de hidrofugación en el muro de 1 asta sin barrera hidrófuga con la media de los ladrillos situados en ese mismo nivel en el muro de 1 ½ asta con barrera hidrófuga. Esto para ambos tipos de ladrillos y para las argamasas de ambos tipos de muros.

5. El agua sube más, pero más lentamente, en los muros de ladrillo moderno que en los de tejar. Hay una relación directa, que entra dentro de lo previsible, entre dimensión de poro e influencia de la capilaridad. Los ladrillos de ejecución moderna son de una estructura interna con poros mucho más finos y capilares que la de los ladrillos de tejar cuyos poros son de mayor dimensión. Esto provoca que la evaporación que se produce en los ladrillos de tejar, y por ende en las fábricas con ellos ejecutadas, sea mayor que la evaporación generada en el otro tipo de ladrillos y sus correspondientes fábricas.
6. Los datos sobre la cantidad máxima de agua que pueden absorber los ladrillos situados en las zonas inferiores de los muros, se acercan mucho a los que se obtienen del ensayo por inmersión en agua fría, **UNE EN 67027.84**, ya derogada, pero muy válida, según los datos de este ensayo, para sacar conclusiones fiables en este aspecto.
7. Los ladrillos rústicos, y las fábricas con ellos ejecutados, presentan unos comportamientos y unos datos con una gran dispersión, que contrasta con la mayor uniformidad que caracteriza en los ensayos a los ladrillos de ejecución moderna. Esto da idea de la gran heterogeneidad que presentan no sólo los ladrillos de tejar, sino las fábricas con ellos construidas.

## **DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DE LOS MUROS**

PORCENTAJES DE HUMEDAD OBTENIDA DE PESADAS

DATOS DE LAS SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS

IMÁGENES OBTENIDAS CON LA CÁMARA TERMOGRÁFICA



MURO DE LADRILLO MODERNO DE EXTRUSIÓN TIPO "SANTOVEÑA" \_ ESPESOR: 1 ASTA

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LA PESADA DE LADRILLOS Y PORCIONES DE ARGAMASA

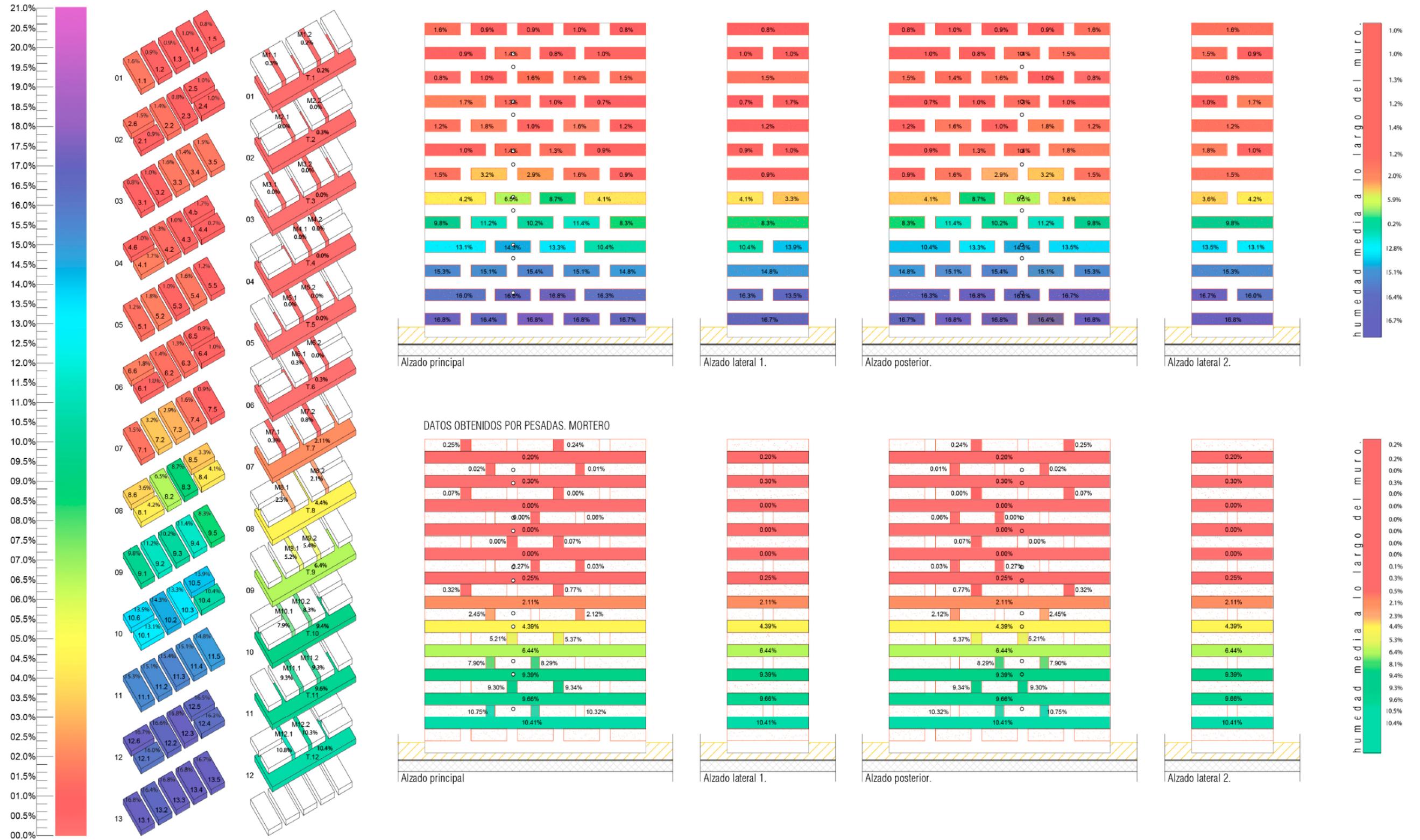


Figura 29. Infografía generada a partir de datos obtenidos por pesada

MURO DE LADRILLO MODERNO DE EXTRUSIÓN TIPO "SANTOVEÑA" \_ ESPESOR: 1 ASTA

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LAS IMÁGENES OBTENIDAS CON LA CÁMARA TERMOGRÁFICA

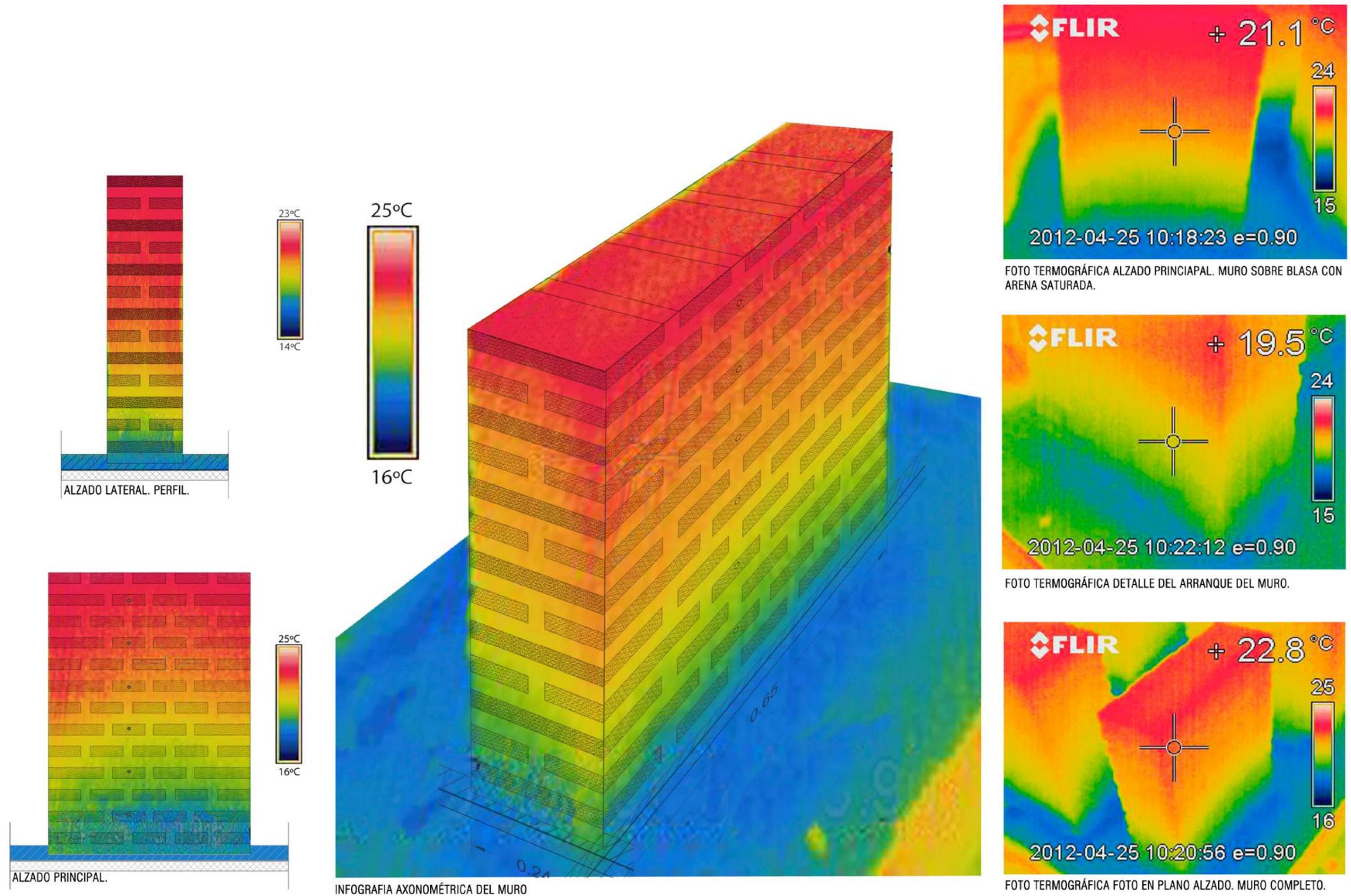


Figura 30. Infografía generada a partir de imágenes obtenidas con cámara termográfica

MURO DE LADRILLO MODERNO DE EXTRUSIÓN TIPO "SANTOVEÑA" \_ ESPESOR: 1 ASTA

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS DE SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS INTRODUCIDAS EN PERFORACIONES

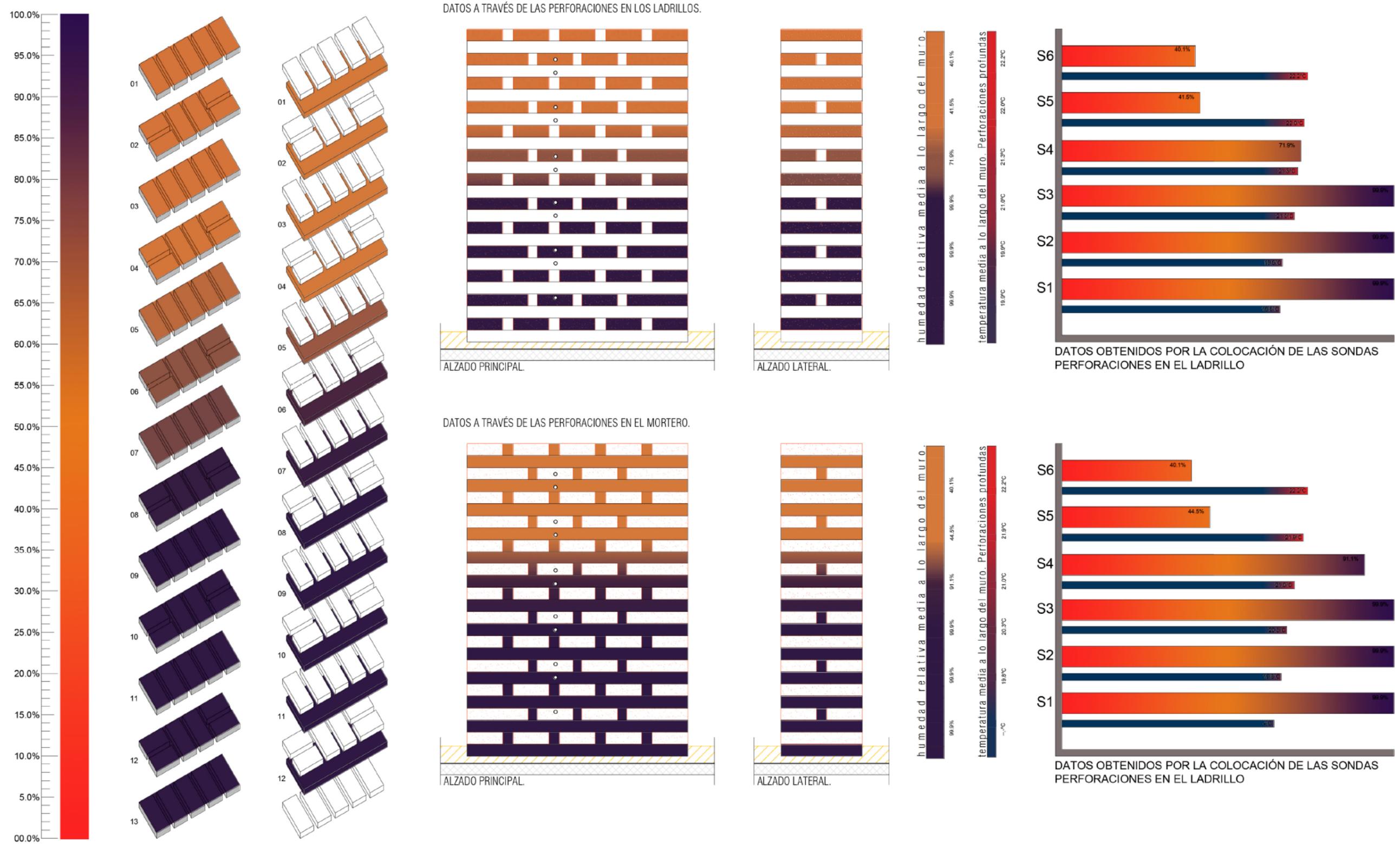


Figura 31. Infografía generada a partir de los datos obtenidos de sondas termohigrométricas

MURO DE LADRILLO MODERNO DE EXTRUSIÓN TIPO "SANTOVEÑA" \_ ESPESOR: 1 ASTA

LÁMINA RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR PESADAS, SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS Y CÁMARA TERMOGRÁFICA

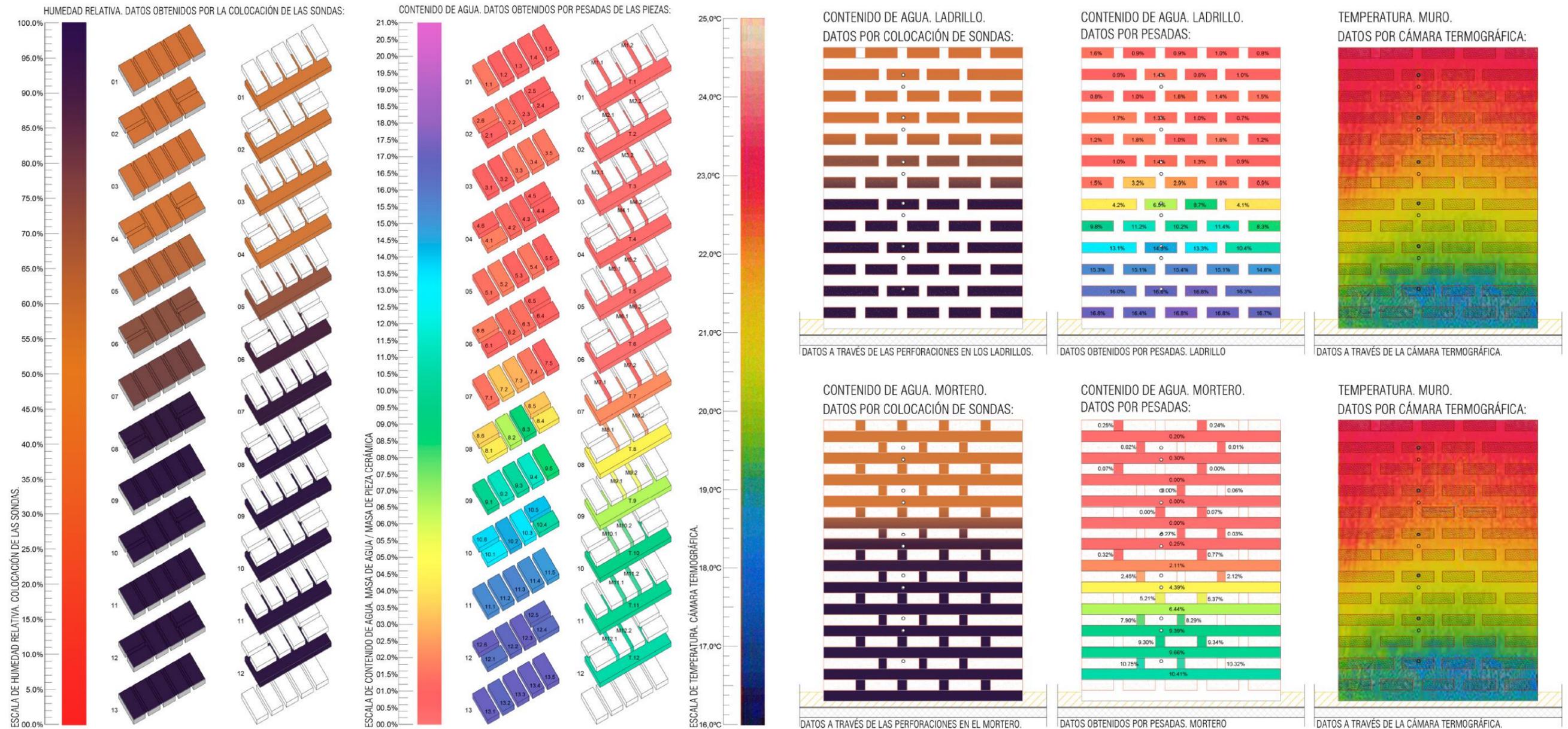


Figura 32. Lámina resumen de los datos obtenidos por pesadas, sondas y cámara termográfica

MURO DE LADRILLO DE TEJAR TIPO "LA OPERARIA" \_ ESPESOR: 1 ASTA

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LA PESADA DE LADRILLOS Y PORCIONES DE ARGAMASA

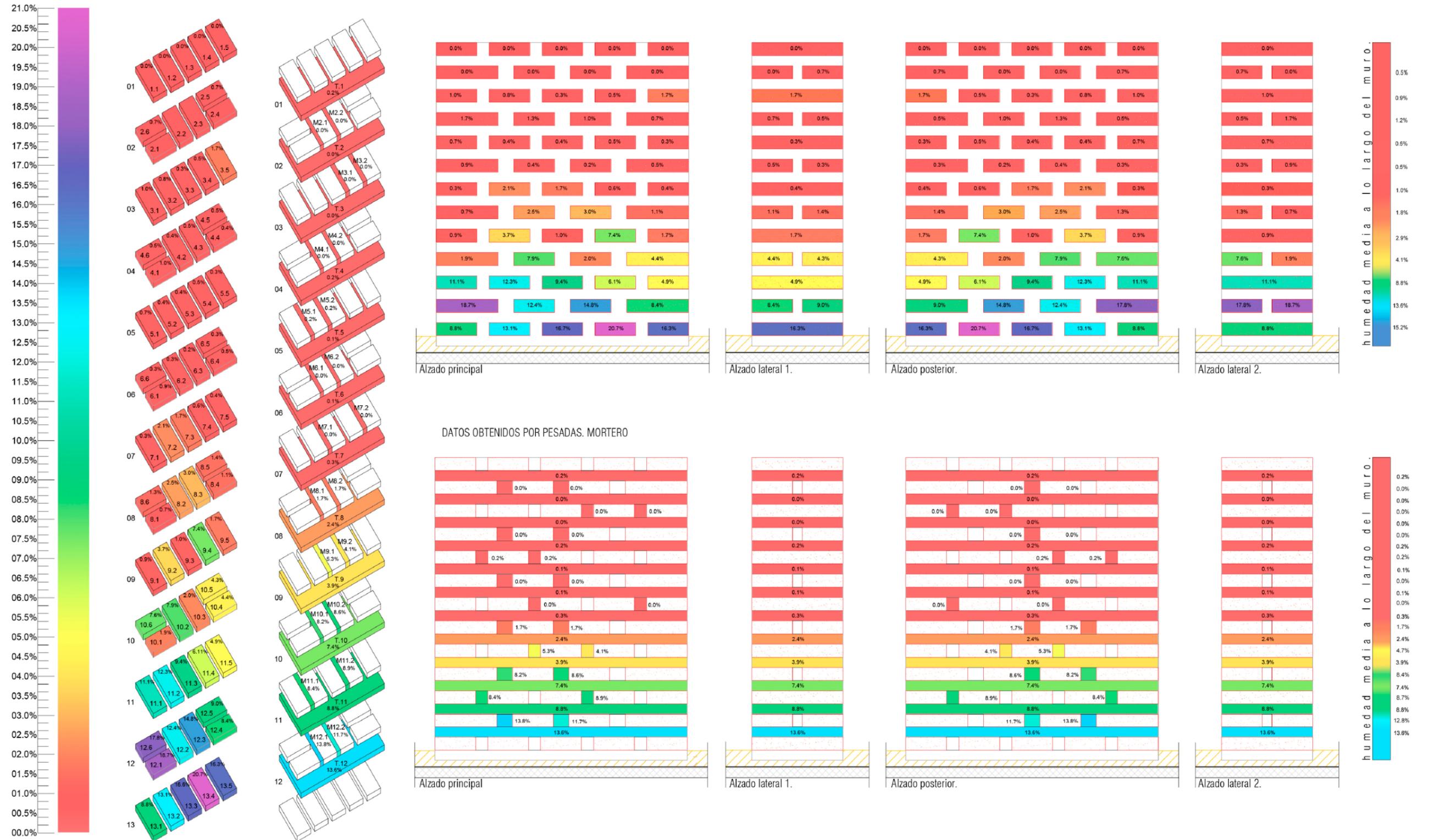


Figura 33. Infografía generada a partir de datos obtenidos por pesada

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LAS IMÁGENES OBTENIDAS CON LA CÁMARA TERMOGRÁFICA

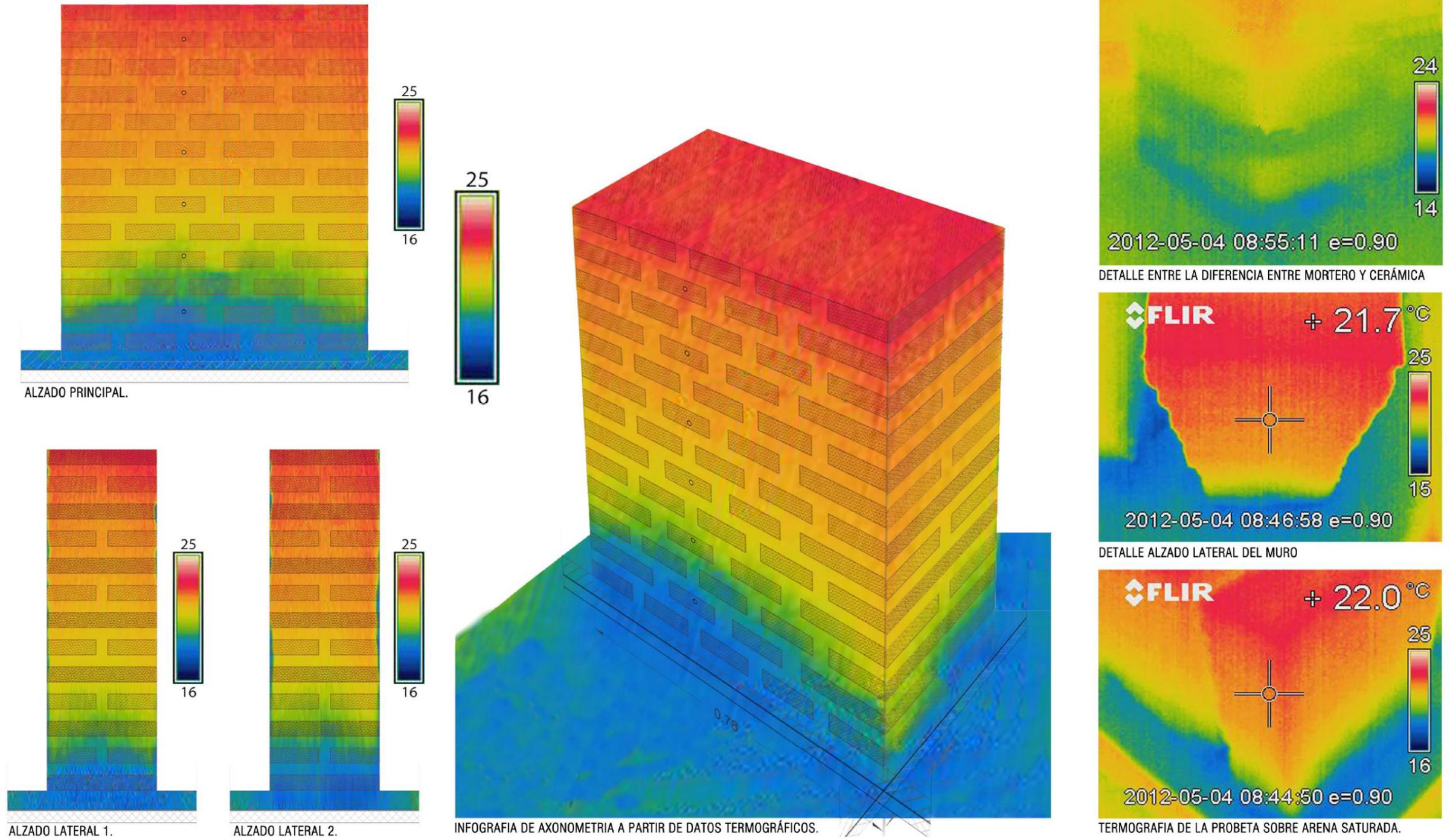


Figura 34. Infografía generada a partir de imágenes obtenidas con cámara termográfica

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS DE SONIDAS TERMOHIGROMÉTRICAS INTRODUCIDAS EN PERFORACIONES

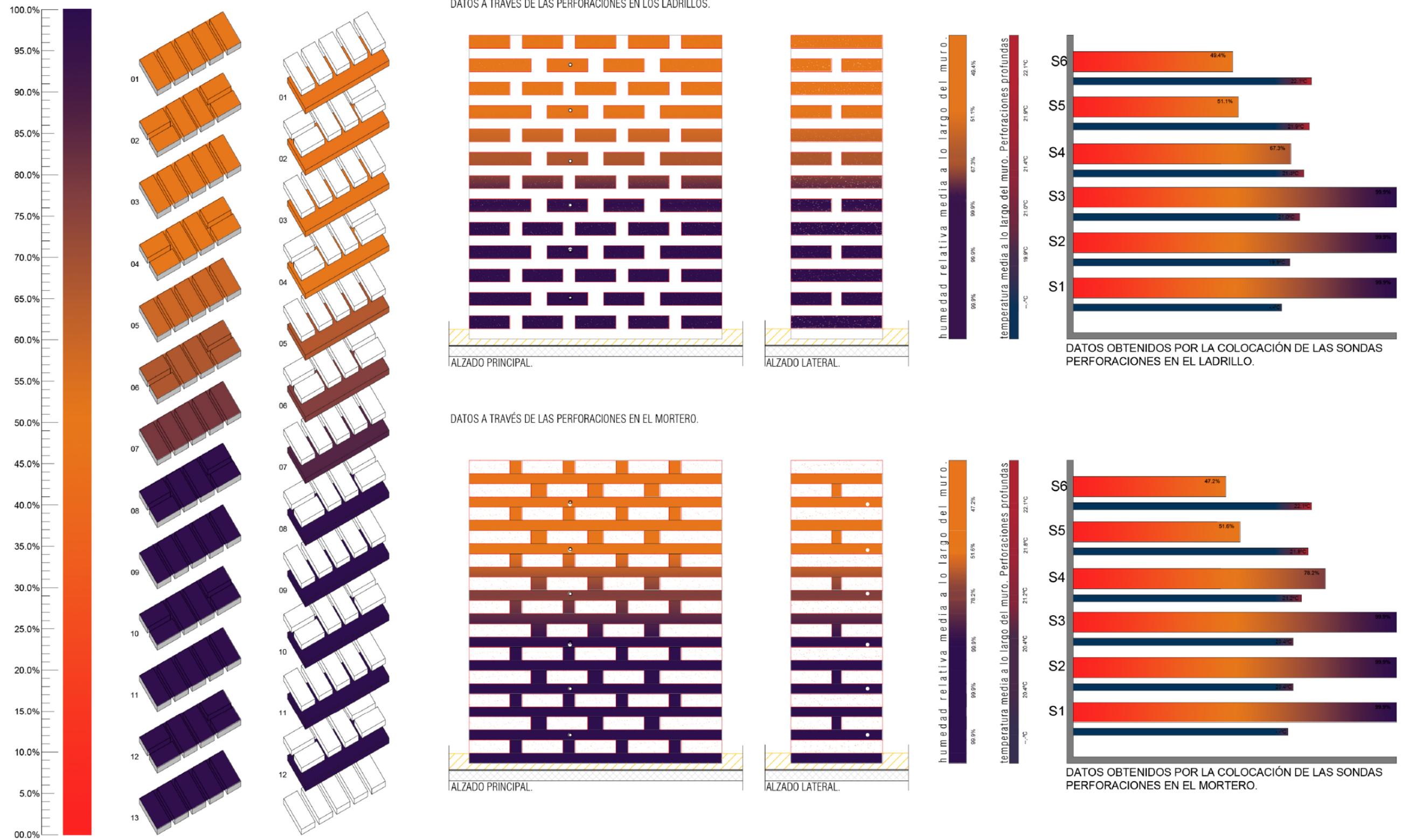


Figura 35. Infografía generada a partir de los datos obtenidos de sondas termohigrométricas

LÁMINA RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR PESADAS, SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS Y CÁMARA TERMOGRÁFICA

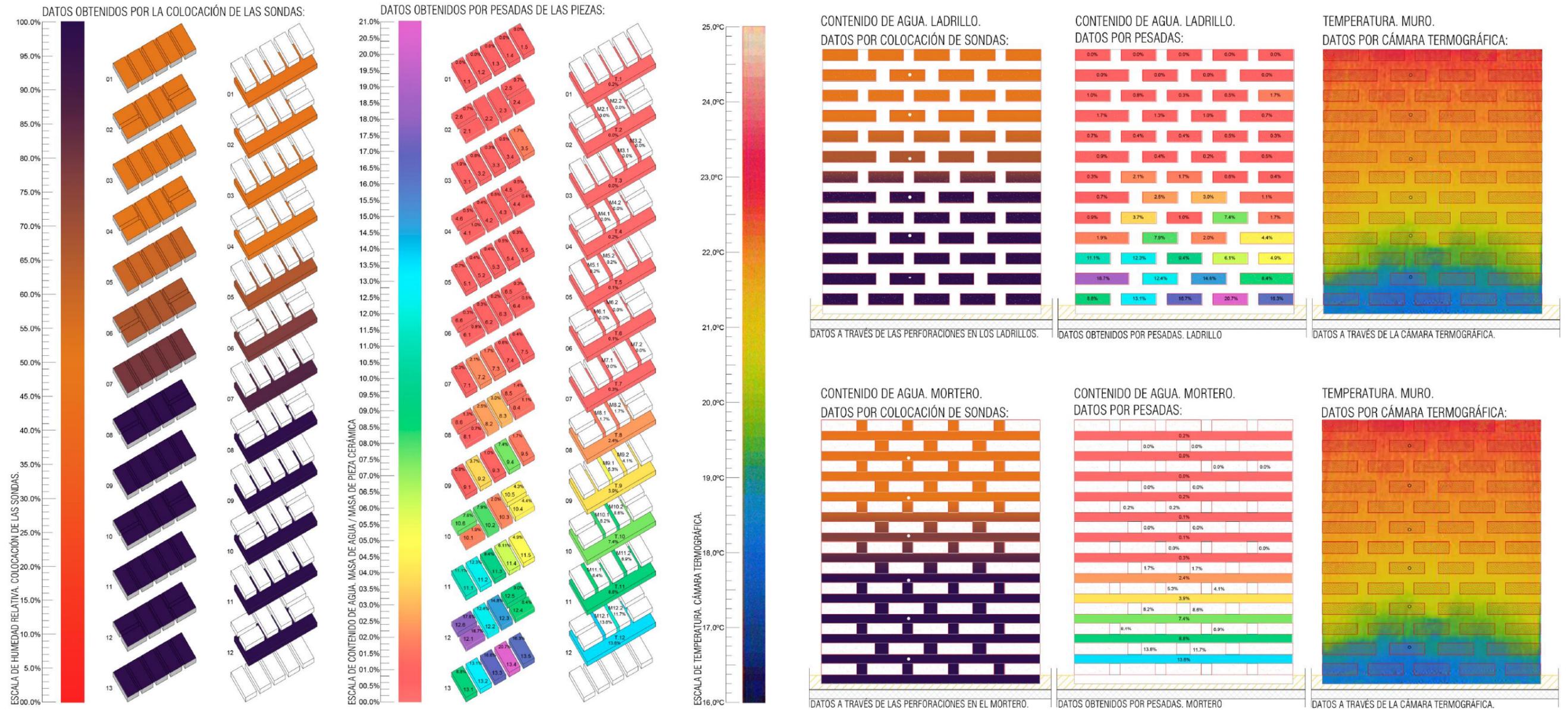


Figura 36. Lámina resumen de los datos obtenidos por pesadas, sondas termohigrométricas y cámara termográfica

MURO DE LADRILLO MODERNO DE EXTRUSIÓN TIPO "SANTOVEÑA" \_ ESPESOR: 1 ASTA Y MEDIA

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LA PESADA DE LADRILLOS Y PORCIONES DE ARGAMASA



Figura 37. Infografía generada a partir de datos obtenidos por pesada

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LAS IMÁGENES OBTENIDAS CON LA CÁMARA TERMOGRÁFICA

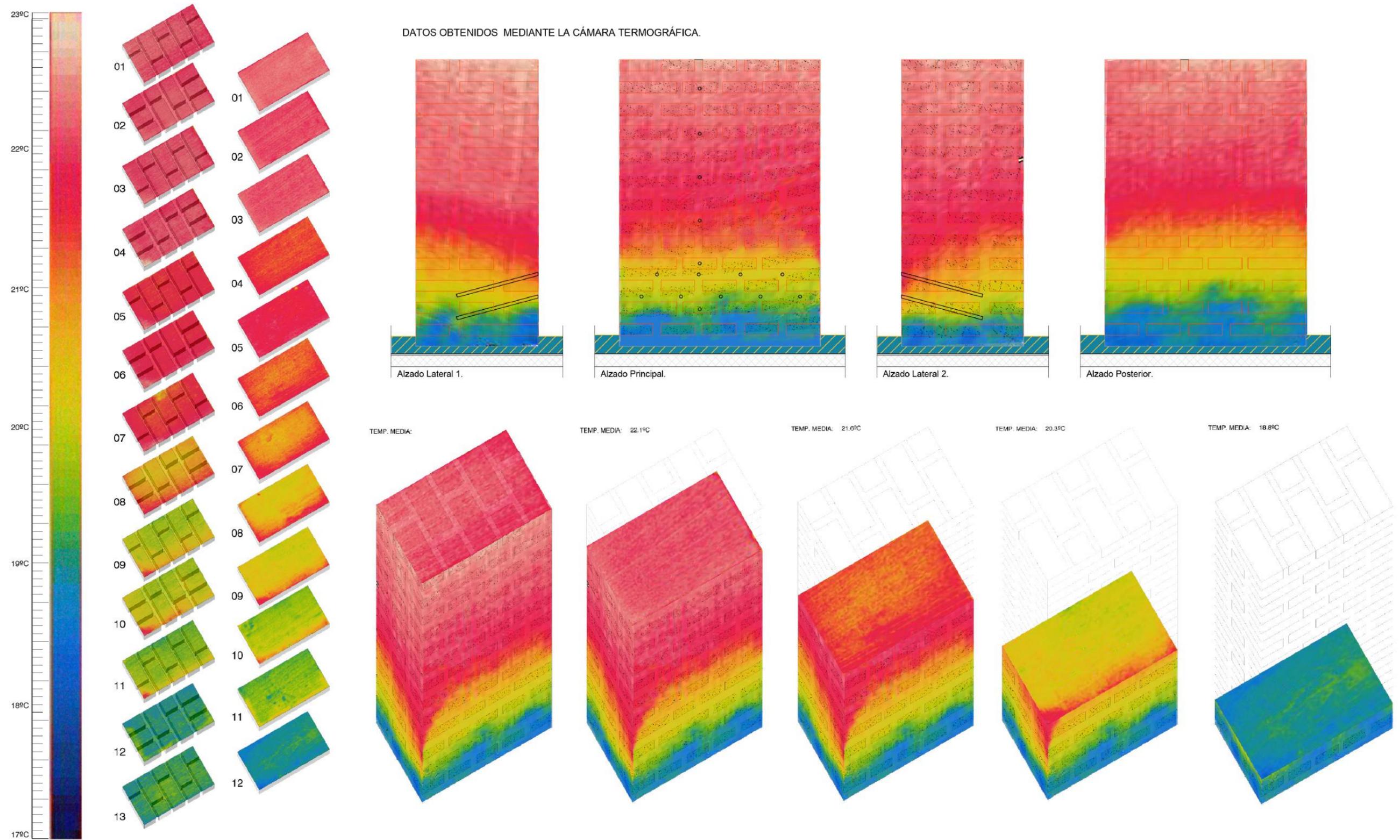


Figura 38. Infografía generada a partir de imágenes obtenidas con cámara termográfica

MURO DE LADRILLO MODERNO DE EXTRUSIÓN TIPO "SANTOVEÑA" \_ ESPESOR: 1 ASTA Y MEDIA

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS DE SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS INTRODUCIDAS EN PERFORACIONES

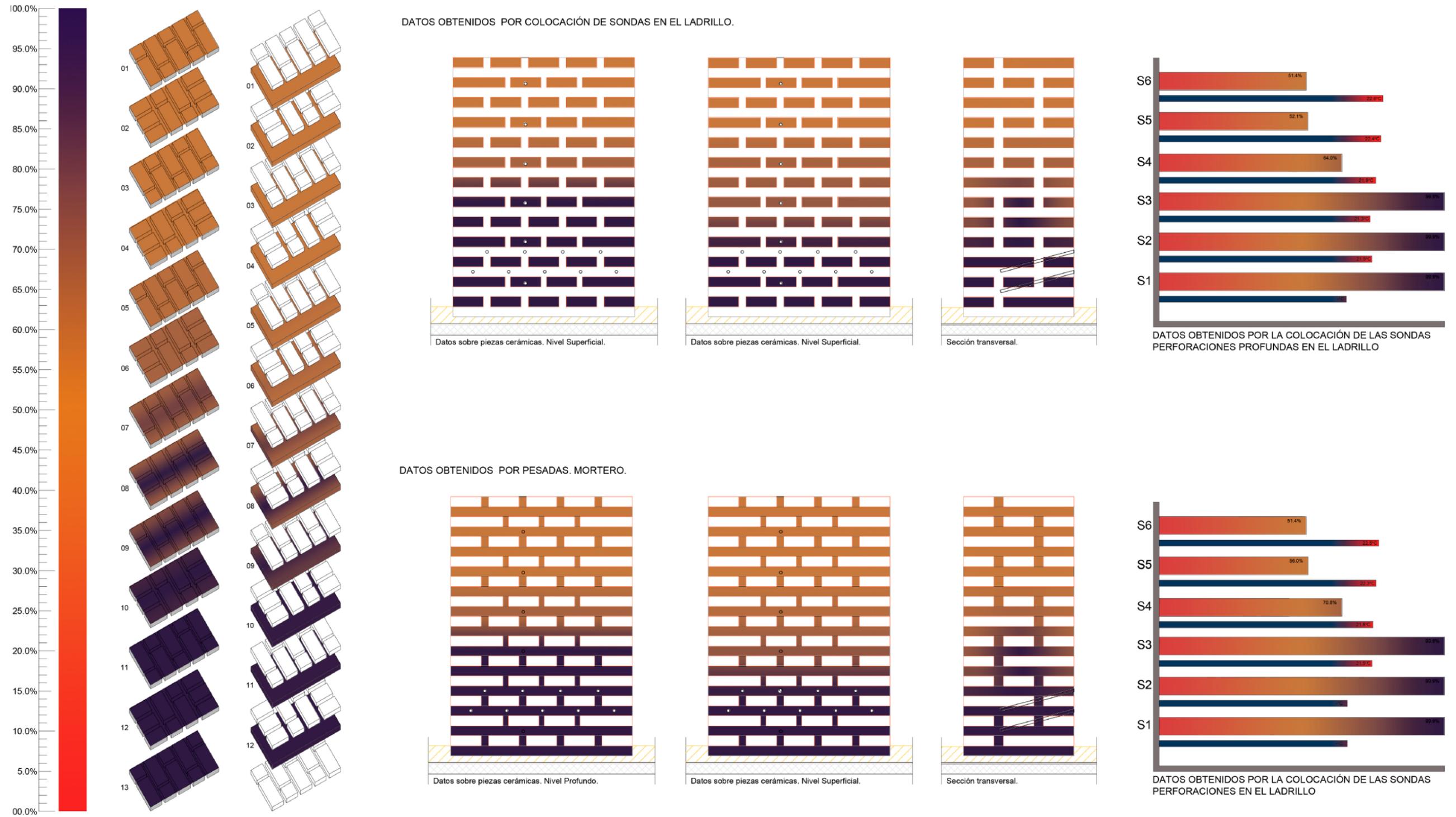


Figura 39. Infografía generada a partir de los datos obtenidos de sondas termohigrométricas

MURO DE LADRILLO MODERNO DE EXTRUSIÓN TIPO "SANTOVEÑA" \_ ESPESOR: 1 ASTA Y MEDIA

LÁMINA RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS, POR PESADAS Y CÁMARA TERMOGRÁFICA

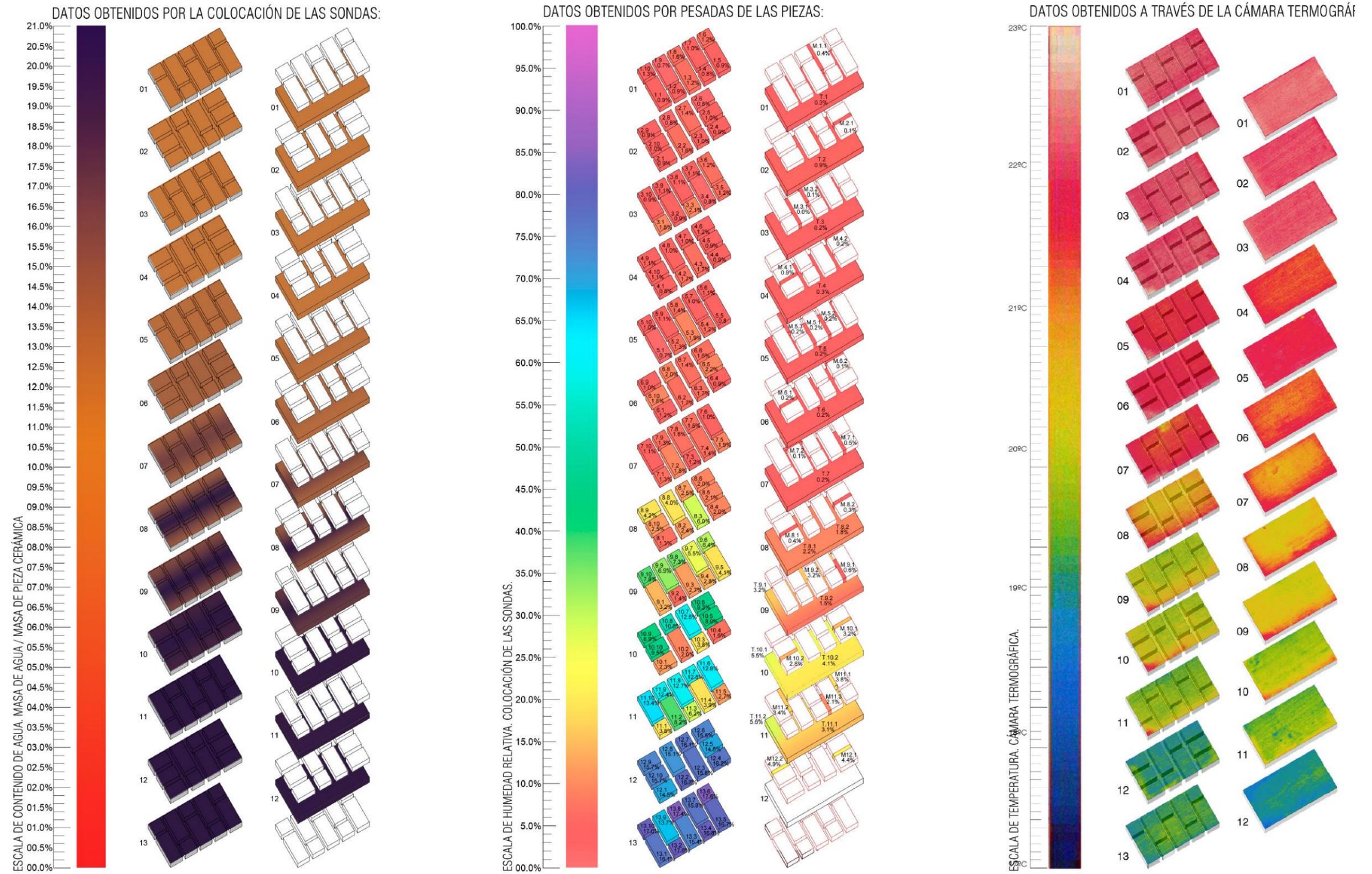


Figura 40. Lámina resumen de los datos obtenidos por pesadas, sondas y cámara termográfica

MURO DE LADRILLO MODERNO DE EXTRUSIÓN TIPO "SANTOVEÑA" \_ ESPESOR: 1 ASTA Y MEDIA

LÁMINA RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS, POR PESADAS Y CÁMARA TERMOGRÁFICA

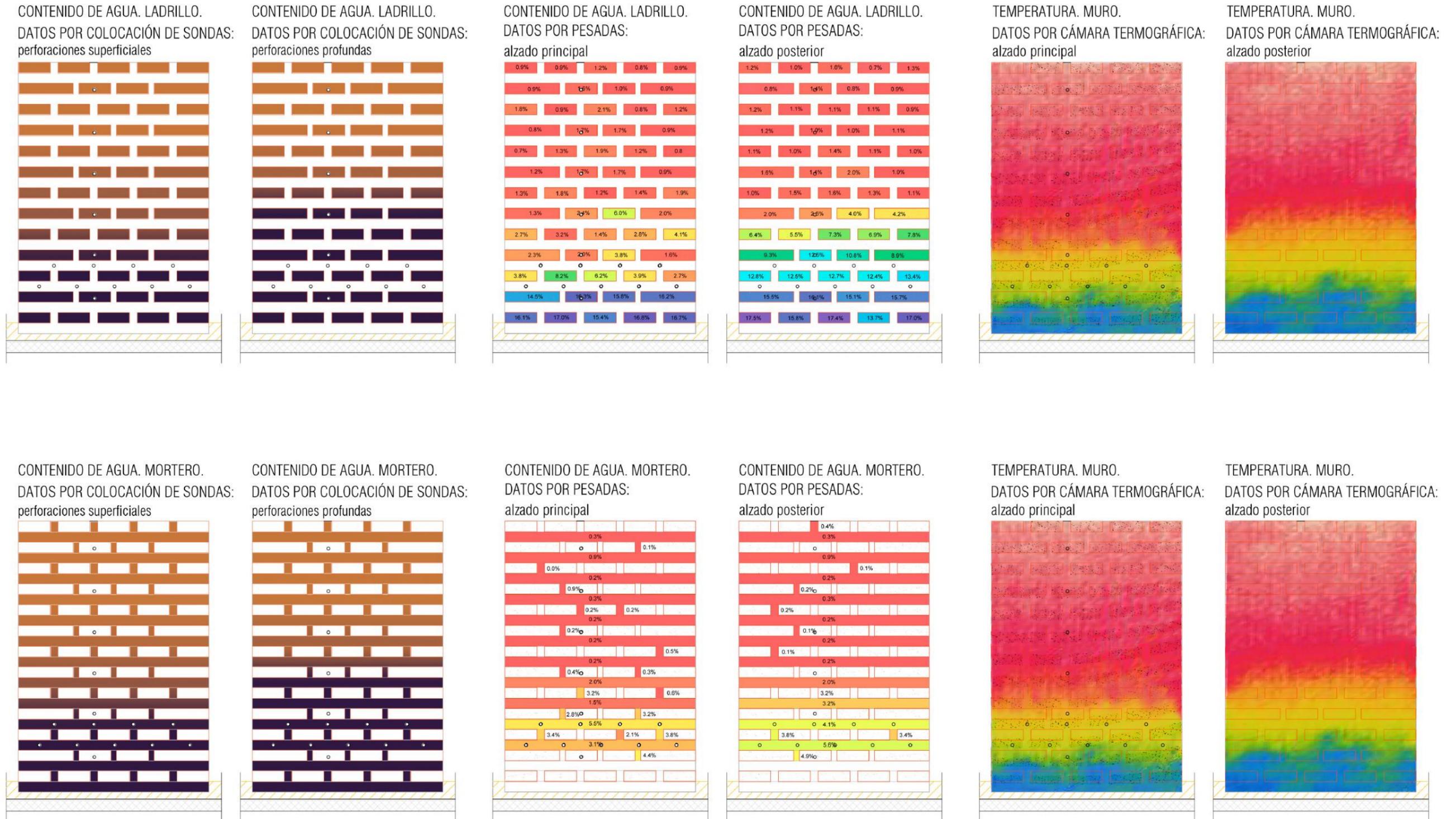


Figura 41. Lámina resumen de los datos obtenidos por sondas termohigrométricas, pesadas, y cámara termográfica

MURO DE LADRILLO DE TEJAR TIPO "LA OPERARIA" \_ ESPESOR: 1 ASTA Y MEDIA

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LA PESADA DE LADRILLOS Y PORCIONES DE ARGAMASA



Figura 42. Infografía generada a partir de datos obtenidos por pesada

MURO DE LADRILLO DE TEJAR TIPO "LA OPERARIA" \_ ESPESOR: 1 ASTA Y MEDIA

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LA PESADA DE LADRILLOS Y PORCIONES DE ARGAMASA

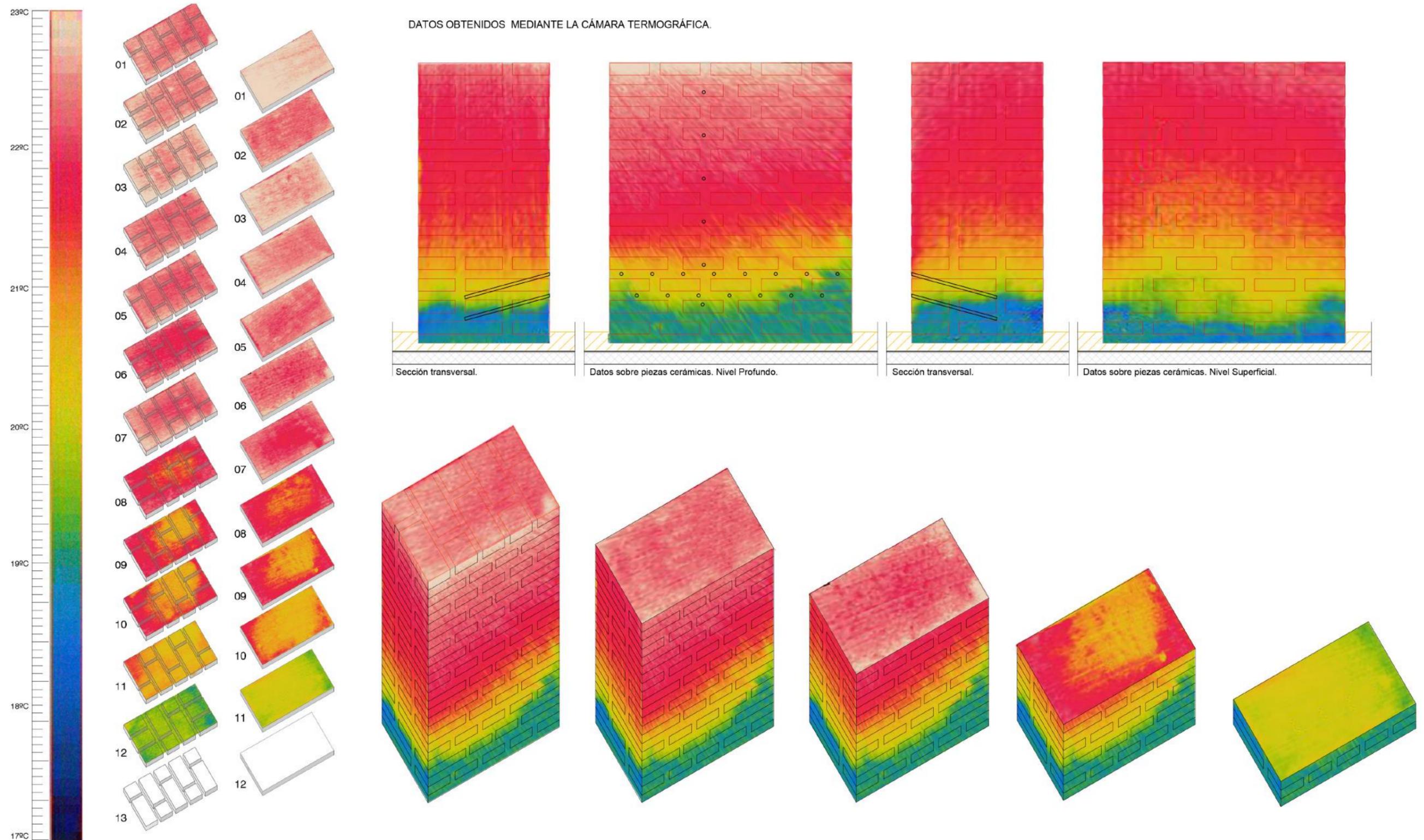


Figura 43. Infografía generada a partir de imágenes obtenidas con cámara termográfica

MURO DE LADRILLO DE TEJAR TIPO "LA OPERARIA" \_ ESPESOR: 1 ASTA Y MEDIA

INFOGRAFIA GENERADA A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS DE SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS INTRODUCIDAS EN PERFORACIONES

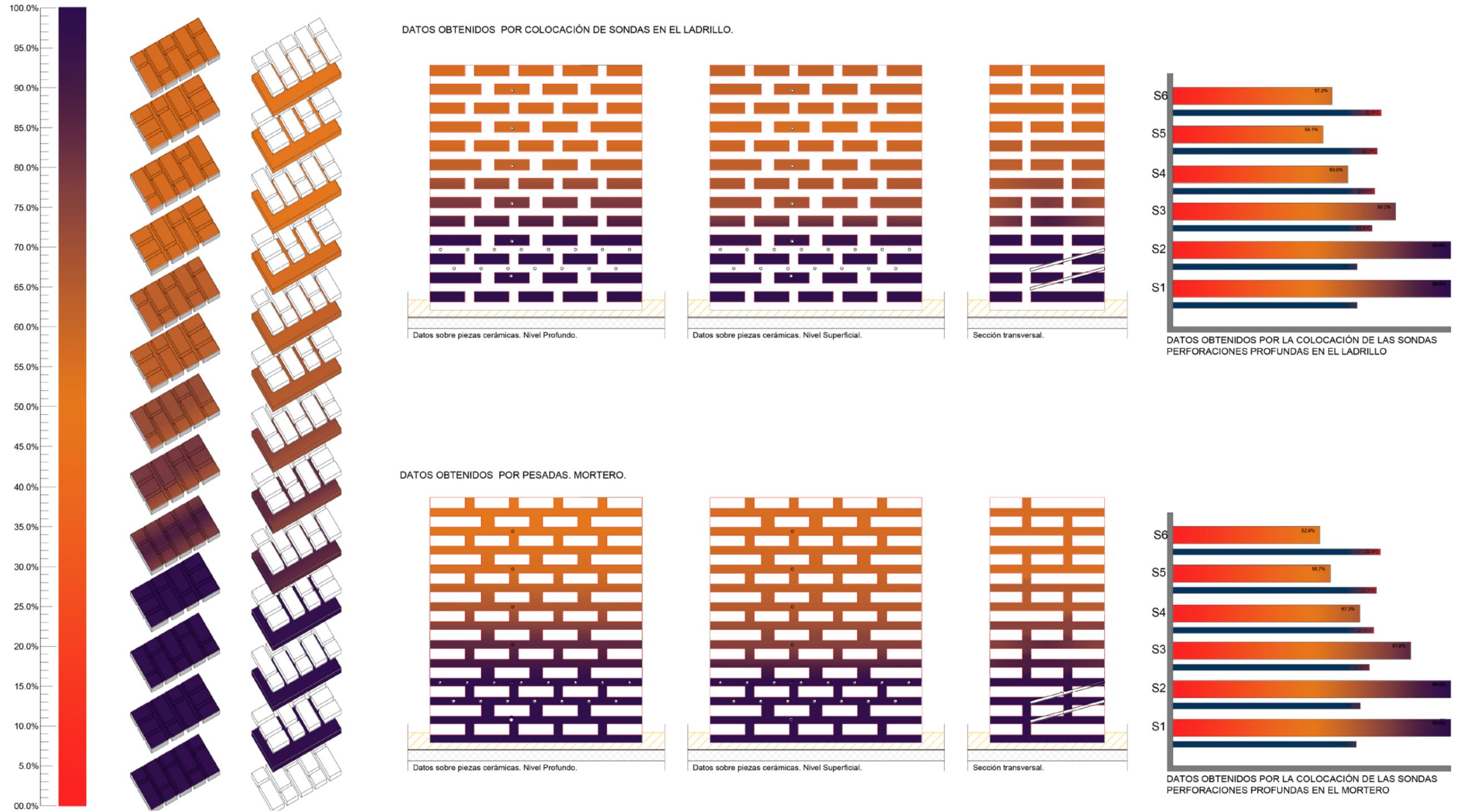


Figura 44. Infografía generada a partir de los datos obtenidos de sondas termohigrométricas

MURO DE LADRILLO DE TEJAR TIPO "LA OPERARIA" \_ ESPESOR: 1 ASTA Y MEDIA

LÁMINA RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS, POR PESADAS Y CÁMARA TERMOGRÁFICA

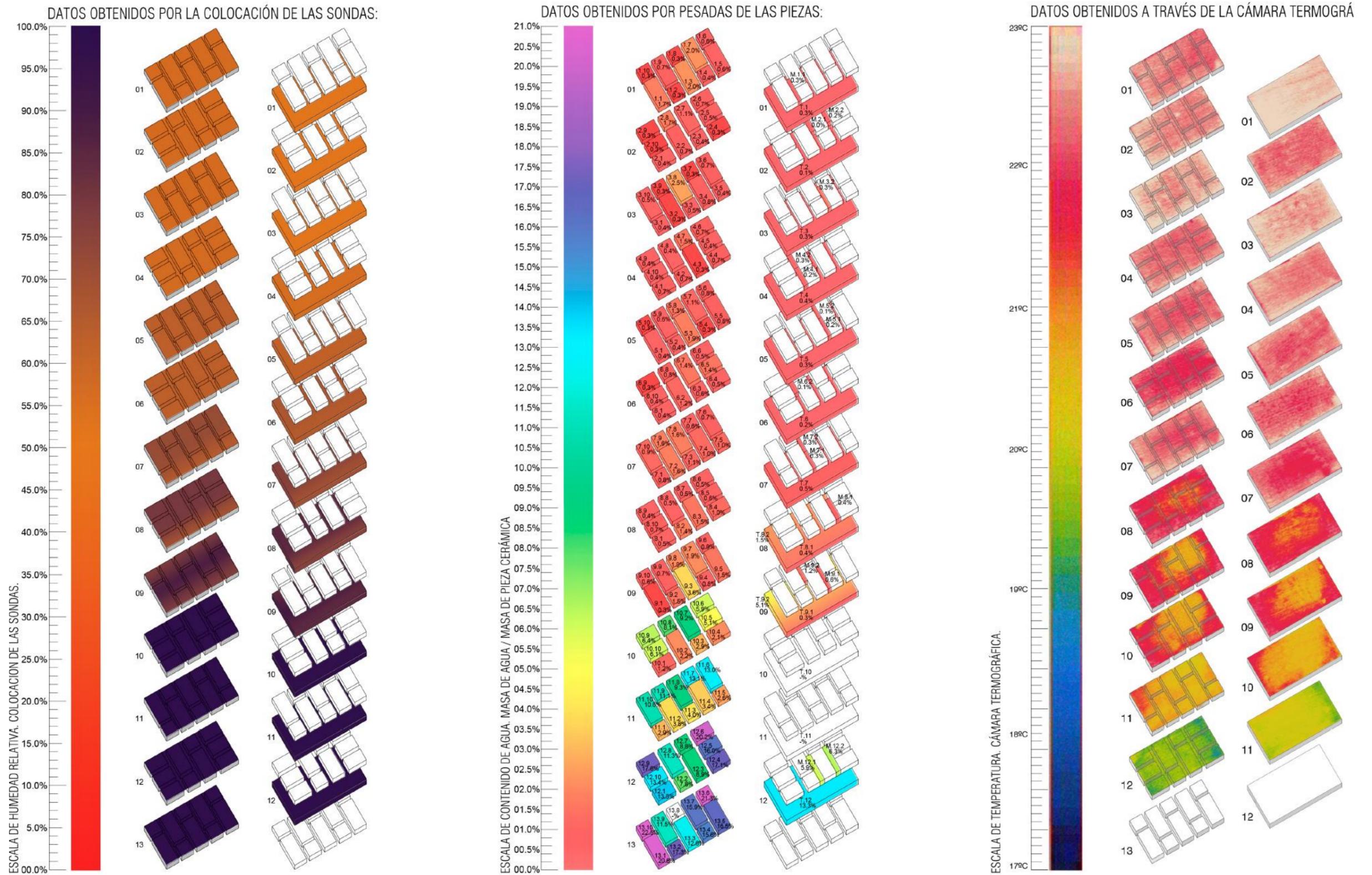


Figura 45. Lámina resumen de los datos obtenidos por pesadas, sondas y cámara termográfica

MURO DE LADRILLO DE TEJAR TIPO "LA OPERARIA" \_ ESPESOR: 1 ASTA Y MEDIA

LÁMINA RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS, POR PESADAS Y CÁMARA TERMOGRÁFICA

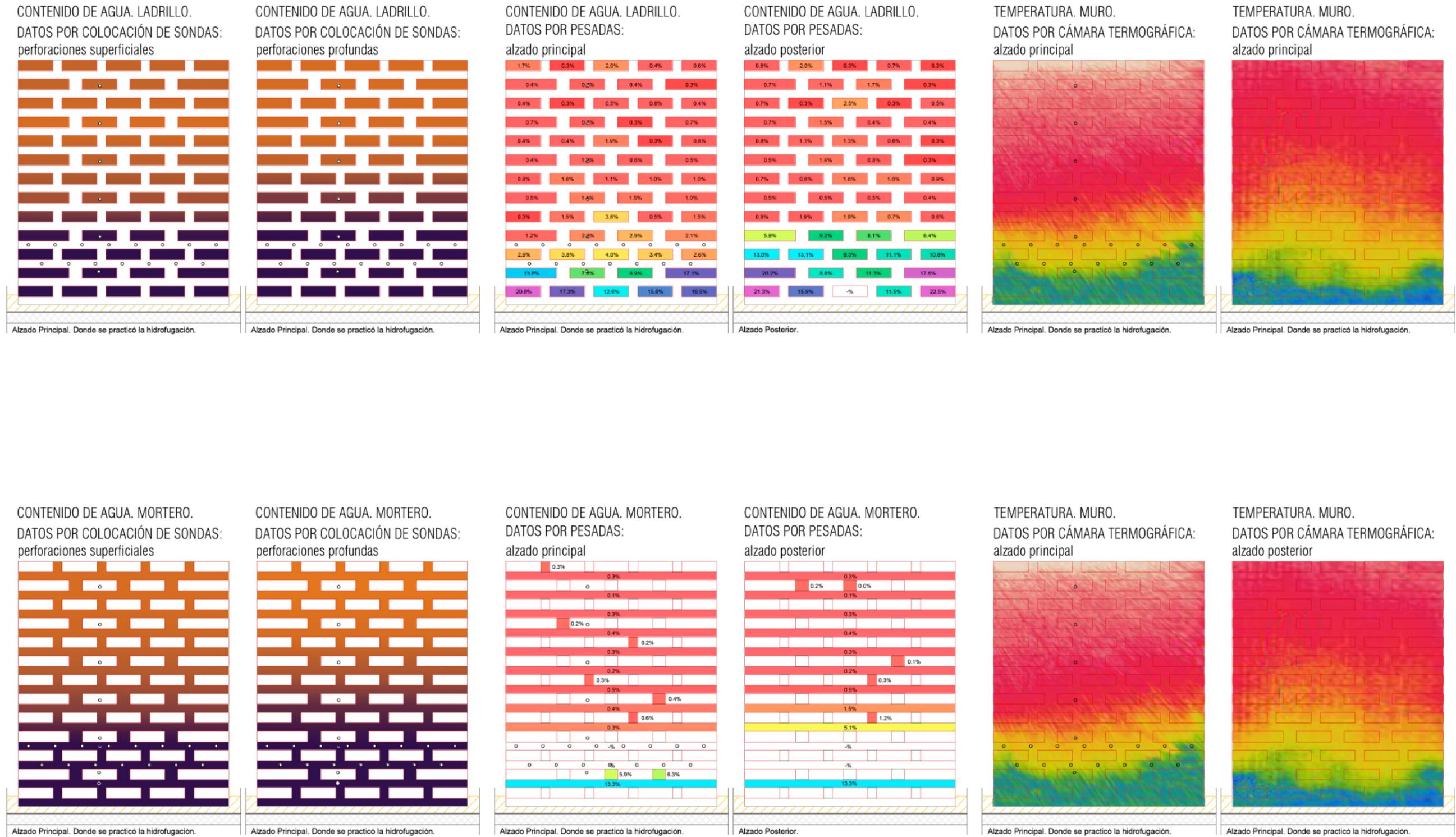


Figura 46. Lámina resumen de los datos obtenidos por sondas termohigrométricas, pesadas, y cámara termográfica

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

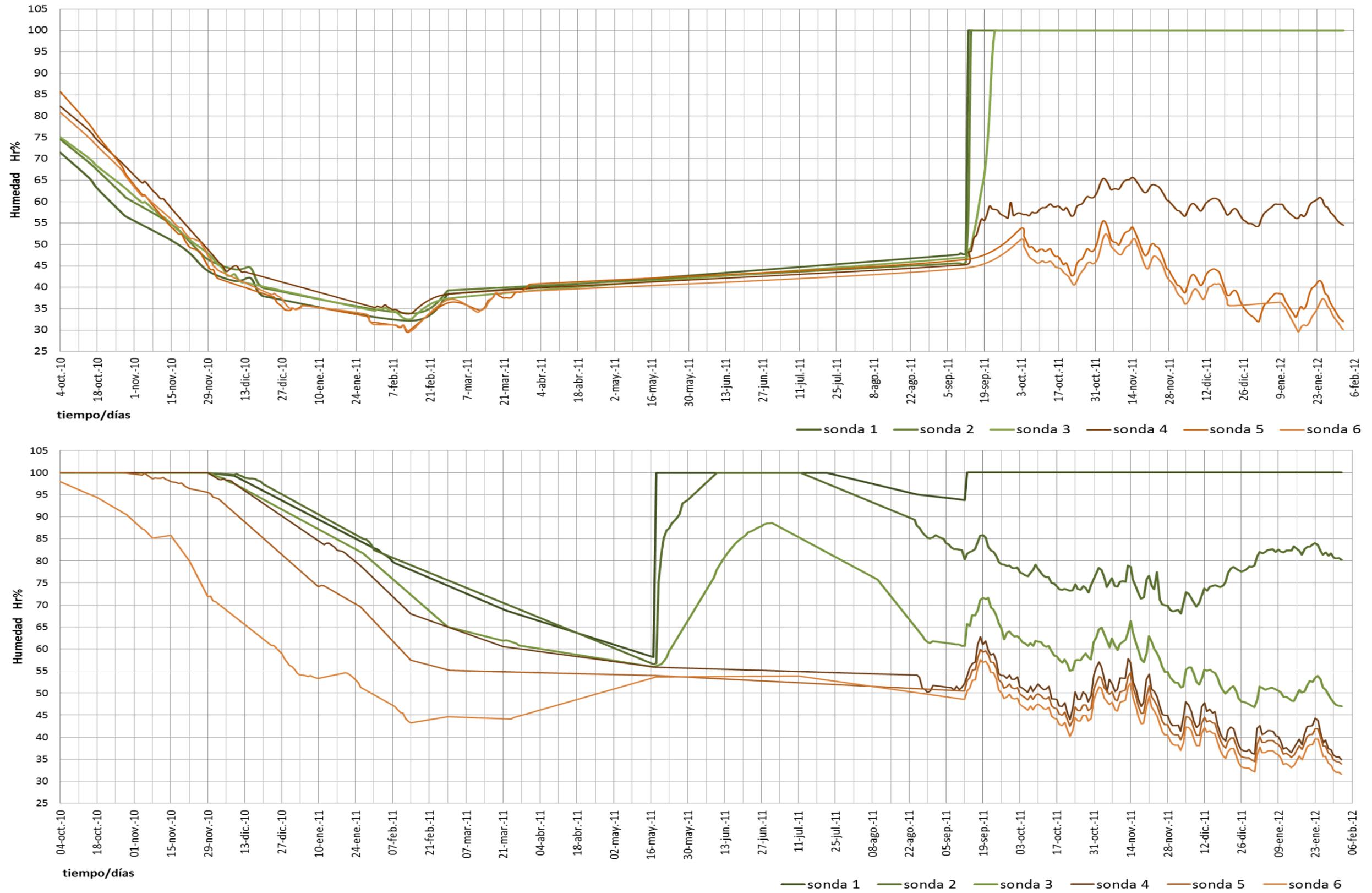


Figura 47. Gráficas que muestran la evolución de los datos de humedad obtenidos de las sondas termohigrométricas en los muros de ladrillo de tejar. Arriba: muro de 1 asta sin barrera hidrófuga. Abajo: muro de 1 ½ asta con barrera hidrófuga

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO



Figura 47. Gráficas que muestran la evolución de los datos de humedad obtenidos de las sondas termohigrométricas en los muros de ladrillo de tejar. Arriba: muro de 1 asta sin barrera hidrófuga. Abajo: muro de 1 ½ asta con barrera hidrófuga

## **ENSAYOS ESPECÍFICOS DE COMPROBACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA EN LA CAPILARIDAD**

- **Ensayo 11**

- **Ensayos sobre fábrica**

- Ensayo 11.1**

## ENSAYO 11

## ENSAYO 11.1

**Ensayo sobre probetas pareadas de fábrica de tres y cuatro hiladas para comprobar el efecto de la capilaridad según el número y espesor de las juntas de argamasa**

### I. Denominación

Ensayo sobre probetas pareadas de fábrica de tres y cuatro hiladas para comprobar el efecto de la capilaridad según el número y espesor de las juntas de argamasa.

### II. Objetivo del ensayo

El objetivo específico del ensayo es observar la influencia que tienen las juntas de argamasa en la ascensión de la humedad por capilaridad. Para ello se han hecho probetas con tres y cuatro hiladas de ladrillo, de la misma altura y con juntas de mortero de diferente espesor. De esta manera se va a comprobar sobre probetas fabricadas con la misma argamasa y con los mismos tipos de ladrillo como varía el fenómeno de la ascensión de la humedad capilar en función del espesor y número de las juntas de argamasa.

### III. Procedimiento y descripción del ensayo

Para este ensayo se ha seguido el procedimiento de la norma UNE-EN 15801. De tal forma que las probetas de fábrica de ladrillo se han colocado sobre cubetas en las que se ha dispuesto un fondo que permitiese tener una base saturada de agua de unos 5 – 10 mm de espesor.

Para el desarrollo de este ensayo se han elaborado un total de 18 probetas hechas con los siguientes materiales: ladrillos antiguos de tejar y argamasa de cal (1:3). Con una altura aproximadamente similar para todas ellas, con tres y cuatro hiladas, y cuya base era en todos los casos medio ladrillo.

Para poder analizar el proceso y elaborar conclusiones se han tomado datos de pesadas, imágenes termográficas y, en la parte alta de las probetas, datos de temperatura y humedad. Para la toma de estos últimos datos en cada una de las probetas de fábrica se realizó una perforación en el ladrillo superior, donde se alojaba el extremo de una sonda

termohigrométrica encargada de la detección de estos parámetros.

El procedimiento operatorio para la toma de datos ha constado de cuatro fases de tomas de datos diarios:

1. Pesada de cada una de las probetas con el fin de conocer el aumento de peso debido a la absorción de agua.
2. Fotografía con la cámara termográfica para observar la evolución del frente húmedo.
3. Toma de datos de la sonda termohigrométrica, con el fin de controlar la llegada de la humedad a la parte alta de las probetas.
4. Toma de altura del frente húmedo.

De este modo se han podido comprobar las diferencias en la forma de ascender la humedad en función de la junta de argamasa. La medición de la altura del frente húmedo se ha hecho con ayuda de la cámara termográfica con el fin de determinar exactamente su cota.

Las primeras ocho probetas se construyeron con medios ladrillos de tejar elegidos aleatoriamente de los recogidos para la investigación. Del análisis de los primeros datos que se obtuvieron se dedujo que de estas probetas, al no estar hechas con ladrillos similares, no se podía llegar a conclusiones debido al diferente comportamiento de los ladrillos. Así pues se tomó la decisión de repetir el ensayo de tal modo que las probetas tuviesen siempre el mismo tipo de ladrillo en cada nivel, lo que se hizo haciendo probetas con medios ladrillos procedentes de la misma pieza cortada a la mitad.

El ensayo con aporte de agua se mantuvo hasta que los datos se estabilizaron. Posteriormente se dejó de echar agua, para poder observar el proceso de desorción de las probetas.

#### **IV. Descripción de las probetas**

Las probetas utilizadas están descritas con bastante detalle en el apartado 4.2.2 de este documento.

Una vez se ejecutaron, se colocaron pareadas sobre cubetas independientes colocadas de dos en dos. De manera que las probetas 9A y la 9B están hechas con los mismos ladrillos cortados a la mitad y se colocan sobre el mismo recipiente como se puede apreciar en las fotografías que se muestran a continuación. Aunque el sistema que mantenía constante el nivel del agua en la base húmeda, durante todo el periodo que duró el ensayo, funcionó a la perfección, al estar las probetas pareadas sobre la misma cubeta permitió que las

condiciones de humedad en la base fuesen idénticas para cada par de probetas.

Las dimensiones de las probetas son las siguientes:

PROBETA	Nº Ladrillos	Dimensiones
9A	3	135x133x205
9B	4	134x134x215
10A	3	147x128x205
10B	4	150x148x207
11A	3	145x145x205
11B	4	145x147x205
12A	3	130x130x220
12B	4	130x132x224
13A	3	130x132x207
13B	4	130x130x207

Tabla 43. Dimensiones de las probetas ensayadas

Las tipo "A" (situadas a la izquierda en las cubetas), son las que tienen tres medios ladrillos y dos juntas de argamasa, y las tipo "B" (situadas a la derecha en las cubetas) cuatro medios ladrillos y tres juntas.

## V. Imágenes del ensayo



Imagen 95. Imagen de todas las probetas durante el ensayo



Imagen 96. Imagen de ladrillos cortados a la mitad para la posterior ejecución de las probetas

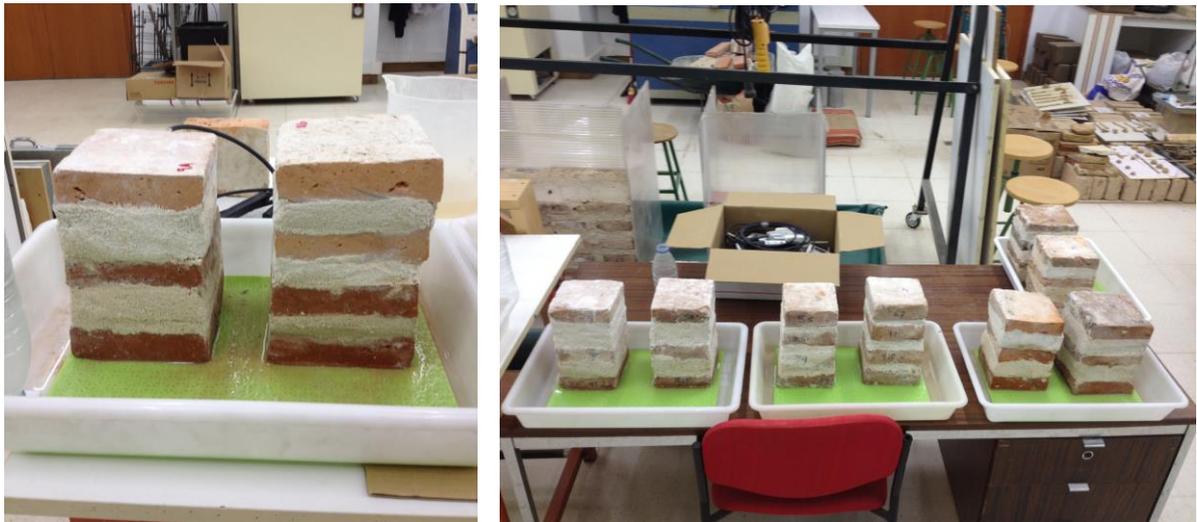


Imagen 97. Imagen de las probetas durante el ensayo.

## VI. Datos y expresión de resultados

A continuación se muestran las imágenes tomadas con la cámara termográfica donde se muestran los procesos de ascensión de la humedad capilar. Se muestran imágenes de las probetas 9A, 9B, 10A, 10B, 11A, 11B, 12A, 12B, 13A Y 13B. Las tipo "A" (situadas a la izquierda en las cubetas), son las que tienen tres medios ladrillos y dos juntas de argamasa, y las tipo "B" (situadas a la derecha en las cubetas) cuatro medios ladrillos y tres juntas.

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

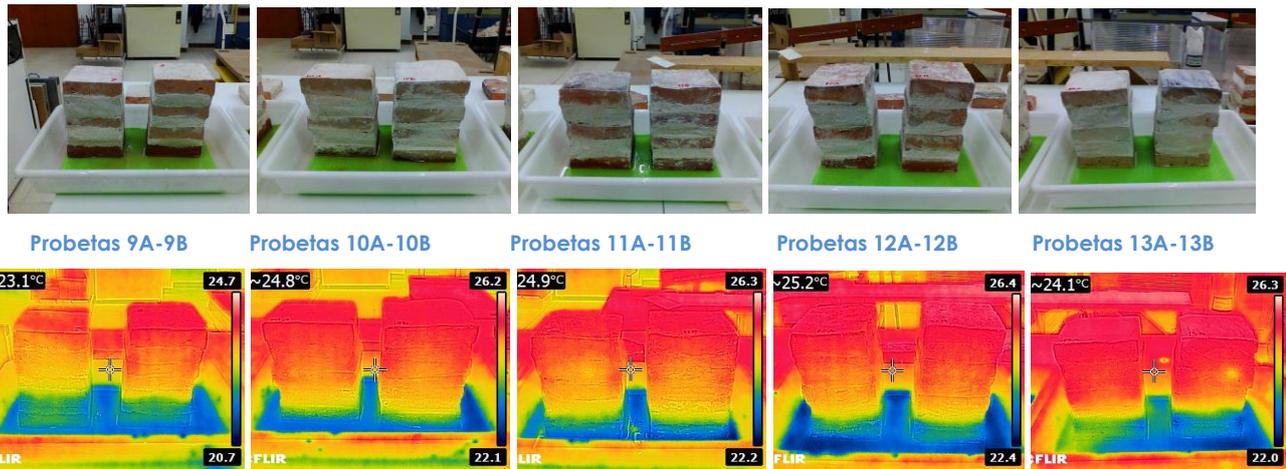


Imagen 98. Imagen de las probetas al inicio del ensayo

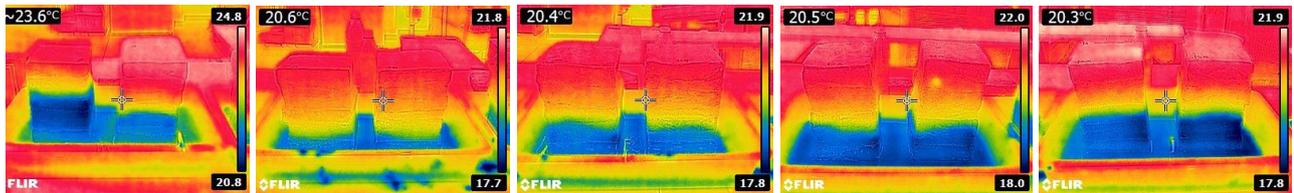


Imagen 99. Imagen de las probetas transcurridas 3 horas del inicio del ensayo

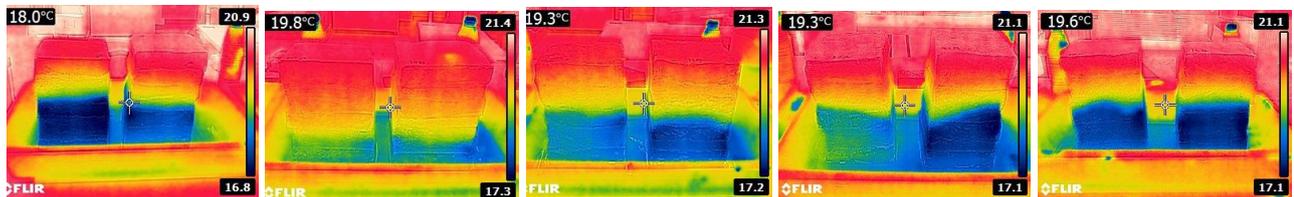


Imagen 100. Imagen de las probetas transcurridas 9 horas del inicio del ensayo

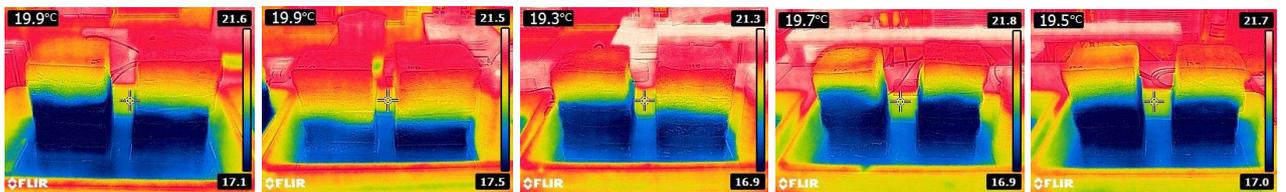


Imagen 101. Imagen de las probetas transcurrido 1 día del inicio del ensayo



Imagen 102. Imagen de las probetas transcurridos 2 días del inicio del ensayo

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO



Imagen 103. Imagen de las probetas transcurridos 3 días del inicio del ensayo



Imagen 104. Imagen de las probetas transcurridos 4 días del inicio del ensayo

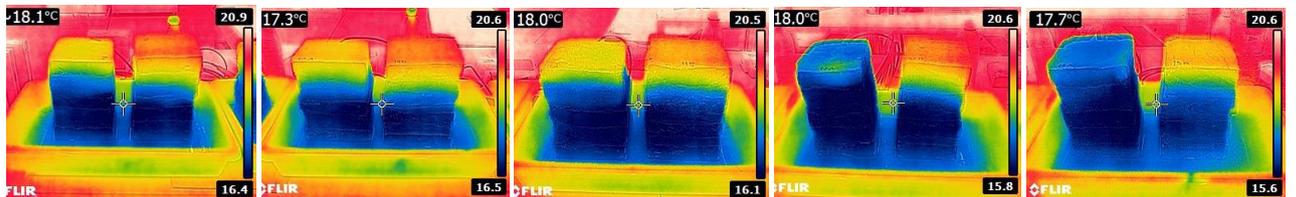


Imagen 105. Imagen de las probetas transcurridos 7 días del inicio del ensayo

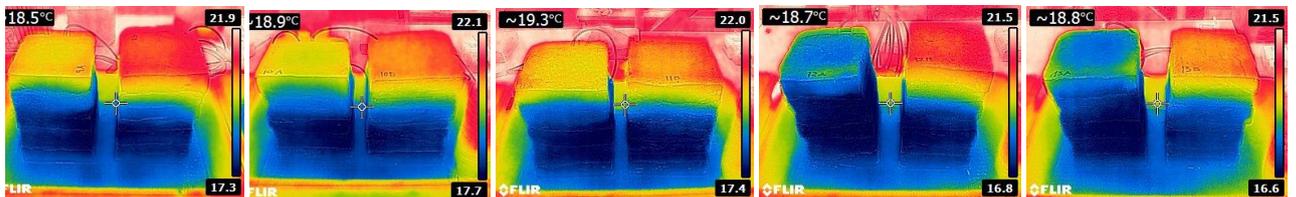
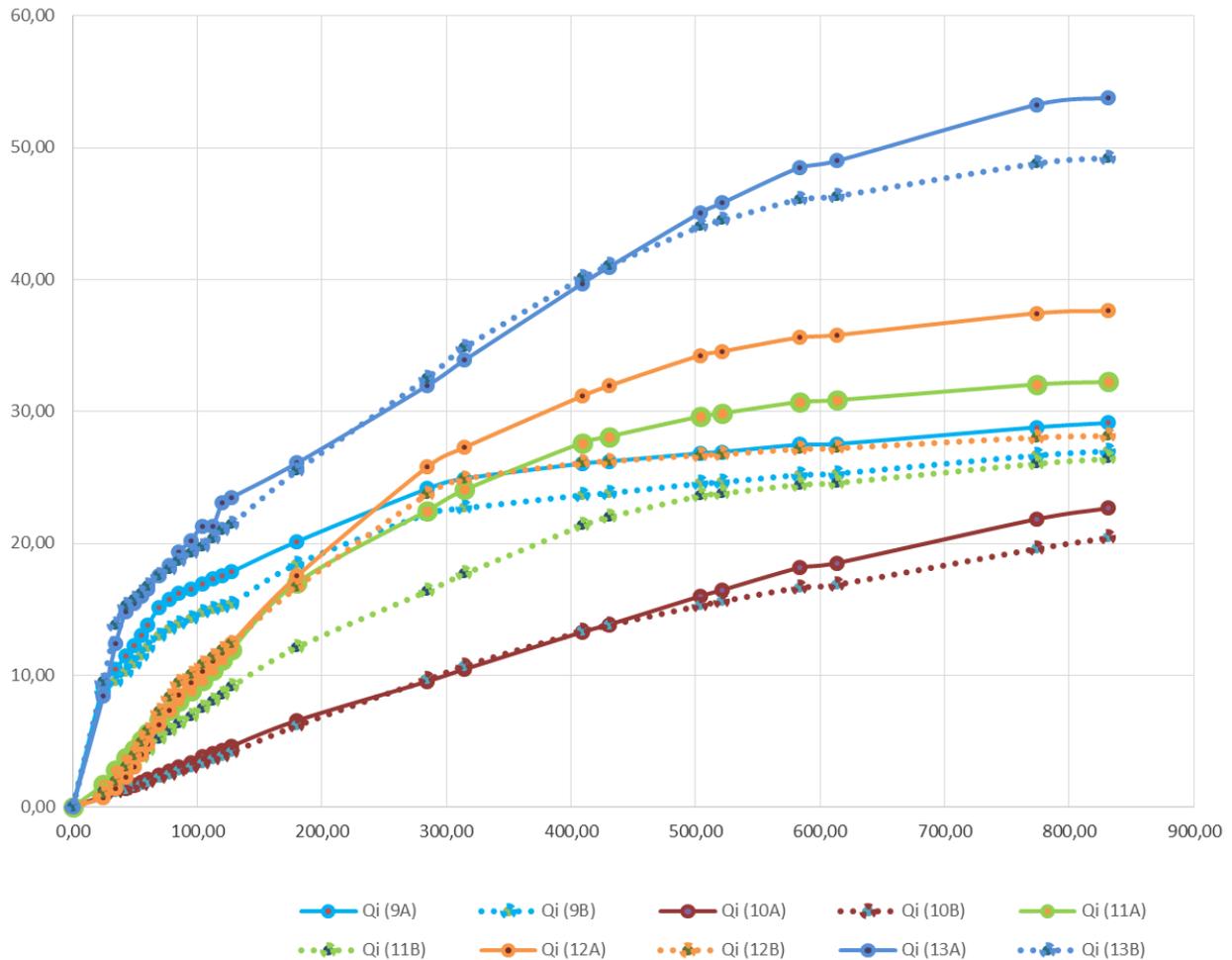


Imagen 106. Imagen de las probetas transcurridos 11 días del inicio del ensayo



Imagen 107. Imagen de las probetas transcurridos 16 días del inicio del ensayo

A continuación se muestra una gráfica donde se representa la cantidad de agua absorbida por superficie para cada una de las probetas: 9A, 9B, 10A, 10B, 11A, 11B, 12A, 12B, 13A Y 13B. La cantidad de agua absorbida se calcula según la ecuación:  $Q_i = [(m_i - m_0)/A]$ , donde  $Q_i$  es el valor representado en el eje vertical;  $m_i$  es el peso de cada una de las pesadas de las diferentes probetas;  $m_0$  el peso inicial de la probeta; y  $A$  el área de la base. El eje horizontal es la raíz cuadrada del tiempo en segundos.

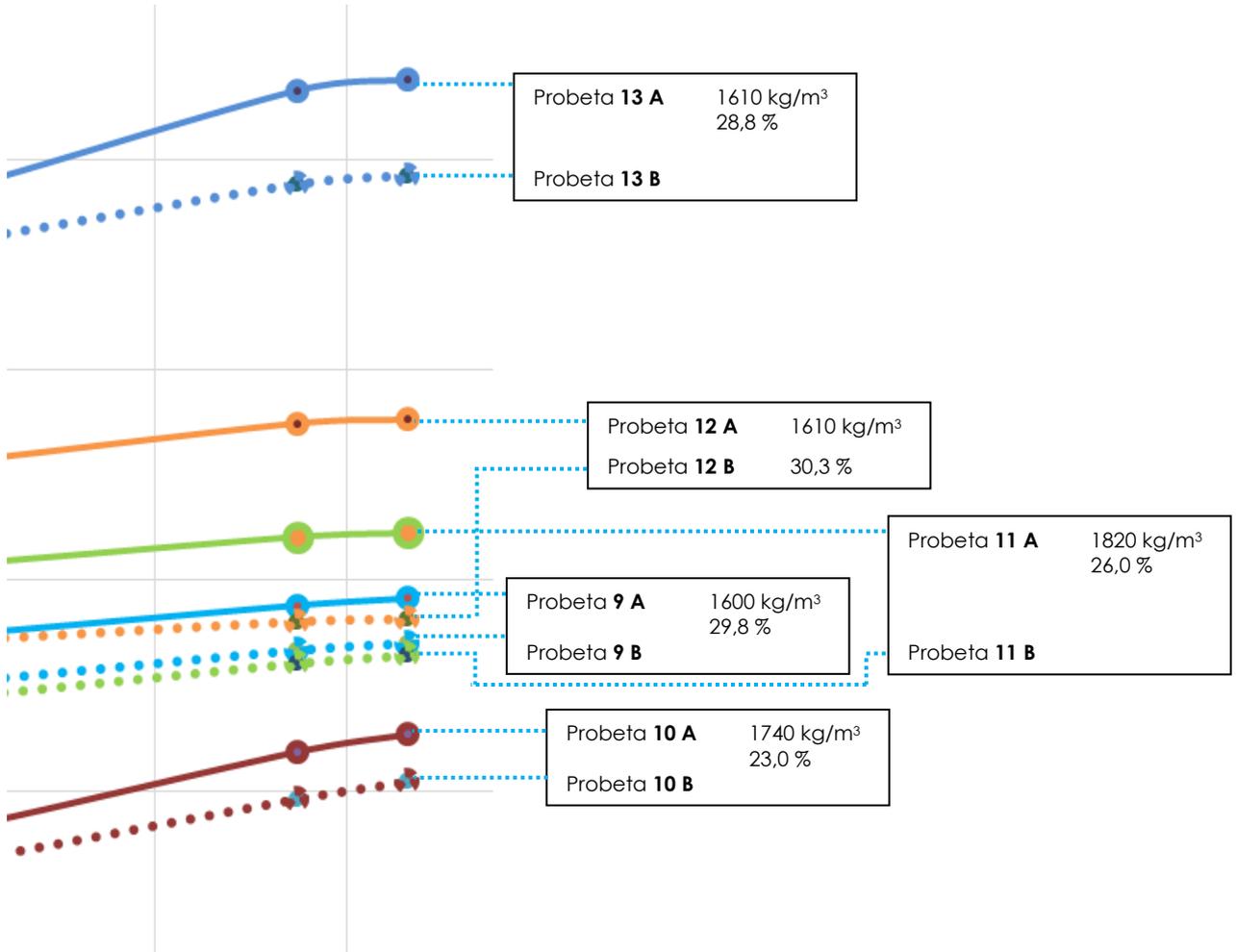


**Gráfica 28. Gráfica de absorción de agua. Probetas 9A, 9B, 10A, 10B, 11A, 11B, 12A, 12B, 13A y 13B**  
El eje vertical es el valor de Qi, y el eje horizontal es la raíz cuadrado del tiempo

Con el fin de facilitar el reconocimiento de las probetas, las líneas que representan los pares de probetas hechas con los mismos ladrillos tienen el mismo color. Las líneas continuas representan el comportamiento de las probetas tipo "A", y las líneas discontinuas el de las probetas tipo "B". Se puede observar claramente como la línea señalada con el punto rojo, que marca las probetas de tres ladrillos y dos tendeles, siempre está por encima de la correspondiente línea relativa a la probeta de cuatro ladrillos y tres tendeles. Este hecho muestra claramente la influencia que tienen las juntas o interfases en la ascensión de la humedad capilar, ya que el comportamiento de la humedad es similar para todos los tipos de probetas.

En el gráfico que se muestra a continuación se amplía el final de la gráfica anterior con el fin de poder identificar claramente las probetas. Para saber si las características físicas de los ladrillos tienen alguna influencia en la ascensión de la humedad se detallan en el recuadro correspondiente las características de densidad aparente seca y porosidad abierta de cada tipo de ladrillo.

De los dos valores reflejados en la esquina superior derecha de los recuadros, el número de arriba es el valor de la densidad aparente seca y el número inferior es el valor de la porosidad abierta. La línea de puntos azul relaciona cada línea de la gráfica con la probeta correspondiente.



**Gráfica 29. Ampliación de la zona final de la gráfica 28 para las probetas 9A, 9B, 10A, 10B, 11A, 11B, 12A, 12B, 13A y 13B, con información de la densidad aparente seca y de la porosidad abierta**

Se pueden destacar como datos más reveladores este ensayo dos apreciaciones, por una parte que las gráficas de las probetas tipo "A" están en todos los casos por encima de las gráficas de las probetas tipo "B" realizadas con los mismos ladrillos.

La siguiente tabla muestra el valor máximo de la humedad registrada por las sondas termohigrométricas situadas en la perforación realizada en la zona superior de cada una de las probetas. También se da como información el tiempo transcurrido hasta que se alcanza dicho valor. Se puede comprobar que algunas de las probetas (la 9B, 11A, 11B y 12B) no llegan a alcanzar el 100% de humedad fijándose un tiempo en el que se alcanza dicho dato. La razón es que transcurrido ese periodo de tiempo se produjo una estabilización del valor sin que se detectase ningún aumento en la humedad dándose por terminado el ensayo.

PROBETA	Valor máximo alcanzado por la humedad	Tiempo necesario para alcanzar dicho valor
9A	99,9 %	7 días
9B	94,7 %	28 días
10A	99,9 %	10 días
10B	99,9 %	28 días
11A	88,1 %	10 días
11B	77,1 %	29 días
12A	99,9 %	8 días
12B	90,1 %	16 días
13A	99,9 %	4 días
13B	99,9 %	15 días

Tabla 44. Tabla de datos sobre porcentaje de humedad y tiempo necesario para alcanzar dicho valor

Con el fin de determinar las características físicas de la densidad aparente seca y la porosidad abierta de los ladrillos se caracterizaron dichos valores, mediante los procedimientos descritos en las normas UNE-EN 772-13 y UNE-EN 772-3, obteniéndose los siguientes datos:

MATERIAL	DENSIDAD APARENTE SECA	POROSIDAD ABIERTA
<b>LADRILLO de TEJAR</b>		
PROBETA N° 9	<b>1.600 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>29,77 %</b>
PROBETA N° 10	<b>1.740 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>23,05 %</b>
PROBETA N° 11	<b>1.820 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>26,01 %</b>
PROBETA N° 12	<b>1.620 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>30,27 %</b>
PROBETA N° 13	<b>1.610 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>28,79 %</b>

Tabla 45. Tabla de valores de densidad aparente seca y de porosidad abierta de los ladrillos usados en el ensayo

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Una primera e importante conclusión es que todos los datos obtenidos son coherentes entre sí: las imágenes de la cámara termográfica, los datos obtenidos por pesadas, los datos de las sondas termohigrométricas y las observaciones visuales sobre la evolución de la humedad suministran una información similar.

Si se observan las imágenes de la cámara termográfica, podremos comprobar que, transcurridos los primeros momentos del proceso de absorción de agua, **en todos los casos la humedad asciende más rápidamente y alcanza más altura en las probetas que tienen las juntas de argamasa más gruesas o lo que es lo mismo en las que tienen menos juntas o interfases** (las situadas a la izquierda en cada cubeta y denominadas con la letra "A"). En estas probetas el agua al ascender tiene que salvar menos "saltos" entre un material y otro, tiene menos interfases ladrillo-argamasa que superar. Por el contrario, en las probetas situadas a la derecha de cada cubeta, la humedad sube menos y más lentamente. En este caso al agua que asciende por capilaridad tiene que superar más interfases.

Analizando las gráficas también se puede comprobar este hecho. En todas ellas las líneas que muestran los valores de las probetas tipo "A" (las señaladas con el punto rojo), que son las de tres ladrillos con dos tendeles gruesos de argamasa, están siempre situadas por encima de la línea que muestra los valores de la correspondiente probeta tipo "B", que son las que tienen 3 tendeles más finos.

Se puede concluir también que los ladrillos con altos porcentajes de porosidad evaporan el agua con más rapidez que el resto ralentizando el proceso de ascensión del agua por capilaridad.

La tabla 44 muestra los valores máximos de humedad detectados por las sondas en la zona superior de cada una de las probetas hasta que se estabiliza el dato de la humedad. También muestra el tiempo que tarda en alcanzarse dicho valor. De la observación de dicha tabla se puede comprobar como la humedad alcanza valores más elevados en las probetas tipo "A" que en las probetas tipo "B" y que además esto ocurre en un tiempo mucho más reducido. También se puede comprobar cómo en la mayoría de los casos la humedad alcanzada en las probetas tipo "A" supera en valor a la humedad alcanzada en las otras.

**La conclusión más importante de este ensayo es que el proceso de ascensión de la humedad por capilaridad se ve ralentizado y dificultado por los cambios de material. Es decir que la interfase que se genera entre la junta de argamasa de cal y el ladrillo actúa como freno del fenómeno de la capilaridad.**

## **ENSAYOS ESPECÍFICOS DE COMPROBACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA EN LA CAPILARIDAD**

- **Ensayo 12**
  - **Ensayos sobre fábrica** **Ensayo 12.1**

## ENSAYO 12

## ENSAYO 12.1

**Ensayo sobre probeta de fábrica para comprobación  
de la ascensión de la humedad por capilaridad  
únicamente por las llagas y los tendeles de argamasa**

### I. Denominación

Ensayo sobre probeta de fábrica para comprobación de la ascensión de la humedad por capilaridad únicamente por las llagas y los tendeles de argamasa.

### II. Objetivo del ensayo

El objetivo de este ensayo era observar específicamente cómo asciende la humedad por capilaridad por la retícula continua que conforman las llagas y los tendeles, sin atravesar los ladrillos, observando el recorrido que hace el agua discurriendo por la argamasa "serpenteando" por las juntas. Aunque se suponía dicho comportamiento pareció interesante observar dicho movimiento del agua.

### III. Procedimiento y descripción del ensayo

Para poder observar el fenómeno de la ascensión capilar únicamente por la argamasa se construyó una probeta de fábrica dentro de una cubeta estanca con una base de arena dispuesta para ser saturada totalmente con agua, generando así un lecho húmedo.

Para forzar que el agua ascendiese exclusivamente por la argamasa los ladrillos que se utilizaron para hacer la muestra fueron sometidos a un alto grado de hidrofugación, que consistió en sumergirlos totalmente en producto hidrofugante durante tres minutos. Procedimiento que se repitió dos veces con un intervalo de un día. El tratamiento de hidrofugación se comprobó antes de elaborar con ellos la probeta mediante un proceso de inmersión total en agua y corroborando la prácticamente nula absorción de agua. También se comprobó la eficacia de la hidrofugación una vez se terminó el ensayo.

Después de la construcción de la probeta, y una vez se hubo secado suficientemente como para que las sondas tomaran datos de humedad muy por debajo del 99,9 % y cercanos a los del ambiente, se saturó la cama de arena y se dispusieron sondas termohigrométricas con el fin de detectar el paso de la humedad. Estas sondas se dispusieron en perforaciones realizadas en las juntas de argamasa. Además de la comprobación diaria de los datos de humedad de las sondas se hicieron fotografías con la cámara termográfica cuyas imágenes reflejaron con toda nitidez la evolución del avance de la humedad.

Al finalizar el ensayo se procedió al desmontaje de la probeta pesándose todos los ladrillos utilizados y porciones de argamasa de todas las posiciones. Posteriormente todas estas muestras fueron secadas en estufa, de tal manera que se pudo comprobar la cantidad exacta de agua absorbida y el porcentaje en peso que incrementó cada una de las muestras. Los resultados, como se puede comprobar en la figura 29, indican que la argamasa tuvo incrementos muy notables y muy superiores a los de los ladrillos, que resultaron ser poco significativos.

#### IV. Descripción de la probeta

La probeta se fabricó con ladrillos macizos de tejar tipo La Operaria con una base de  $\frac{1}{2}$  asta por  $1\frac{1}{2}$  asta y una altura de cinco hiladas. Como se ha comentado dichos ladrillos se hidrofugaron por inmersión en líquido hidrofugante con posterior comprobación de su eficacia. La cal utilizada se hizo con la proporción 1:3 (cal/arena) en su mezcla.

Con el fin de controlar el paso de la humedad por los distintos niveles de la probeta se realizaron dos perforaciones en sendos ladrillos situados en la zona superior e inferior, para comprobar si estaban siendo afectados por el agua, y otras cuatro perforaciones en las juntas de argamasa con el fin de detectar la presencia y el paso de la humedad a su través.

#### V. Imágenes del ensayo

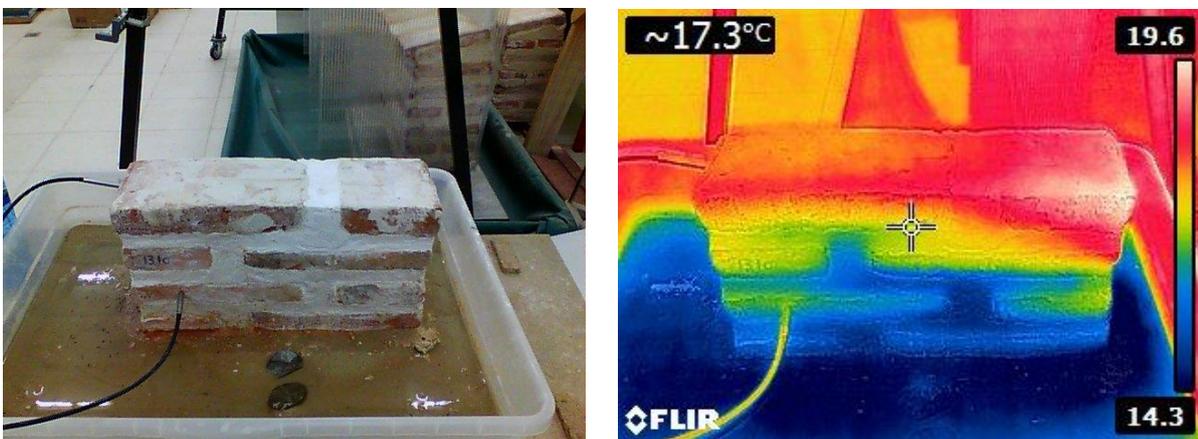


Imagen 108. Imagen de la probeta durante el ensayo e imagen termográfica que muestra la presencia del agua

## VI. Datos y expresión de resultados

Los datos del ensayo son las imágenes termográficas tomadas con los intervalos de tiempo que se muestran y la tabla que recoge el valor de la absorción de agua de cada material. Se puede apreciar claramente como es la ascensión capilar de la humedad en la probeta observando cómo evoluciona el color azul en las distintas imágenes. Se saturó totalmente de agua la cama de arena el 10 de octubre de 2016.

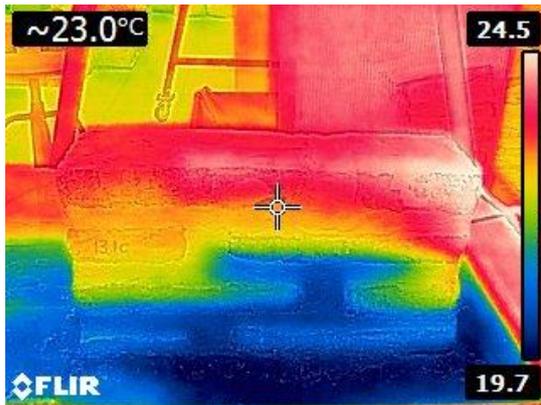


Imagen 109. Del día 19 de octubre (transcurridos 9 días)

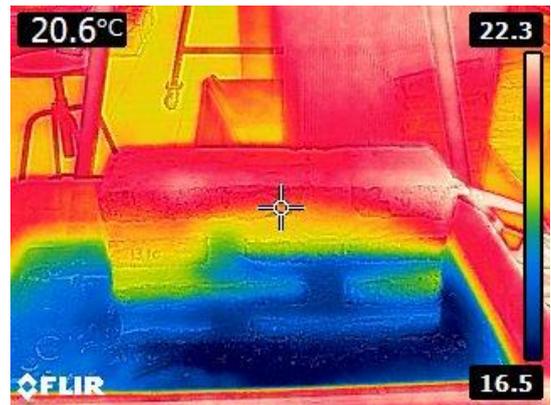


Imagen 110. Del día 20 de octubre (transcurridos 10 días)

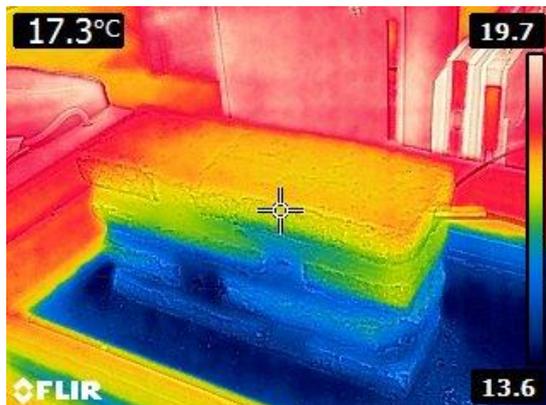


Imagen 111. Del día 27 de octubre (transcurridos 17 días)

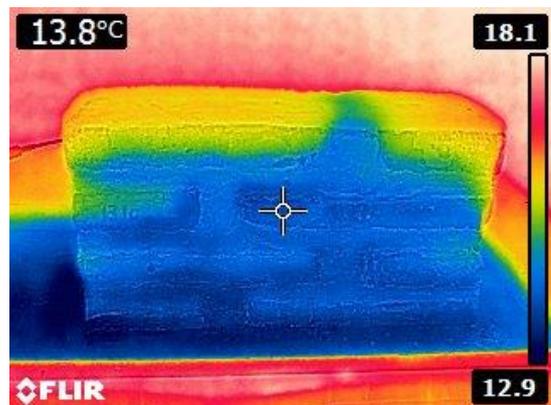


Imagen 112. Del día 2 de noviembre (transcurridos 23 días)

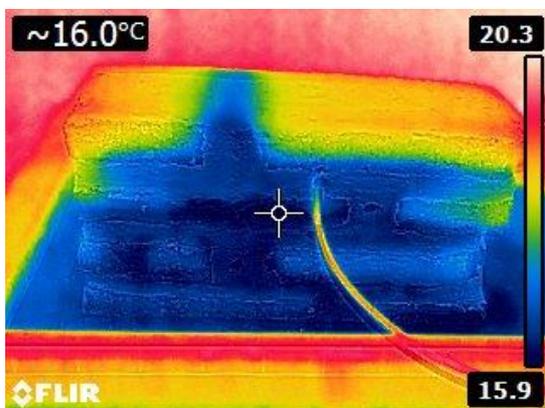


Imagen 113. Del día 9 de noviembre (transcurridos 30 días)

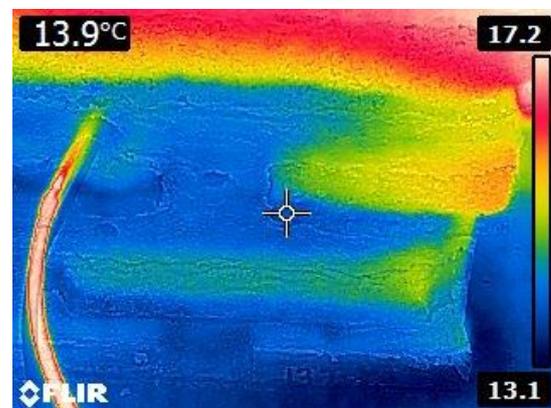


Imagen 114. Del día 9 de noviembre. Foto de detalle que muestra que el ladrillo no está húmedo

La figura siguiente muestra el incremento de peso por absorción de agua en cada material según su posición.

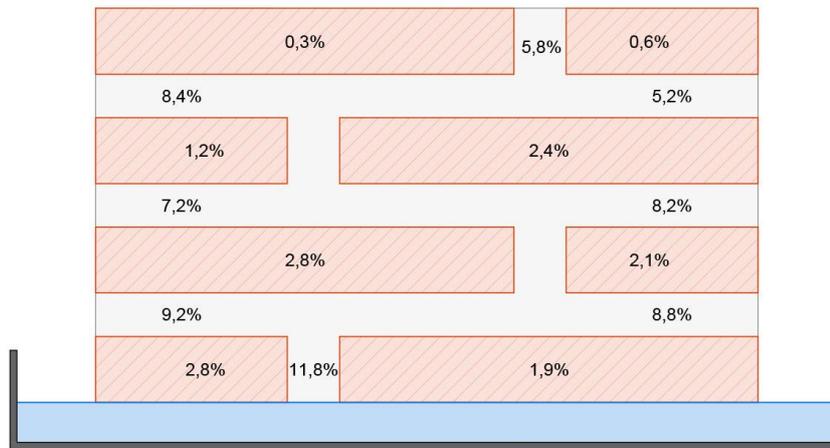


Figura 29. Valores de incremento de peso para ladrillos y argamasa utilizados en el ensayo

Se han situado los porcentajes sobre los ladrillos y las zonas de las porciones de argamasa analizadas. El valor señalado indica el porcentaje de incremento en peso que ha sufrido cada uno de los materiales respecto de su peso en seco, es decir el incremento en función de la cantidad de agua absorbida.

Los valores del incremento de peso en la argamasa son muy superiores a los que muestran los ladrillos. Es sobre todo significativo lo que ocurre en la hilada superior de la probeta donde los ladrillos prácticamente están secos mientras que la argamasa presenta un valor que indica una absorción de agua importante.

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

A la vista de las imágenes que muestran la evolución de la ascensión de la humedad capilar a través de la retícula continua que conforman las llagas y los tendeles de argamasa se puede concluir que esta es **una vía muy importante de entrada del agua en las fábricas**. Mucho más significativa que la ascensión que se produce verticalmente atravesando alternativamente capas de ladrillo y mortero.

De la observación de las imágenes termográficas pudiese parecer que los ladrillos están muy húmedos, y por lo tanto participando del proceso de absorción de agua y favoreciendo la ascensión del agua por capilaridad. Este hecho sin embargo no es así, la termografía detecta cambios de temperatura, de modo que cuando un material tiene agua y ésta se evapora se produce un enfriamiento del mismo, lo que es detectado en las imágenes que toma la cámara. Esto es lo que ocurre en la zona de la argamasa en este ensayo, pero los ladrillos, al estar en contacto directo con ella y por conducción se ponen casi a la misma

temperatura. Este hecho se puede apreciar en las imágenes de la termografía, ya que los ladrillos, o bien presentan un ligero color amarillento verdoso (se aprecia con claridad en la imagen 114), lo que indica una temperatura notablemente más baja que la de la argamasa, o el color azul es de mucha menor intensidad que el de las juntas, lo que indica que no está evaporando pero que ambas temperaturas, la del ladrillo y la de la argamasa, tienden a equipararse.

En los ensayos donde los ladrillos están sin hidrofugar las imágenes termográficas muestran para ambos materiales colores prácticamente idénticos. Con el fin de comprobar este hecho se llevó a cabo el secado y pesado de los ladrillos que mostraron los valores de la figura 29 que se adjunta en este ensayo y que corroboran lo expuesto.

## **ENSAYOS ESPECÍFICOS DE COMPROBACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA EN LA CAPILARIDAD**

- **Ensayo 13**
  - **Ensayos sobre fábrica** **Ensayo 13.1**

## ENSAYO 13

## ENSAYO 13.1

**Ensayo sobre probeta de fábrica para comprobación  
de la ascensión de la humedad por capilaridad  
atravesando capas alternas de argamasa y ladrillo**

### I. Denominación

Ensayo sobre probeta de fábrica para comprobación de la ascensión de la humedad por capilaridad atravesando únicamente capas alternas de argamasa y ladrillo.

### II. Objetivo del ensayo

El objetivo de este ensayo es observar específicamente como asciende la humedad por capilaridad según atraviesa capas de diferentes materiales sin posibilidad de ascender por la retícula continua de argamasa. Es un ensayo similar al ensayo 11.1 pero analizado con mucho más detalle. La intención es comprobar si existe una relación entre los valores de cantidad de agua absorbida según se produce el cambio de una fase a otra en la ascensión de la humedad cuando el agua va atravesando las capas alternas de ladrillo y argamasa.

### III. Procedimiento y descripción del ensayo

El ensayo se ha realizado de manera análoga a lo que se hizo en el ensayo 11.1, y con procedimientos similares a los del ensayo UNE-EN 15801. De tal forma que la probeta una vez ejecutada y secada en estufa se colocó sobre una cubeta con un fondo que permitía tener una base saturada o lecho húmedo de agua de unos 5–10 mm de espesor.

Una vez saturado con agua el fondo de la cubeta, se procedió a la toma periódica de datos de pesos con ayuda de una balanza de precisión, y a la toma de datos de la cota alcanzada por el frente húmedo con ayuda de la cámara termográfica.

### IV. Descripción de la probeta

La probeta se fabricó con dos ladrillos macizos de tejar tipo La Operaria, colocándose un ladrillo entero como base, sobre el que se colocó un tendel de argamasa, otro ladrillo y como remate otro tendel de argamasa. La mezcla de la argamasa fue con la proporción 1:3.

## V. Imágenes del ensayo

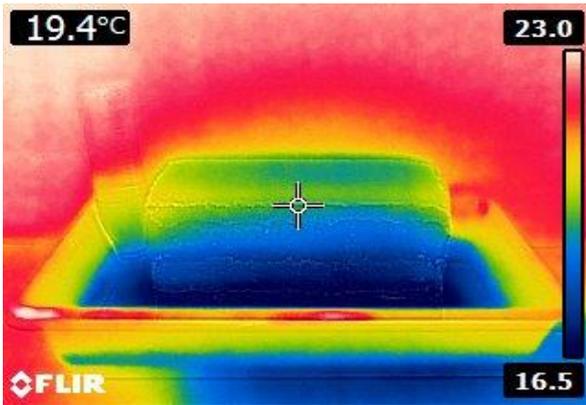
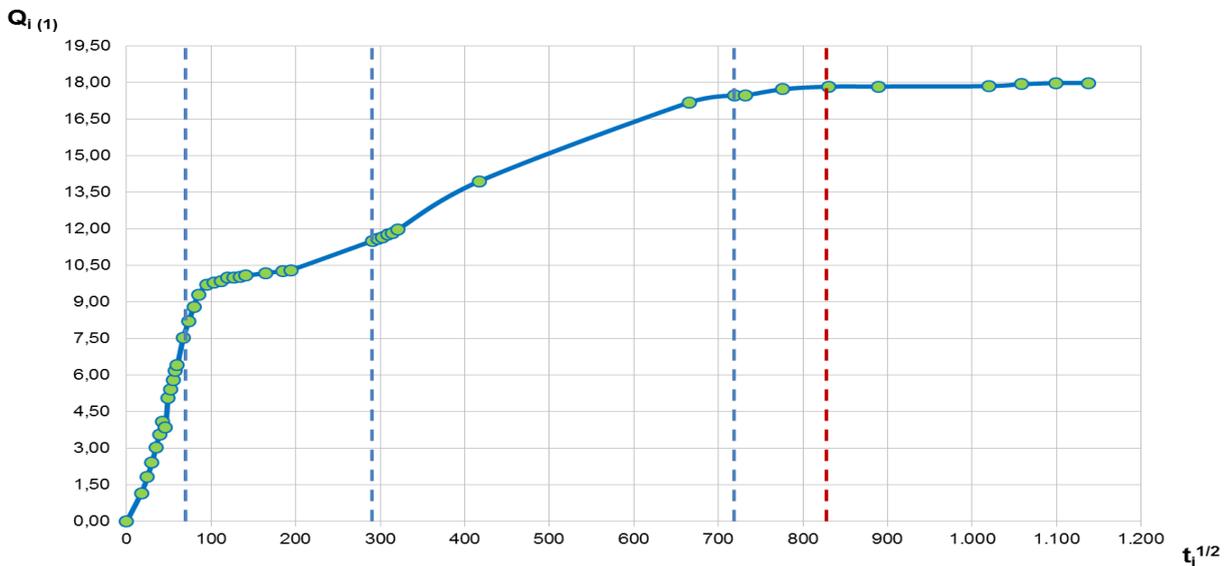


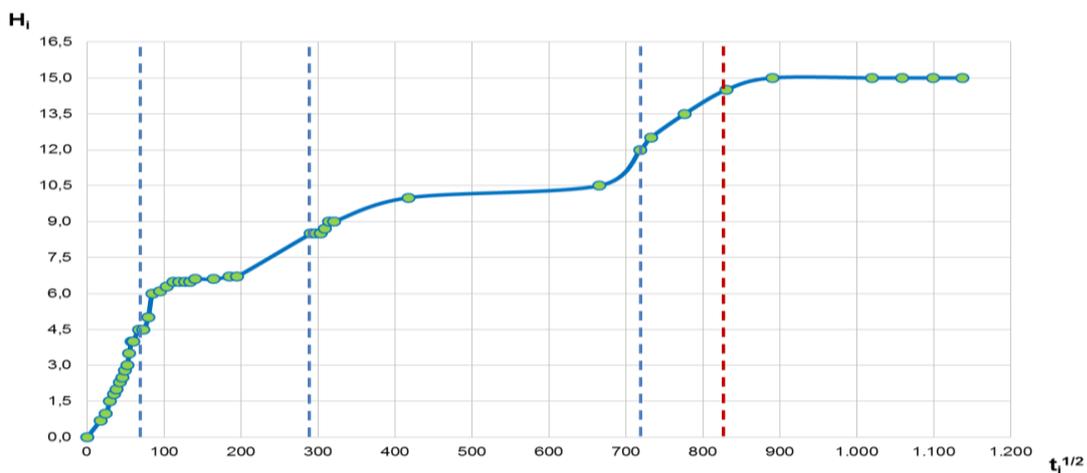
Imagen 115. Imágenes de la probeta durante el ensayo

## VI. Datos y expresión de resultados



Gráfica 30. La gráfica muestra la cantidad de agua absorbida por unidad de superficie en kg/m<sup>2</sup>

El eje vertical señala el dato de  $Q_i$ , y el eje horizontal la raíz cuadrada del tiempo



Gráfica 31. La gráfica da los valores de la altura alcanzada por el frente húmedo en la probeta.

El eje vertical marca el dato de la altura en cm que alcanza la humedad

y el eje horizontal la raíz cuadrada del tiempo

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

Peso de la probeta en seco	Superficie en contacto con el agua	Altura de la probeta	Base de la probeta
$m_0$	A	h	h
kg	m <sup>2</sup>	m	m
10.164,90	0,03878	150 mm	277 x 140 mm

Fecha	Tiempo ensayo				Masa de la probeta en el tiempo $t_i$	Altura que alcanza el agua	Cantidad de agua absorbida
	$t_i$	$t_i$	$t_i$	$t_i^{1/2}$			
Símbolo	sg	sg	m/h/d	sg	kg	mm	kg/m <sup>3</sup>
Fórmula	Parcial	Total	Total	Total	Total		$[(m_i - m_0)/A]$
10-feb-16	0	0	0	0,00	10.164,90	0,0	0,00
"	300	300	5m	17,32	10.210,30	0,7	1,17
"	300	600	10m	24,49	10.235,70	1,0	1,83
"	300	900	15m	30,00	10.259,00	1,5	2,43
"	300	1.200	20m	34,64	10.282,30	1,8	3,03
"	300	1.500	25m	38,73	10.303,40	2,0	3,57
"	300	1.800	30m	42,43	10.323,40	2,3	4,09
"	300	2.100	35m	45,83	10.314,80	2,5	3,87
"	300	2.400	40m	48,99	10.361,20	2,8	5,06
"	300	2.700	45m	51,96	10.375,50	3,0	5,43
"	300	3.000	50m	54,77	10.390,30	3,5	5,81
"	300	3.300	55m	57,45	10.404,60	4,0	6,18
"	300	3.600	60m	60,00	10.413,90	4,0	6,42
"	900	4.500	1h15m	67,08	10.457,20	4,5	7,54
"	900	5.400	1h30m	73,48	10.483,10	4,5	8,21
"	900	6.300	1h45m	79,37	10.506,50	5,0	8,81
"	900	7.200	2h	84,85	10.525,40	6,0	9,30
"	1.800	9.000	2h30m	94,87	10.541,00	6,1	9,70
"	1.800	10.800	3h	103,92	10.544,50	6,3	9,79
"	1.800	12.600	3h30m	112,25	10.547,50	6,5	9,87
"	1.800	14.400	4h	120,00	10.553,10	6,5	10,01
"	1.800	16.200	4h30m	127,28	10.553,10	6,5	10,01
"	1.800	18.000	5h	134,16	10.554,00	6,5	10,03
"	1.800	19.800	5h30m	140,71	10.555,50	6,6	10,07
"	7.200	27.000	7h30m	164,32	10.559,80	6,6	10,18
"	7.200	34.200	9h30m	184,93	10.562,90	6,7	10,26
"	3.600	37.800	10h30m	194,42	10.564,60	6,7	10,31
11-feb-16	46.800	84.600	23h30m	290,86	10.611,00	8,5	11,50
"	3.600	88.200	1d30m	296,98	10.613,90	8,5	11,58
"	3.600	91.800	1d1h30m	302,99	10.616,50	8,5	11,65
"	3.600	95.400	1d2h30m	308,87	10.620,50	8,7	11,75
"	3.600	99.000	1d3h30m	314,64	10.623,80	9,0	11,83
"	3.600	102.600	1d4h30m	320,31	10.628,50	9,0	11,95
12-feb-16	71.700	174.300	2d25m	417,49	10.705,80	10,0	13,95
15-feb-16	268.200	442.500	5d2h55m	665,21	10.830,80	10,5	17,17
16-feb-16	74.400	516.900	5d23h35m	718,96	10.842,00	12,0	17,46
"	19.200	536.100	6d4h55m	732,19	10.842,20	12,5	17,47
17-feb-16	66.600	602.700	6d23h25m	776,34	10.851,90	13,5	17,72
18-feb-16	86.400	689.100	7d23h25m	830,12	10.856,00	14,5	17,82
19-feb-16	102.600	791.700	9d3h55m	889,78	10.856,20	15,0	17,83
22-feb-16	248.400	1.040.100	12d55m	1.019,85	10.856,80	15,0	17,84
23-feb-16	81.000	1.121.100	12d23h25m	1.058,82	10.859,80	15,0	17,92
24-feb-16	86.400	1.207.500	13d23h25m	1.098,86	10.861,80	15,0	17,97
25-feb-16	86.400	1.293.900	14d23h25m	1.137,50	10.861,80	15,0	17,97

Tabla 46. Tabla de toma de datos del ensayo

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Para fijar el valor de la altura del frente húmedo se tomaron medidas en las cuatro caras de la probeta estableciéndose la media entre ellas.

Las líneas verticales de color azul de la gráfica 30 indican cambio de material cuando el agua asciende por capilaridad y va pasando de uno a otro, ladrillo-argamasa y argamasa-ladrillo. Así pues la primera línea azul marca la primera interfase ladrillo-argamasa; la segunda línea señala el paso de la argamasa del primer tendel al segundo ladrillo; y la tercera línea marca el paso del segundo ladrillo al segundo tendel de argamasa. La línea vertical roja indica el momento en el que el frente húmedo ha llegado a la zona superior de la probeta.

La primera gráfica indica la cantidad de agua absorbida por unidad de superficie según la siguiente fórmula:  $Q_i = [(m_i - m_0)/A]$ ; donde  $m_i$  es la masa inicial de la probeta,  $m_0$  es la masa de cada pesada, y "A" es la superficie de la base. La segunda gráfica indica la altura en centímetros que alcanza el frente húmedo. En ambos casos el eje horizontal indica la raíz cuadrada del tiempo en función de los segundos transcurridos.

A la vista de los datos obtenidos de las gráficas se puede concluir que **en las interfases o cambios de material se produce una clara ralentización del proceso de absorción de agua y de la velocidad de la ascensión de la humedad capilar**. Se observa igualmente que vez se ha superado una interfase la pendiente del tramo siguiente es más baja que en la del tramo inmediatamente anterior.

## **ENSAYOS ESPECÍFICOS DE COMPROBACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA EN LA CAPILARIDAD**

- **Ensayo 14**

- **Ensayos sobre fábrica**

- Ensayo 14.1**

## ENSAYO 14

## ENSAYO 14.1

**Ensayo sobre probeta de fábrica para comprobar el efecto de la capilaridad a través de la interfase vertical en la junta que se genera entre la argamasa y el ladrillo en las llagas**

### I. Denominación

Ensayo sobre probeta de fábrica para comprobar el efecto de la capilaridad a través de la interfase vertical en la junta que se genera entre la argamasa y el ladrillo en las llagas.

### II. Objetivo del ensayo

El objetivo de este ensayo era observar si existe o no una ascensión significativa de humedad por capilaridad justo en la interfase vertical que existe en la unión entre la argamasa y el ladrillo, que lo que ocurre en las fábricas en la zona de contacto entre las llagas verticales y los ladrillos.

### III. Procedimiento y descripción del ensayo

Para el desarrollo de este ensayo se ejecutó una probeta de fábrica compuesta por dos ladrillos con un tendel de argamasa entre ellos. Se dejó secar hasta que la diferencia entre dos pesadas consecutivas no difería del 1%. Una vez seca se colocó verticalmente de manera que la interfase se dispuso perpendicular a la base de la probeta y fue colocada dentro de una cubeta estanca sobre un lecho húmedo que permitía mantener un nivel de agua de unos 5-10 mm de profundidad con el fin de facilitar la absorción capilar de agua. Una vez iniciado el ensayo y con ayuda de la cámara termográfica se procedió a observar el proceso de ascensión de la humedad.

### IV. Descripción de la probeta

La probeta se fabricó con dos ladrillos macizos de tejar tipo La Operaria con una banda

intermedia de argamasa de cal con proporción en la mezcla 1:3. La probeta se "zunchó" con el fin de mantener unido en todo momento el conjunto y evitar que se desprendiesen la argamasa del ladrillo. Para la ejecución del ensayo la probeta se dispuso verticalmente.

#### V. Imágenes del ensayo. Datos y expresión de resultados



Imagen 116. Imagen de la probeta trascurrida 1 hora desde el inicio del ensayo

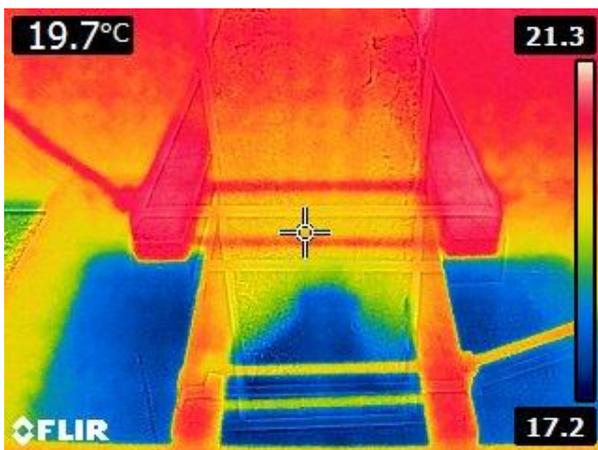


Imagen 117. Imagen de la probeta trascurridas 2 horas desde el inicio del ensayo



Imagen 118. Imagen de la probeta trascurridas 3 horas desde el inicio del ensayo



Imagen 119. Imagen de la probeta trascurridas 5 horas desde el inicio del ensayo

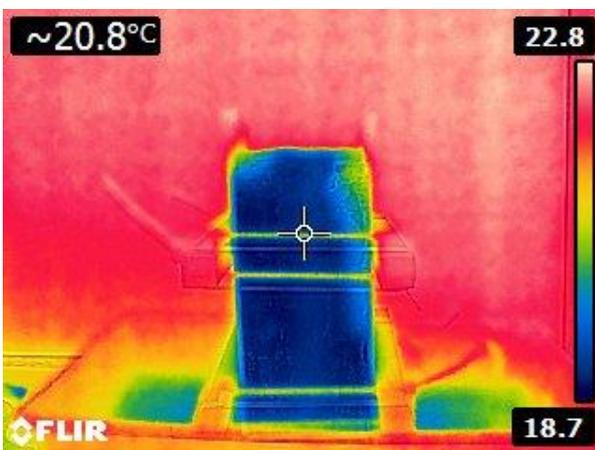


Imagen 120. Imagen de la probeta trascurrido un día completo desde el inicio del ensayo.

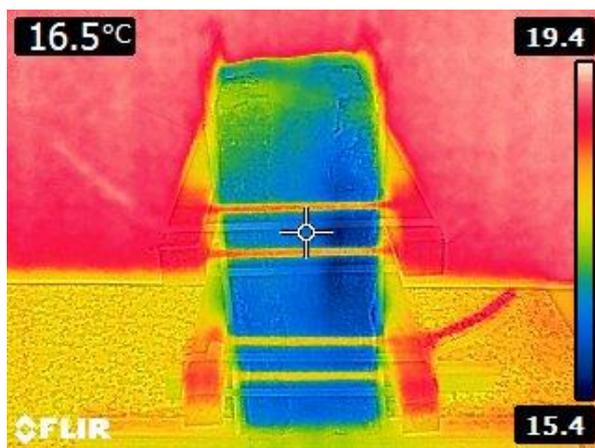


Imagen 121. Imagen de la probeta trascurridos 3 días desde que se inicia el proceso de secado o desorción. Se observa que la zona con el color azul más intenso, la que conserva más humedad, es precisamente la del ladrillo que más ha tardado en coger la humedad.

## VI. Discusión de resultados y conclusiones

De la observación de las imágenes obtenidas con la cámara termográfica se puede

deducir que no existe una ascensión capilar significativa por la junta o interfase que se genera en la zona de contacto entre la argamasa y el ladrillo. Sin embargo se aprecia claramente que la argamasa de cal es el material de la fábrica por el cual asciende la humedad con más rapidez. Da la impresión de que la banda de argamasa es la que “fira” de la humedad hacia arriba mientras que por el ladrillo la humedad asciende más lentamente. Esto coincide con lo observado en otros ensayos, especialmente en el ensayo 16.1 en el que se ensayan simultáneamente varias probetas de argamasa y ladrillo.

Los dos ladrillos, aun siendo de la misma tejería, se comportan de manera diferente, y como apreciación interesante se puede observar que el ladrillo que tarda más tiempo en absorber el agua es el que también tarda más tiempo en evaporarla durante el proceso de desorción.

Como conclusión de este ensayo se puede afirmar que **en la interfase o superficie de contacto que existe entre la argamasa y el ladrillo, el proceso de ascensión de humedad por capilaridad no está favorecido en ningún caso**. Es decir que, la discontinuidad que se forma entre los dos materiales, y que podría favorecer el fenómeno de la capilaridad al generar una posible fisura o sistema capilar vertical, no facilita la subida del agua por esa zona de la fábrica.



## **ENSAYO 15**

### ***Determinación de la absorción de humedad del ambiente***

#### **I. Denominación**

Determinación de la absorción de humedad que pueden absorber los materiales del ambiente.

#### **II. Objetivo del ensayo**

El objetivo del ensayo es intentar determinar la cantidad de agua que argamasas de cal y ladrillos son capaces de absorber del ambiente. Para ello se ha utilizado una cámara climática dentro de la cual se pueden variar las condiciones ambientales de humedad y temperatura con el fin de conocer la cantidad de agua que pueden absorber las probetas del ambiente en función de dichas condiciones.

#### **III. Descripción y procedimiento del ensayo**

Para llevar a cabo este ensayo se ha utilizado una cámara climática, concretamente de la marca WEIS TECHNICS, modelo WK3-340/40, la cuál consta de un recinto hermético conectado a unos sistemas de climatización que permiten regular en su interior unas condiciones determinadas de humedad y temperatura. Se han utilizado durante los ensayos probetas de ladrillos ("La Operaria" y Santoveña) y probetas de argamasas de cal (usando probetas normalizadas de 40 x 40 x 160 mm y porciones de llagas y tendeles procedentes del desmontaje de los cuatro muros fabricados en el laboratorio y pertenecientes al ensayo 10.1).

Para llevar a cabo el ensayo, en primer lugar se secaron las probetas en estufa hasta peso constante, tomándose periódicamente los datos hasta comprobar que se han estabilizado. Se fijaron unas condiciones exactas de humedad y temperatura y se introdujeron las probetas en la cámara climática. Durante un periodo de tiempo se van realizando pesadas cada 24 horas hasta que el aumento o pérdida de peso se estabiliza. Se modifican de nuevo las condiciones de humedad y temperatura a otros valores y se vuelve a repetir el proceso hasta que se produce una nueva estabilización de las pesadas. De esta manera se pudo comprobar la cantidad exacta de agua absorbida o perdida durante los procesos de absorción o desorción y el tiempo aproximado de duración.

## ENSAYO 15

## ENSAYO 15.1

### Ensayo no normalizado

#### *Probetas en cámara climática*

*Ensayo sobre 9 probetas de argamasa procedentes del desmontaje de los cuatro muros del ensayo 10.1*

*Determinación de la absorción de agua del ambiente*

#### IV. Descripción de las probetas

En este ensayo se introducen en la cámara climática 9 porciones de argamasa procedentes de las llagas y tendeles de los muros del ensayo 10.1, variándose las condiciones climáticas de humedad en su interior, con el fin de conocer la cantidad de agua que puede absorber la argamasa de cal del ambiente. Estas argamasas se hicieron con la proporción 1:3 en la mezcla.

#### V. Imágenes del ensayo y comentarios



Imagen 122. Imágenes de probetas de argamasa de cal dentro de la cámara climática.

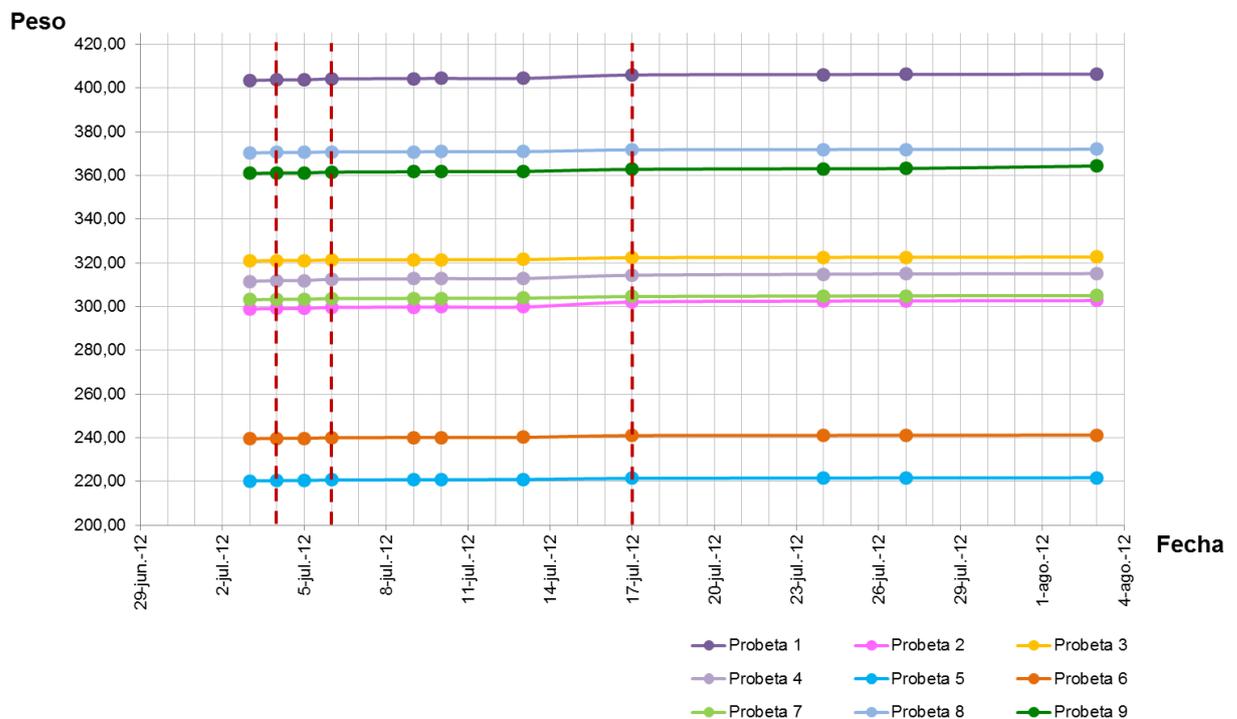
## VI. Datos y expresión de resultados

La siguiente tabla muestra los incrementos de peso de las probetas según se va modificando la humedad del ambiente del interior de la cámara. Los valores de la humedad se reflejan en la columna de la izquierda. La temperatura se mantuvo estable en 20°.

Fecha	Cámara Tª 20°C	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9
Símbolo	HR	Peso								
Unidad	%	gr								
29-jun.-12	30%									
3-jul.-12	30%	403,41	298,89	320,91	311,57	220,30	239,59	303,13	370,31	360,90
4-jul.-12	50%	403,70	299,15	321,07	311,91	220,45	239,76	303,34	370,48	361,12
5-jul.-12	50%	403,72	299,16	321,07	311,94	220,46	239,76	303,36	370,48	361,14
6-jul.-12	70%	404,15	299,62	321,33	312,50	220,70	240,03	303,66	370,74	361,51
9-jul.-12	70%	404,28	299,75	321,43	312,71	220,81	240,13	303,78	370,81	361,67
10-jul.-12	70%	404,37	299,82	321,51	312,82	220,87	240,19	303,84	370,89	361,79
13-jul.-12	70%	404,38	299,82	321,53	312,85	220,93	240,21	303,87	370,89	361,86
17-jul.-12	90%	405,91	302,07	322,35	314,34	221,43	240,99	304,61	371,70	362,76
24-jul.-12	90%	406,13	302,53	322,51	314,80	221,57	241,11	304,84	371,84	363,06
27-jul.-12	90%	406,22	302,63	322,58	314,95	221,65	241,18	304,94	371,90	363,19
3-ago.-12	90%	406,27	302,76	322,65	315,10	221,71	241,22	305,03	371,94	364,30

Tabla 47. Valores del incremento de peso de las probetas según la variación de la humedad

La gráfica que se muestra a continuación representa la evolución del peso de las probetas según los datos de la tabla anterior. Se expresa en gramos en función del tiempo.

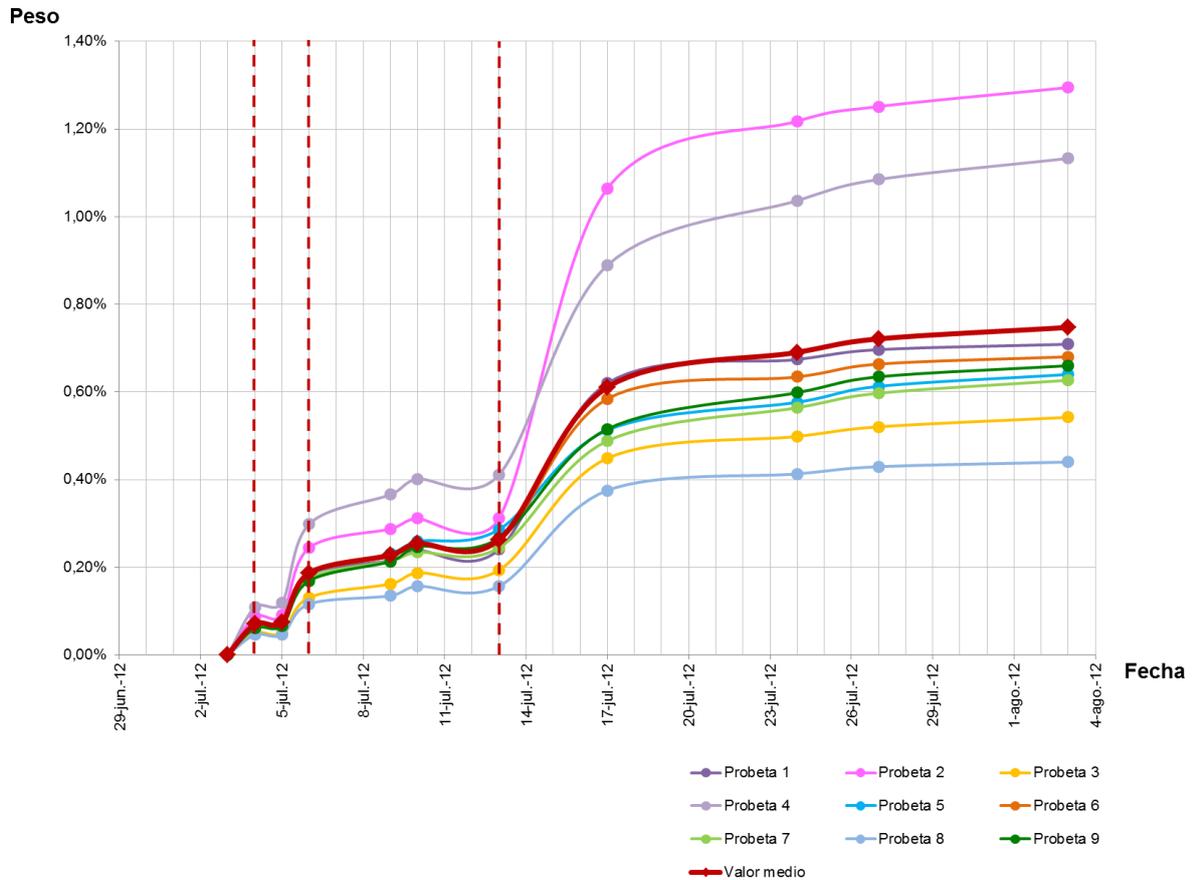


Gráfica 32. Representación de los valores de la tabla 47 en función de la variación de la humedad

La tabla y la gráfica siguientes muestran las variaciones de peso en porcentaje, a diferencia de las anteriores que mostraban únicamente los valores numéricos del incremento de peso. Así pues la tabla 48 representa los incrementos de peso en tanto por ciento de los valores de la tabla 47, y la gráfica 33 es la representación de la tabla 48. Las líneas de esta gráfica parecen indicar variaciones importantes pero es necesario reseñar que el intervalo de incremento que representan es pequeño, concretamente el que va del 0,00 % al 1,40 %.

Fecha	Cámara Tª 20°C	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Valor medio
Símbolo	HR	Peso	HR								
Unidad	%	gr	%								
29-jun.-12	30%										
3-jul.-12	30%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	<b>0,00%</b>
4-jul.-12	50%	0,07%	0,09%	0,05%	0,11%	0,07%	0,07%	0,07%	0,05%	0,06%	<b>0,07%</b>
5-jul.-12	50%	0,08%	0,09%	0,05%	0,12%	0,07%	0,07%	0,08%	0,05%	0,07%	<b>0,07%</b>
6-jul.-12	70%	0,18%	0,24%	0,13%	0,30%	0,18%	0,18%	0,17%	0,12%	0,17%	<b>0,19%</b>
9-jul.-12	70%	0,22%	0,29%	0,16%	0,37%	0,23%	0,23%	0,21%	0,14%	0,21%	<b>0,23%</b>
10-jul.-12	70%	0,24%	0,31%	0,19%	0,40%	0,26%	0,25%	0,23%	0,16%	0,25%	<b>0,25%</b>
13-jul.-12	90%	0,24%	0,31%	0,19%	0,41%	0,29%	0,26%	0,24%	0,16%	0,27%	<b>0,26%</b>
17-jul.-12	90%	0,62%	1,06%	0,45%	0,89%	0,51%	0,58%	0,49%	0,38%	0,52%	<b>0,61%</b>
24-jul.-12	90%	0,67%	1,22%	0,50%	1,04%	0,58%	0,63%	0,56%	0,41%	0,60%	<b>0,69%</b>
27-jul.-12	90%	0,70%	1,25%	0,52%	1,08%	0,61%	0,66%	0,60%	0,43%	0,63%	<b>0,72%</b>
3-ago.-12	90%	0,71%	1,29%	0,54%	1,13%	0,64%	0,68%	0,63%	0,44%	0,66%	<b>0,75%</b>

Tabla 48. Valores de incremento del peso de las probetas en tanto por ciento en función de la variación de humedad



Gráfica 33. Gráfico que representa los valores de la tabla 48. Incremento del peso en % en función de la humedad

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

Las muestras de argamasa de cal presentan unas variaciones de peso muy pequeñas cuando las condiciones ambientales llegan a alcanzar valores de un 90% de humedad y de 20 grados de temperatura.

Como conclusión se puede afirmar que para humedades de hasta un 90% con una temperatura ambiente de 20 grados las argamasas de cal pueden absorber del ambiente entre un **0,4% y un 1,3% del peso inicial**. Se puede concluir que el aporte de humedad por absorción del ambiente es muy reducido y más aún si se tiene en cuenta la proporción con respecto al agua que se absorbe por el fenómeno de la capilaridad que puede llegar en torno al 12 %, es decir 10 veces más.

## ENSAYO 15

## ENSAYO 15.2

### Ensayo no normalizado

#### *Probetas en cámara climática*

*Ensayo sobre 18 probetas normalizadas (6+6+6)  
de argamasa con proporciones diferentes en su  
composición 1:2, 1:3, 1:4 (cal:arena)*

*Determinación de la absorción de agua  
del ambiente*

#### IV. Descripción de las probetas

Para este ensayo se emplearon 18 (6+6+6) probetas normalizadas (40 x 40 x 160 mm) de argamasa de cal, con tres proporciones diferentes en su composición: 1:2, 1:3 y 1:4.

#### V. Imágenes del ensayo y comentarios



Imagen 123. Imágenes del pesado de probetas y una vez introducidas en la cámara climática

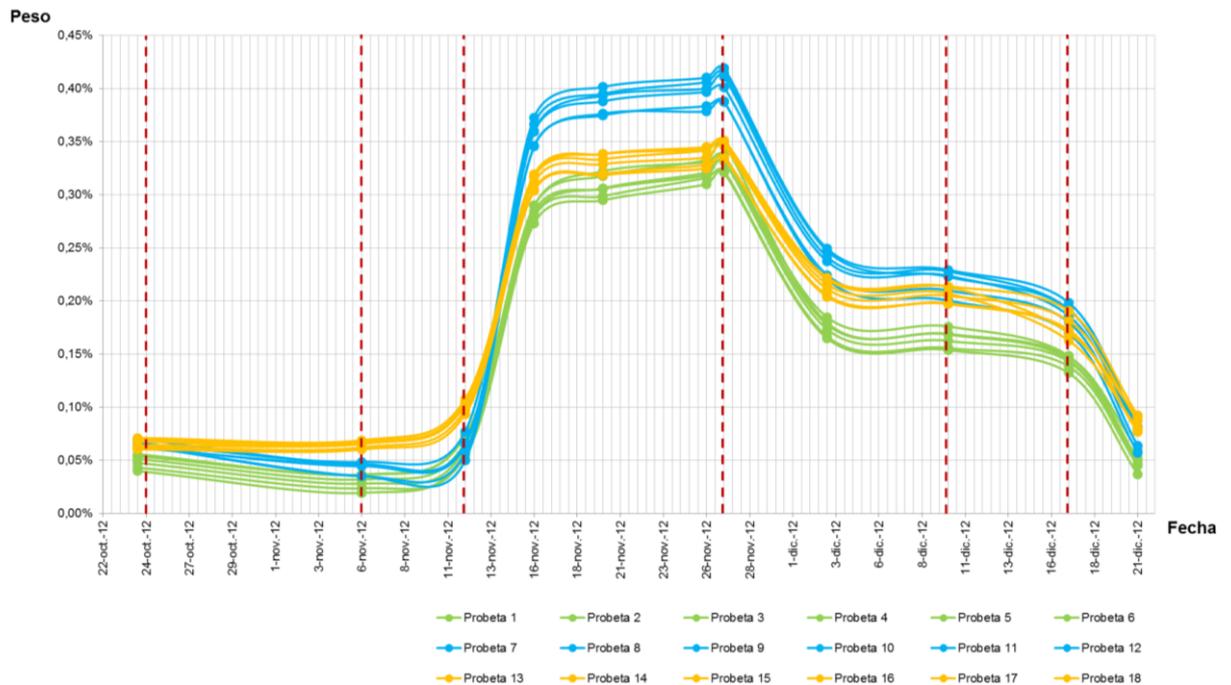
VI. Datos y expresión de resultados

Fecha	Cámara T° 20°C	Mortero 1:2 (14-Sep.-12)						Mortero 1:3 (5-Sep.-2012)						Mortero 1:4 (3-Oct.-2012)					
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12	Probeta 13	Probeta 14	Probeta 15	Probeta 16	Probeta 17	Probeta 18
Símbolo	HR	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso
Unidad	%	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr
22-oct-12		465,85	462,9	467,24	461,74	462,21	461,35	453,31	453,53	453,89	454,61	451,28	447,63	473,16	464,14	476,97	481,84	480,51	468,55
24-oct-12	50%	465,81	462,86	467,22	461,62	462,18	461,36	453,24	453,46	453,83	454,56	451,23	447,58	473,10	464,10	476,93	481,82	480,48	468,51
24-oct-12	*	466,07	463,11	467,46	461,84	462,38	461,35	453,53	453,76	454,12	454,84	451,59	447,86	473,42	464,43	477,26	482,12	480,77	468,81
6-nov-12	70%	465,98	463,03	467,37	461,75	462,29	461,45	453,40	453,68	453,99	454,77	451,44	447,78	473,41	464,42	477,25	482,12	480,77	468,82
12-nov-12	95%	466,15	463,20	467,53	461,90	462,43	461,62	453,40	453,81	454,09	454,86	451,53	447,87	473,59	464,60	477,43	482,29	480,93	468,99
16-nov-12	*	467,16	464,20	468,53	462,93	463,47	462,62	454,90	455,15	455,40	456,13	452,85	449,19	474,61	465,57	478,44	483,29	481,94	469,97
20-nov-12	*	467,31	464,33	468,65	463,03	463,56	462,72	455,03	455,28	455,53	456,27	452,98	449,34	474,70	466,67	478,52	483,36	482,01	470,05
26-nov-12	*	467,35	464,40	468,72	463,09	463,64	462,79	455,08	455,32	455,57	456,28	453,02	449,37	474,72	466,70	478,56	483,40	482,04	470,08
27-nov-12	70%	467,38	464,47	468,79	463,15	463,67	462,84	455,12	455,36	455,59	456,32	453,04	449,42	474,75	466,73	478,60	483,43	482,09	470,13
3-dic-12	*	466,67	463,69	468,05	462,42	462,95	462,12	454,36	454,59	454,83	455,58	452,30	448,66	474,12	465,13	477,98	482,81	481,46	469,50
10-dic-12	50%	466,63	463,64	468,01	462,37	462,90	462,07	454,25	454,50	454,74	455,63	452,24	448,60	474,08	465,09	477,95	482,77	481,43	469,47
17-dic-12	20%	466,50	463,53	467,91	462,28	462,82	461,97	454,11	454,36	454,60	455,33	452,07	448,44	473,87	464,89	477,84	482,65	481,31	469,36
21-dic-12	*	466,05	463,07	467,50	461,84	462,39	461,53	453,60	453,83	454,09	454,85	451,58	447,94	473,48	464,52	477,37	482,19	480,85	468,92

Fecha	Cámara T° 20°C	Mortero 1:2 (14-Sep.-12)						Mortero 1:3 (5-Sep.-2012)						Mortero 1:4 (3-Oct.-2012)					
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12	Probeta 13	Probeta 14	Probeta 15	Probeta 16	Probeta 17	Probeta 18
Unidad	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
22-oct-12		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
24-oct-12	50%	0,06%	0,05%	0,05%	0,05%	0,04%	0,04%	0,06%	0,07%	0,06%	0,06%	0,07%	0,06%	0,07%	0,07%	0,07%	0,06%	0,06%	0,06%
24-oct-12	*	0,08%	0,05%	0,05%	0,05%	0,04%	0,04%	0,06%	0,07%	0,06%	0,06%	0,07%	0,06%	0,07%	0,07%	0,07%	0,06%	0,06%	0,06%
6-nov-12	70%	0,04%	0,04%	0,03%	0,03%	0,02%	0,02%	0,04%	0,05%	0,04%	0,05%	0,05%	0,04%	0,07%	0,07%	0,07%	0,06%	0,06%	0,07%
12-nov-12	95%	0,07%	0,07%	0,07%	0,06%	0,05%	0,06%	0,05%	0,08%	0,06%	0,07%	0,07%	0,06%	0,10%	0,11%	0,10%	0,10%	0,09%	0,10%
16-nov-12	*	0,29%	0,29%	0,28%	0,28%	0,28%	0,27%	0,37%	0,37%	0,35%	0,35%	0,36%	0,36%	0,32%	0,32%	0,32%	0,31%	0,30%	0,31%
20-nov-12	*	0,32%	0,32%	0,31%	0,31%	0,30%	0,29%	0,39%	0,40%	0,37%	0,38%	0,39%	0,39%	0,34%	0,34%	0,33%	0,32%	0,32%	0,33%
26-nov-12	*	0,33%	0,33%	0,32%	0,32%	0,32%	0,31%	0,41%	0,41%	0,38%	0,38%	0,40%	0,40%	0,34%	0,34%	0,34%	0,33%	0,32%	0,34%
27-nov-12	70%	0,34%	0,35%	0,34%	0,33%	0,32%	0,32%	0,41%	0,42%	0,39%	0,39%	0,40%	0,41%	0,35%	0,35%	0,35%	0,33%	0,34%	0,35%
3-dic-12	*	0,18%	0,18%	0,18%	0,17%	0,17%	0,16%	0,25%	0,25%	0,22%	0,22%	0,24%	0,24%	0,22%	0,22%	0,22%	0,21%	0,20%	0,21%
10-dic-12	50%	0,18%	0,17%	0,17%	0,16%	0,16%	0,15%	0,22%	0,23%	0,20%	0,21%	0,22%	0,23%	0,21%	0,21%	0,21%	0,20%	0,20%	0,20%
17-dic-12	20%	0,15%	0,14%	0,15%	0,14%	0,14%	0,13%	0,19%	0,20%	0,17%	0,18%	0,19%	0,19%	0,16%	0,17%	0,17%	0,17%	0,17%	0,18%
21-dic-12	*	0,05%	0,05%	0,06%	0,05%	0,05%	0,04%	0,08%	0,08%	0,06%	0,06%	0,08%	0,08%	0,08%	0,08%	0,09%	0,08%	0,08%	0,09%

Tabla 49. Tabla con las pesadas (arriba) y con los incrementos de peso en porcentaje (abajo).



Gráfica 34. Gráfico que representa los valores de la tabla 49 y que muestra el incremento de peso en porcentaje

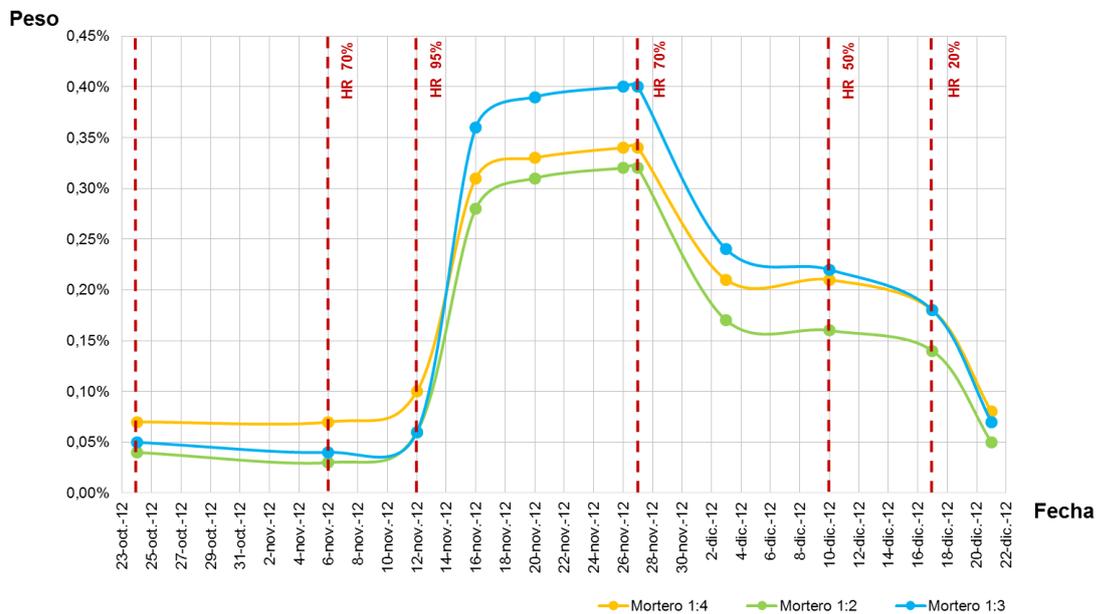
La gráfica expresa la variación del peso en porcentaje de todas las probetas en función de la variación de la humedad ambiente del interior de la cámara climática (en %).

Los resultados se expresan para los tres tipos de argamasas según la proporción de la mezcla:1:2, 1:3, 1:4 (cal/arena) a lo largo de los días en los que se han ido variando las condiciones de humedad de la cámara. En la siguiente tabla se muestran las medias.

Fecha	Cámara Tª 20°C	Mortero 1:2	Mortero 1:3	Mortero 1:4
Símbolo	HR	Peso	Peso	Peso
Unidad	%	%	%	%
24-oct.-12	"	0,04%	0,05%	0,07%
6-nov.-12	70%	0,03%	0,04%	0,07%
12-nov.-12	95%	0,06%	0,06%	0,10%
16-nov.-12	"	0,28%	0,36%	0,31%
20-nov.-12	"	0,31%	0,39%	0,33%
26-nov.-12	"	0,32%	0,40%	0,34%
27-nov.-12	70%	0,32%	0,40%	0,34%
3-dic.-12	"	0,17%	0,24%	0,21%
10-dic.-12	50%	0,16%	0,22%	0,21%
17-dic.-12	20%	0,14%	0,18%	0,18%
21-dic.-12	"	0,05%	0,07%	0,08%

Tabla 50. Tabla con los valores medios de las pesadas en función del tiempo, de la humedad del ambiente y de la proporción de la mezcla

En la gráfica que se adjunta a continuación, se expresa la variación del peso de las probetas en función de la variación de la humedad ambiente del interior de la cámara climática (en %) según la proporción de la mezcla.



Gráfica 35. Gráfica que representa los valores de la tabla 50. Muestra los incrementos de peso en función del tiempo, de la humedad del ambiente y de la proporción de la mezcla

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

La primera conclusión es que el valor de humedad del 70% es el punto a partir del cual las probetas toman o ceden agua del ambiente de forma rápida, hasta que no se llega a este

nivel los datos indican que la humedad ambiente no afecta en exceso a la cantidad de agua que las probetas absorben del entorno.

Llama la atención la gran uniformidad en el comportamiento de las probetas en este ensayo y en el anterior. Los valores que se obtienen de los ensayos son de una gran similitud sin apenas dispersión de los mismos.

Los valores obtenidos muestran que la argamasa de cal con la proporción de 1:3 es la que más agua absorbe de un ambiente, en términos absolutos. Si bien las diferencias y **las cantidades de agua absorbidas del ambiente son mínimas** en todos los casos.

Como conclusión se puede afirmar que para humedades ambientales de hasta un 95%, con una temperatura fija de 20 grados, las argamasas de cal absorben del ambiente hasta un máximo de un **0,4% del peso inicial**. Es decir que el aporte de humedad por absorción de agua del ambiente es muy reducido, como se pudo observar también en el ensayo anterior.

## ENSAYO 15

## ENSAYO 15.3

### Ensayo no normalizado

#### *Probetas en cámara climática*

*Ensayo sobre probetas de ladrillos de tejar antiguos "La Operaria" y ladrillos de ejecución moderna por extrusión Santoveña*

*Determinación de la absorción de agua del ambiente*

### IV. Descripción de las probetas

Para este ensayo se emplean dos tipos de ladrillo: Ladrillos de tejar antiguos de elaboración manual tipo "La Operaria", y ladrillos fabricados por extrusión tipo Santoveña.

Dichas probetas se introducen en la cámara climática variándose las condiciones de humedad en su interior, tal y como se expresa en las tablas y gráficas que se adjuntan a continuación, con el fin de conocer la cantidad de agua que puede absorber un ladrillo del ambiente.

### V. Imágenes del ensayo y comentarios



Imagen 124. Imágenes de la cámara climática donde en su interior se ensayan las probetas

VI. Datos y expresión de resultados

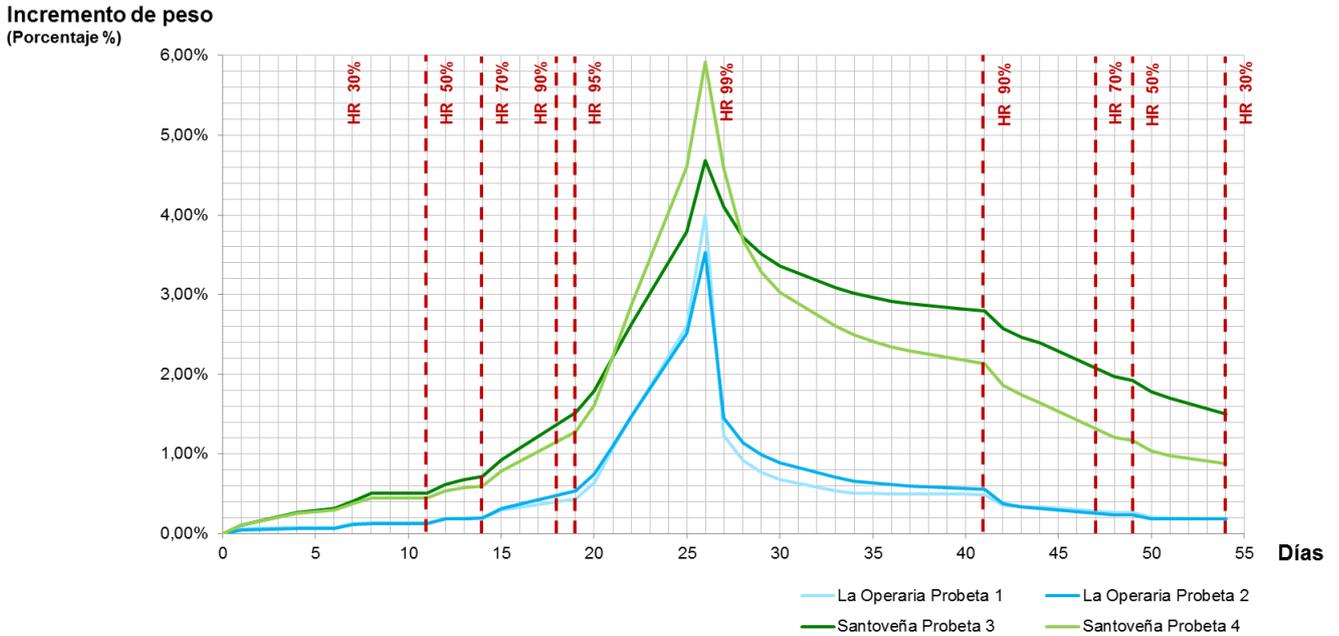
Nº probeta	Ladrillo	Soga	Tizón	Grueso	Peso probeta seca	Peso probeta saturada	UNE-EN 6707 Absorción en peso	Volumen	Peso prob. sat. cámara	Absorción en peso Cámara HR 100%
Unidad		mm	mm	mm	gr	gr	%	cm <sup>3</sup>	gr	%
1	De tejar - La Operaria	284,0	140,0	47,0	3.062,70	3.622,50	18,28%	1.868,72	3.187,86	4,09%
2	De tejar - La Operaria	279,0	139,0	47,0	3.073,65	3.571,00	16,18%	1.822,71	3.184,06	3,59%
3	Macizo - Santoveña	241,0	108,0	38,5	1.830,42	2.103,26	14,91%	1.002,08	1.918,34	4,80%
4	Macizo - Santoveña	248,0	107,5	38,5	1.882,11	2.161,20	14,83%	1.026,41	1.995,37	6,02%

Fecha	Tiempo		Cámara	Ladrillos de tejar - La Operaria		Ladrillos macizos - Santoveña	
	t	t <sup>-1/2</sup>	HR	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
Unidad	sg	sg	%	gr	gr	gr	gr
26-abr.-12	0	0	30%	3.065,16	3.075,40	1.832,45	1.883,95
27-abr.-12	86.400	294	30%	3.067,02	3.076,89	1.834,37	1.886,02
	172.800	416	30%				
	259.200	509	30%				
30-abr.-12	345.600	588	30%	3.067,48	3.077,33	1.837,29	1.888,79
	432.000	657	30%				
2-may.-12	518.400	720	30%	3.067,56	3.077,41	1.838,17	1.889,47
3-may.-12	604.800	778	50%	3.069,05	3.078,85	1.839,93	1.891,10
4-may.-12	691.200	831	50%	3.069,19	3.079,18	1.841,74	1.892,30
	777.600	882	50%				
	864.000	930	50%				
7-may.-12	950.400	975	50%	3.069,34	3.079,18	1.841,74	1.892,30
8-may.-12	1.036.800	1.018	70%	3.071,00	3.080,99	1.843,86	1.894,14
9-may.-12	1.123.200	1.060	70%	3.071,13	3.081,21	1.844,82	1.894,78
10-may.-12	1.209.600	1.100	70%	3.071,22	3.081,30	1.845,56	1.895,22
11-may.-12	1.296.000	1.138	90%	3.074,20	3.085,03	1.849,52	1.898,85
	1.382.400	1.176	90%				
	1.468.800	1.212	90%				
	1.555.200	1.247	90%				
15-may.-12	1.641.600	1.281	95%	3.078,70	3.091,78	1.860,32	1.908,10
16-may.-12	1.728.000	1.315	99%	3.084,81	3.098,50	1.865,33	1.914,26
17-may.-12	1.814.400	1.347	99%	3.098,02	3.109,32	1.873,02	1.925,78
18-may.-12	1.900.800	1.379	99%	3.109,95	3.120,56	1.880,65	1.937,90
	1.987.200	1.410	99%				
	2.073.600	1.440	99%				
21-may.-12	2.160.000	1.470	99%	3.145,00	3.152,61	1.901,83	1.970,65
22-may.-12	2.246.400	1.499	100%	3.187,86	3.184,06	1.918,34	1.995,37
28-feb.-12	2.332.800	1.527	90%	3.103,00	3.120,00	1.907,53	1.970,29
29-feb.-12	2.419.200	1.555	90%	3.093,35	3.110,38	1.900,56	1.953,30
1-mar.-12	2.505.600	1.583	90%	3.088,86	3.105,77	1.896,70	1.945,77
2-mar.-12	2.592.000	1.610	90%	3.085,92	3.102,63	1.893,99	1.940,95
	2.678.400	1.637	90%				
	2.764.800	1.663	90%				
5-mar.-12	2.851.200	1.689	90%	3.081,69	3.097,03	1.888,94	1.932,95
6-mar.-12	2.937.600	1.714	90%	3.080,77	3.095,65	1.887,66	1.931,05
7-mar.-12	3.024.000	1.739	90%	3.080,70	3.094,88	1.886,74	1.929,46
8-mar.-12	3.110.400	1.764	90%	3.080,44	3.094,40	1.885,93	1.928,18
9-mar.-12	3.196.800	1.788	90%	3.080,40	3.093,70	1.885,37	1.927,23
	3.283.200	1.812	90%				
	3.369.600	1.836	90%				
12-mar.-12	3.456.000	1.859	90%	3.080,27	3.092,88	1.884,03	1.924,85
13-mar.-12	3.542.400	1.882	90%	3.080,07	3.092,49	1.883,65	1.924,18
14-mar.-12	3.628.800	1.905	70%	3.075,95	3.086,92	1.879,65	1.919,06
15-mar.-12	3.715.200	1.927	70%	3.075,62	3.085,64	1.877,69	1.916,68
16-mar.-12	3.801.600	1.950	70%	3.075,53	3.085,22	1.876,28	1.914,92
	3.888.000	1.972	70%				
	3.974.400	1.994	70%				
	4.060.800	2.015	70%				
20-mar.-12	4.147.200	2.036	50%	3.073,40	3.082,78	1.868,53	1.906,70
21-mar.-12	4.233.600	2.058	50%	3.073,35	3.082,76	1.867,65	1.905,90
22-mar.-12	4.320.000	2.078	30%	3.071,37	3.081,23	1.865,10	1.903,49
23-mar.-12	4.406.400	2.099	30%	3.071,15	3.081,14	1.863,61	1.902,44
	4.492.800	2.120	30%				
	4.579.200	2.140	30%				
26-mar.-12	4.665.600	2.160	30%	3.070,97	3.081,11	1.859,97	1.900,50

Tabla 51. Tabla con las pesadas de las probetas de ladrillos

A continuación se muestran los resultados obtenidos cuando se van modificando las condiciones climáticas de humedad del interior de la cámara en donde se encuentran las probetas descritas. La gráfica describe la variación del peso de agua absorbida en tanto por ciento a lo largo del tiempo expresado en segundos.



**Gráfica 36. Gráfica que representa los valores de la tabla 51. Muestra los incrementos de peso en función del tiempo, de la humedad del ambiente y del tipo de ladrillo**

## VII. Discusión de resultados y conclusiones

En cuanto al proceso de absorción apuntar que los ladrillos por extrusión comienzan a tomar agua del ambiente con valores de humedad relativa ciertamente bajos (con un 30% de humedad ambiente), si bien en cantidades muy pequeñas. Las probetas del otro tipo de ladrillos, los de tejar, apenas aumentan su peso en un 0,05%.

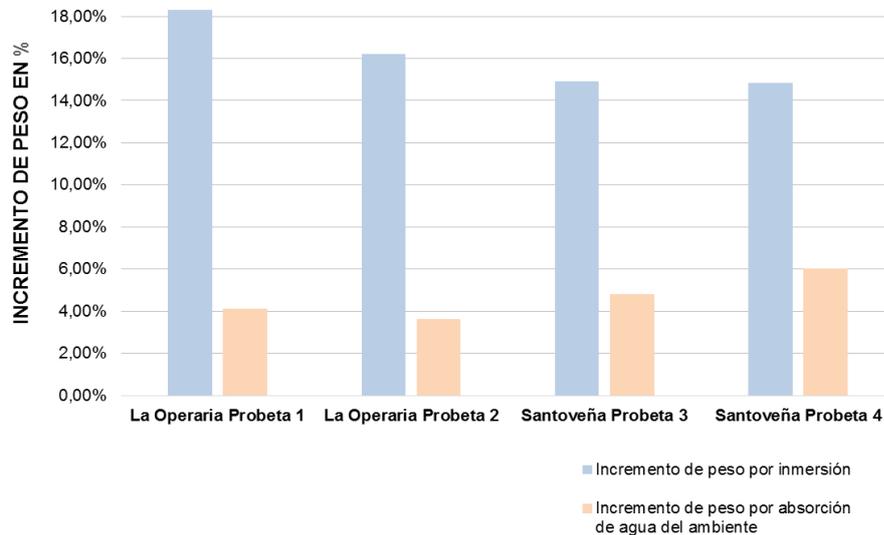
A partir de humedades de ambiente del 90% y hasta el 100% se experimentan absorciones de agua apreciables en todas las probetas, si bien hasta que no se llega al valor del 90% las variaciones de peso no son significativas.

Cuando la humedad del ambiente se acerca al estado de saturación las cantidades de absorción son significativas, llegando en los **ladrillos de tejar al 4% respecto del peso inicial y al 6% para los elaborados por extrusión.**

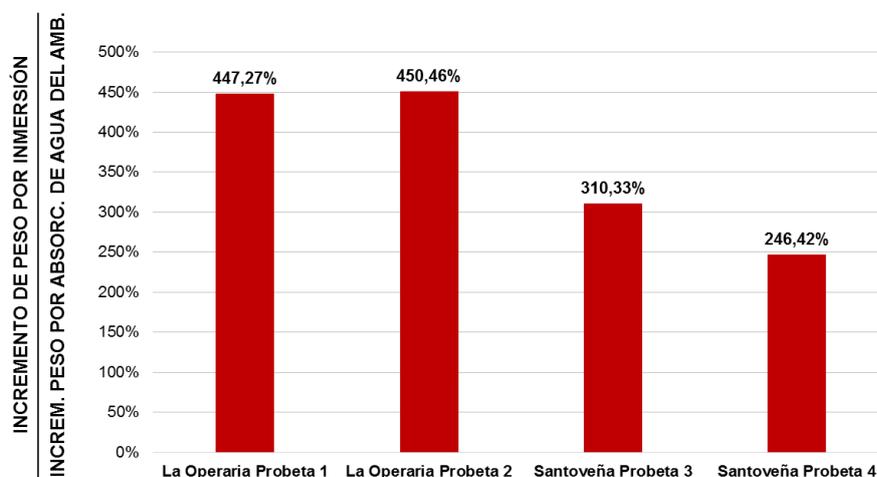
En cuanto al proceso de secado o desorción puede observarse que los ladrillos que más rápidamente evaporan la cantidad de agua que han cogido durante el proceso de absorción son los ladrillos antiguos de tejar.

### COMPARATIVA ENTRE LOS ENSAYOS DE INMERSIÓN EN AGUA Y DE AMBIENTE HÚMEDO.

Con el fin de ver la relación que hay entre el agua absorbida por los ladrillos según provenga de capilaridad o de absorción del ambiente se desarrolla este apartado. Se expresan, en la siguiente gráfica, el dato de la cantidad de agua absorbida en el ensayo de inmersión (ensayo 4.2) y el dato de la cantidad de agua absorbida en este ensayo hecho en la cámara climática (ensayo 15.3), con el fin de comparar la capacidad de un ladrillo de tomar agua al estar sumergido, en relación a la capacidad que tiene el mismo ladrillo de absorber vapor de agua de un ambiente húmedo casi saturado.



Gráfica 37. Gráfico que representa los valores de absorción de agua en los ensayos 4.2 y 15.3



Gráfica 38. Gráfico que representa el incremento de peso por inmersión en relación al incremento de peso por absorción de agua del ambiente

Los resultados muestran que la mayor diferencia entre ambos ensayos se obtiene en las probetas de ladrillo de tejar "La Operaria", el cual presenta una mayor dispersión entre los valores de absorción por inmersión y los de absorción de humedad del ambiente.

## **ENSAYOS SIMULTANEOS DE CAPILARIDAD EN PROBETAS DE ARGAMASA Y LADRILLO**

- **Ensayo 16**

- **Ensayos sobre fábrica**

- Ensayo 16.1**

## ENSAYO 16

## ENSAYO 16.1

**Ensayo sobre un amplio conjunto de probetas de argamasa (1:2, 1:3, 1:4) y ladrillo de tejar para evaluar simultáneamente la evolución de la cota y la velocidad de la ascensión de la humedad por capilaridad.**

### I. Denominación

Ensayo sobre un amplio conjunto de probetas de argamasa con diferentes proporciones en la mezcla (1:2, 1:3, 1:4) y probetas de ladrillo antiguo de tejar para evaluar simultáneamente la evolución de la cota y la velocidad de la ascensión de la humedad por capilaridad.

### II. Objetivo del ensayo

El objetivo de este ensayo es observar simultáneamente la velocidad de ascensión del frente húmedo por capilaridad en un grupo muy heterogéneo de probetas de ladrillo y de argamasa de cal, sobre todo de un modo visual. La finalidad última es ver la diferencia que hay en la evolución de la cota del frente húmedo entre la argamasa y el ladrillo.

### III. Procedimiento y descripción del ensayo

Para el desarrollo del ensayo se colocaron todas las probetas sobre cubetas estancas con una base que permitiese ser saturada de agua, de modo que los apoyos de las probetas estuviesen sobre un firme totalmente húmedo. Para ello se colocó en el fondo de los recipientes unos paños o bayetas que conseguían generar esos apoyos húmedos. A intervalos muy cortos, sobre todo al principio del ensayo, se realizaron fotos con la cámara termográfica, mediciones y pesadas de manera que se pudiese observar la evolución del proceso de la absorción de agua por capilaridad y el proceso inverso de la desorción. Se trataba sobre todo de comprobar la evolución del frente húmedo en la ascensión de la humedad.

La toma de datos se realizó con los siguientes intervalos de tiempo:

- Primeros 30 minutos                      cada 5 minutos.
- Siguiete hora                                cada 10 minutos
- Siguietes 2 horas                            cada 15 minutos

- Siguiendo 4 horas cada 30 minutos
- Resto del ensayo cada día durante 25 días

#### IV. Descripción de las probetas

Se utilizaron probetas de ladrillo y probetas de argamasa. Las probetas de ladrillo eran todas de ladrillos antiguos de tejar de distintas procedencias, pero de zonas geográficas cercanas. Con configuraciones más o menos prismáticas obtenidas de cortar piezas enteras con la ayuda de la sierra radial de disco. Dentro del grupo de probetas de ladrillo estaba una muestra de cada uno de los ladrillos utilizados en el ensayo 11.1. Entre las probetas de argamasa había de dos tipos. Unas eran prismáticas de dimensiones normalizadas, 40 x 40 x 160 mm, fabricadas con tres tipos de proporciones en las mezclas 1:2, 1:3 y 1:4; y probetas que eran porciones de argamasa provenientes del desmontaje del ensayo de los cuatro muros en el ensayo 10.1.

Descripción de las probetas de izquierda a derecha: Las 8 primeras son porciones de ladrillos de tejar de diversa procedencia. Las 9 siguientes son probetas normalizadas de argamasa de cal 1:2 (3ud), 1:3 (3ud), y 1:4 (3ud); y las 6 últimas son porciones del desmontaje del ensayo 10.1.



Imagen 125. Izquierda. Probetas de ladrillos de tejar.



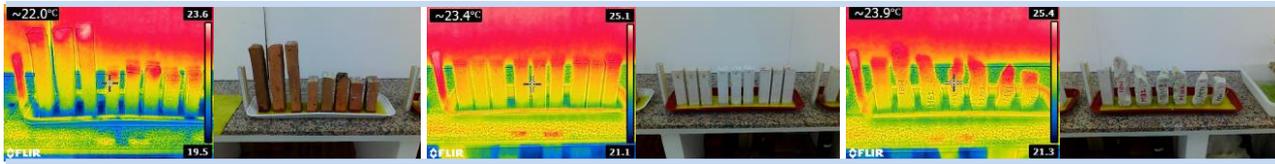
Derecha. Probetas de argamasa 1:2, 1:3 y 1:4



Imagen 126. Izqda. Probetas de argamasa de porciones del desmontaje del ensayo 10.1. Dcha. Todas las probetas

## V. Imágenes del ensayo. Datos y expresión de resultados

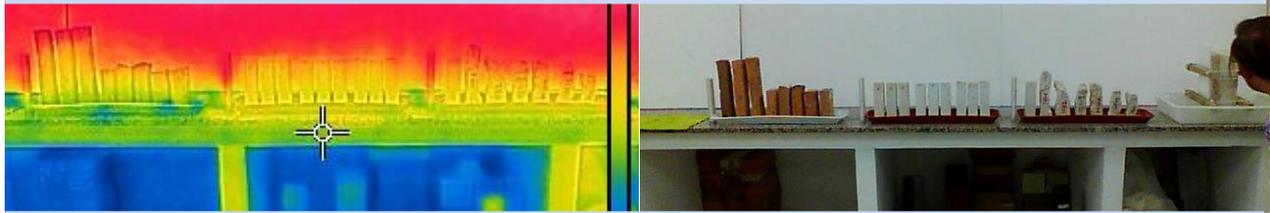
Imagen 127. Imágenes al inicio del ensayo



Probetas de ladrillos de tejar

Probetas argamasa 1:2 1:3 1:4

Probetas argamasa 1:3 desmontaje



Conjunto de todas las probetas

Imagen 128. Imagen a los 15 minutos del inicio del ensayo

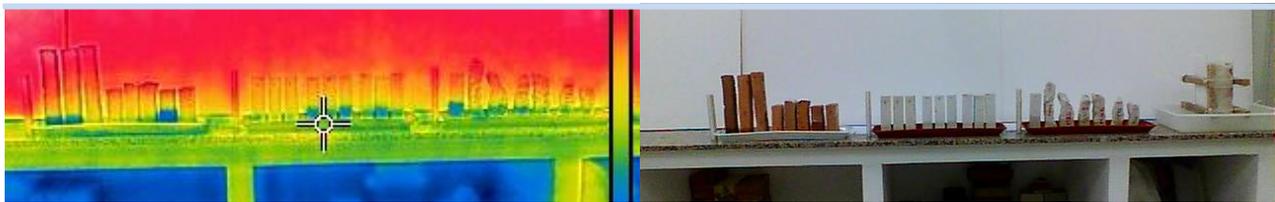
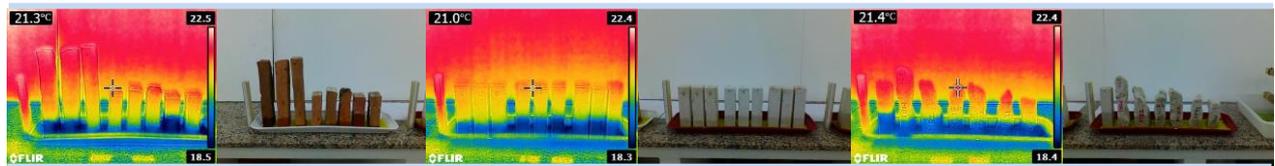


Imagen 129. Imagen a los 45 minutos del inicio del ensayo

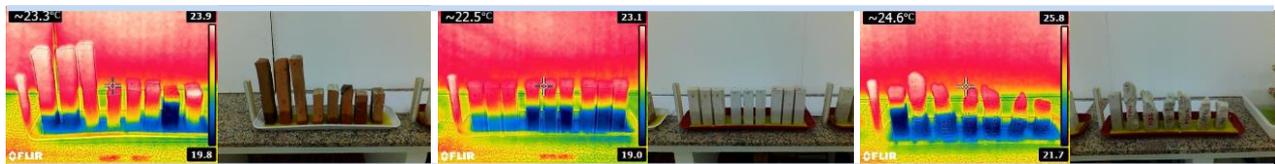


Imagen 130. Imagen a la hora y 45 minutos del inicio del ensayo

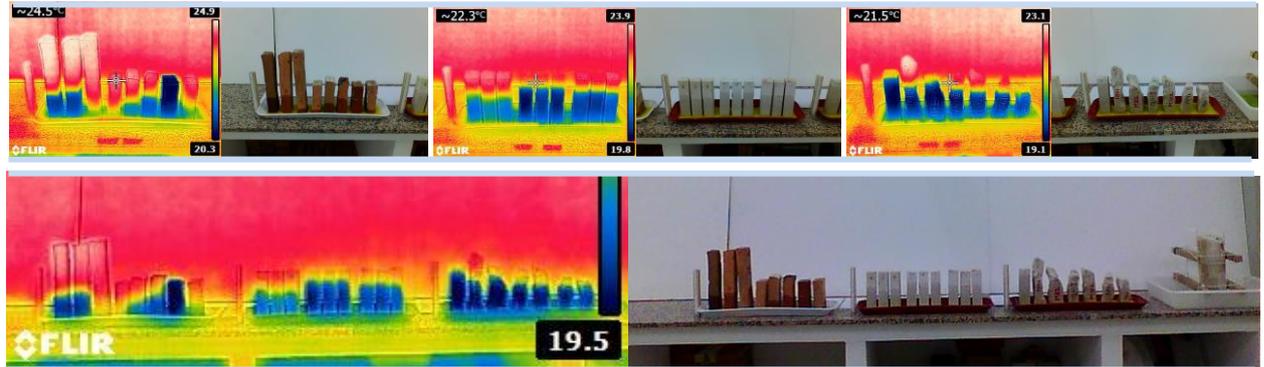


Imagen 131. Imagen a las 3 horas y 45 minutos del inicio del ensayo

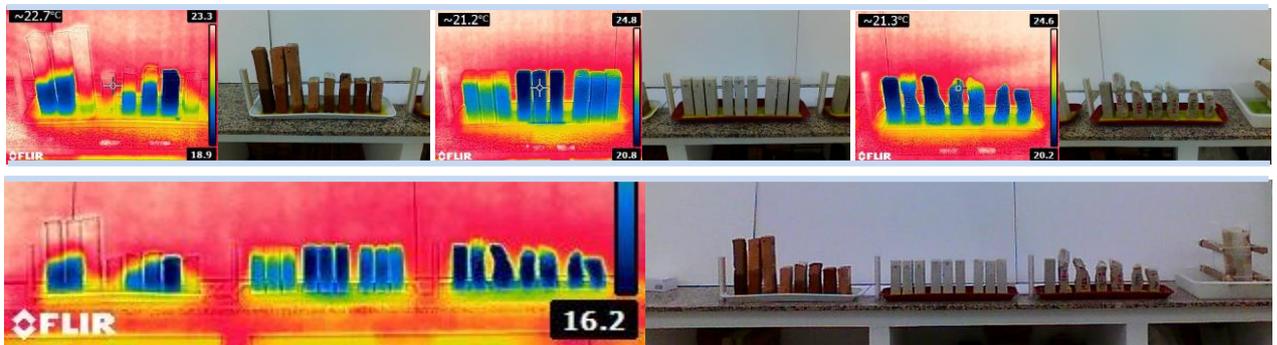


Imagen 132. Imagen a las 5 horas y 45 minutos del inicio del ensayo

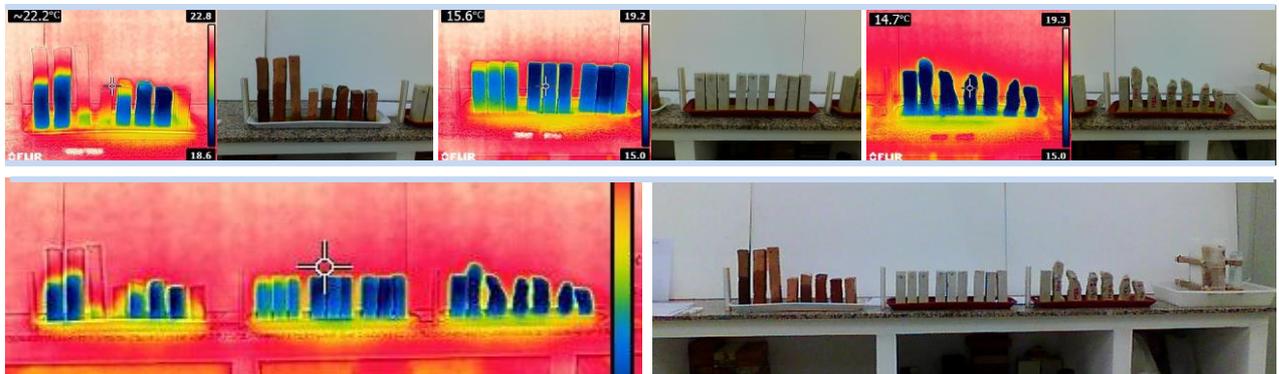


Imagen 133. Imagen un día después de iniciar el ensayo

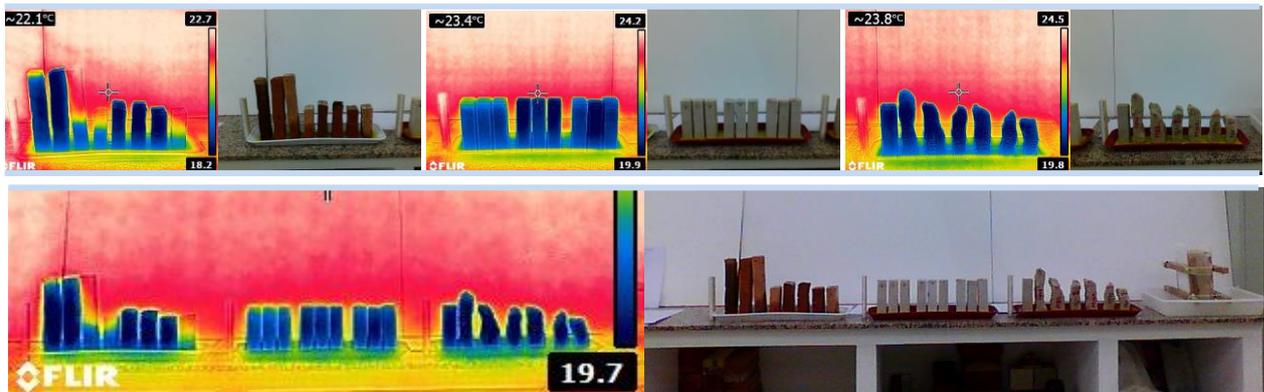
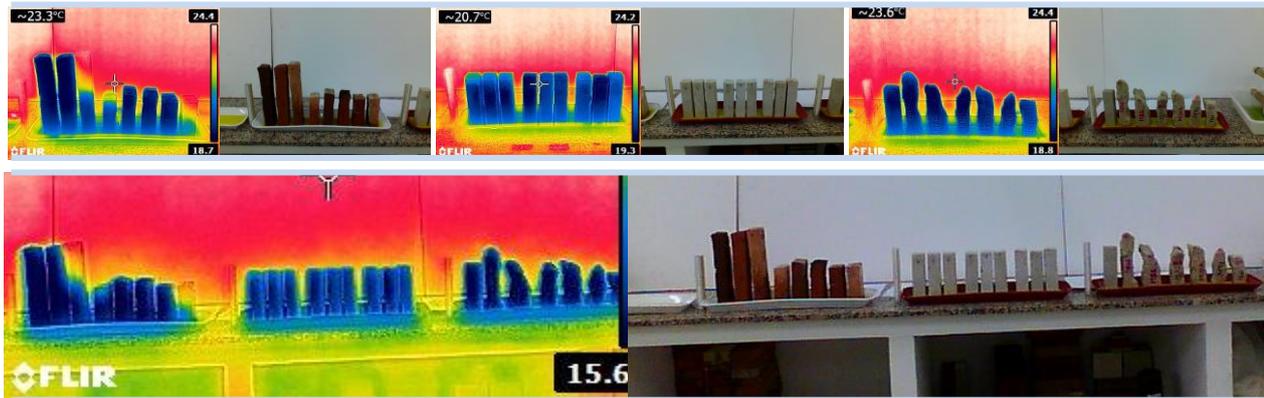
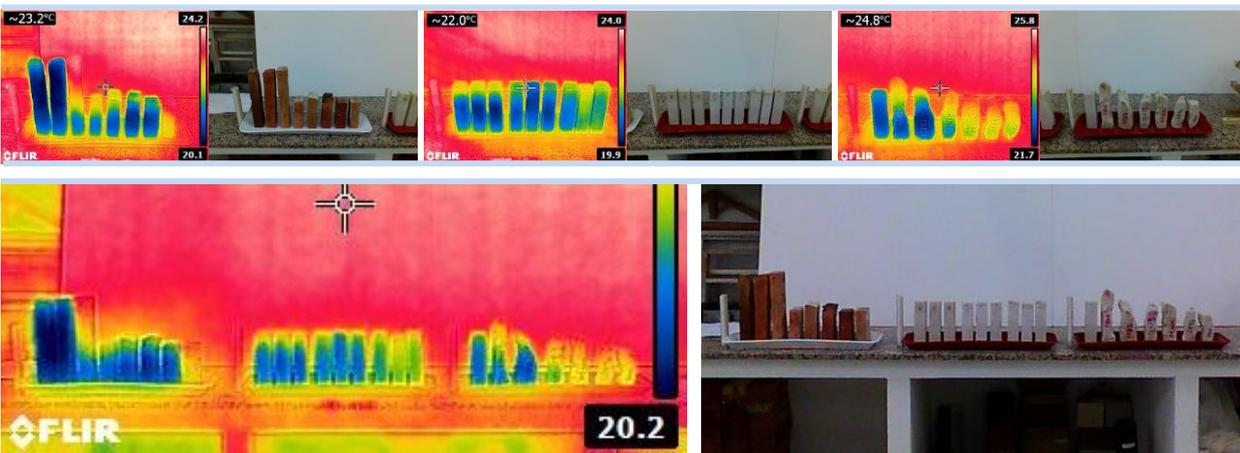


Imagen 134. Imagen dos días después de iniciar el ensayo



En las imágenes que se muestran a continuación se puede apreciar el estado de las probetas a los dos días de iniciado el proceso de desorción.

Imagen 135. Imagen de los días posteriores durante la desorción



## VI. Discusión de resultados y conclusiones

A la vista de las imágenes del ensayo, y de los datos registrados por las pesadas se pueden deducir las siguientes conclusiones:

La velocidad inicial del ascenso de agua por capilaridad **es mayor en las probetas de argamasa que en las probetas de ladrillo de tejar**. A excepción hecha en el caso de uno de los ladrillos que tiene velocidad parecida. Sin embargo al cabo de un día, en la mayoría de las muestras, tanto de ladrillos como de argamasas, el frente húmedo había conseguido llegar a la zona alta de las probetas. Excepción hecha con algunos de los ladrillos que tardaron más tiempo. Incluso uno de ellos, el situado más a la derecha del grupo de los ladrillos, nunca llegó a la zona alta, siendo además éste, uno de los ladrillos cuya densidad era más baja. Ocurre lo mismo con **el proceso de desorción, en el cual las probetas de argamasa pierden el agua mucho antes que las de ladrillo**.

Las probetas de argamasa se comportan con más homogeneidad que las de ladrillo, debido sin duda al control y proceso con el que están ejecutadas. Esta homogeneidad se puede observar también en cada grupo según la proporción de la mezcla.

#### FASE DE ABSORCIÓN

En la fase de absorción, **al cabo de un día todas las probetas de argamasa prácticamente estabilizaron su peso**. Los siguientes días se produjeron incrementos mínimos que no llegaron en ningún caso al 1 % del peso inicial. Sin embargo **las probetas de ladrillo estabilizaron su peso pasados tres o cuatro días**.

Las probetas prismáticas normalizadas de argamasa 1:2 evolucionaron más lentamente que las demás, tanto en el proceso de absorción como en el de desorción.

Las probetas de argamasa de cal 1:3 que eran porciones procedentes del derribo del ensayo 10.1 (el de los cuatro muros) presentan todas ellas, en el proceso de mojado, un color azul muy intenso, mucho más pronunciado que las otras probetas de argamasa, señal de que experimentan una evaporación muy intensa. Esto es debido probablemente a que están menos compactadas que las probetas normalizadas, de manera que su composición interna, como así se corrobora en el ensayo 6.1, presenta unos valores de porosidad abierta más altos y unos valores más bajos de densidad aparente seca (ver tabla 35).

A todos los ladrillos de tejar, los tres más altos colocados a la izquierda y los otros cinco procedentes del ensayo 11.1, se caracterizaron los valores de densidad aparente seca y de porosidad abierta, obteniéndose los siguientes valores.

MATERIAL	DENSIDAD APARENTE SECA	POROSIDAD ABIERTA
<b>LADRILLO de TEJAR</b>		
Ladrillo de tejar 1	<b>1.760 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>25,30 %</b>
Ladrillo de tejar 2	<b>1.825 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>26,20 %</b>
Ladrillo de tejar 3	<b>1.635 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>28,65 %</b>
PROBETA Nº 9	<b>1.600 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>29,77 %</b>
PROBETA Nº 10	<b>1.740 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>23,05 %</b>
PROBETA Nº 11	<b>1.820 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>26,01 %</b>
<b>PROBETA Nº 12</b>	<b>1.620 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>30,27 %</b>
PROBETA Nº 13	<b>1.610 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>28,79 %</b>

Tabla 52. Tabla con las pesadas de las probetas de ladrillos

Si se observan las imágenes de la cámara termográfica, durante la fase de absorción, se comprueba que el ladrillo que presenta la porosidad abierta más elevada (la señalada en color rojo en la tabla; probeta nº 12: 30,27 %) es el que adquiere un tono azul más intenso, lo cual es totalmente coherente. A mayor porosidad, mayor velocidad de absorción y mayor velocidad de desorción, y por consiguiente más enfriamiento superficial de la probeta, como así queda reflejado.

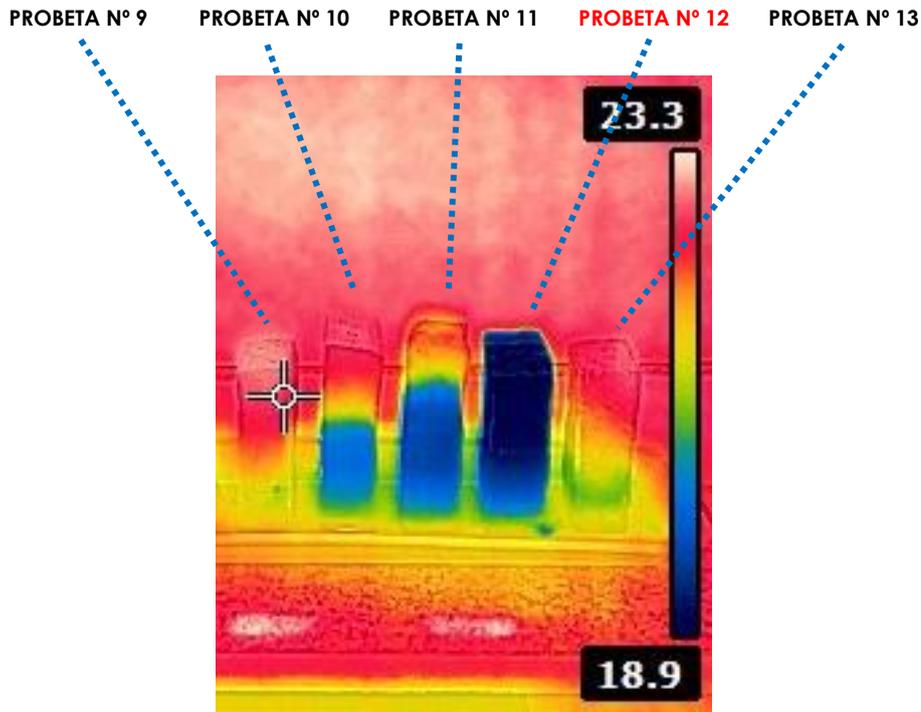


Imagen 136. Imagen termográfica de los ladrillos de tejar procedentes del ensayo 11.1

Respecto de la colocación de los ladrillos procedentes del ensayo 11.1 en este ensayo, pudiera surgir la duda de si los datos son correctos, al estar las probetas apoyadas sobre su canto, posición diferente a la que tienen cuando están colocados en las fábricas. Para ello se realizó el ensayo 3.2 bajo la norma UNE-EN 15801, que concluyó que los valores de tasa de absorción y los incrementos de peso en tanto por ciento son muy similares independientemente de si el ladrillo está colocado sobre su testata, canto o tabla.

#### FASE DE DESORCIÓN

Todas las probetas de argamasa consiguen una desorción del agua casi absoluta a los 4 días, mientras que casi todas las de ladrillo lo consiguen entre los 9 y los 15 días. Con lo que queda claramente demostrado que **la argamasa es mucho más rápida que el ladrillo en el proceso de desorción.**

A la vista de las imágenes de este ensayo se puede comprobar la **heterogeneidad del comportamiento de los ladrillos de tejar**, lo que debe tenerse en cuenta a la hora de sacar

conclusiones sobre el comportamiento de las fábricas ejecutadas con estos materiales. Entendiéndose que más que a los valores puramente numéricos se ha de tender a la interpretación de las tendencias y los comportamientos vistos desde un punto de vista global y por comparación.

Es importante tener en cuenta este aspecto porqué de lo contrario algunos datos concretos y puntuales obtenidos en los múltiples ensayos llevados a cabo, este incluido, pueden dar lugar a interpretaciones erróneas o a suponer que las conclusiones no son del todo correctas.

De entre todas las conclusiones expuestas se puede destacar una como la más importante y más directamente relacionada con una de las hipótesis de partida, y es que, **la argamasa, de los dos materiales que conforman las fábricas, es el que más importancia tiene en la ascensión de la humedad por capilaridad**, en primer lugar por ser aquél por el cual la velocidad de ascensión es más rápida, y segundo, por ser el que está dispuesto sin discontinuidades, generando por lo tanto una vía continua por la que puede desplazarse la humedad sin saltos o interrupciones.

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR  
QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO

## **5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

## 5.1. INTRODUCCIÓN

Los numerosos ensayos realizados han generado un gran volumen de datos que es necesario ordenar y analizar con el fin de poder sacar las conclusiones oportunas. El análisis de esta cantidad de datos, la mayoría de ellos pasados a tablas y gráficos para facilitar su comprensión, ha permitido deducir y corroborar conclusiones que ya se apuntaban en las hipótesis de partida, y otras cuyos resultados han sido distintos a los esperados.

Ha sido muy ilustrativo el análisis comparativo de los datos obtenidos para los distintos materiales utilizados, los ladrillos y las argamasas. Los valores obtenidos para cada uno de ellos sobre las diferentes tasas de absorción, el comportamiento en los diferentes ensayos y la observación de las imágenes obtenidas mediante cámara termográfica y por el microscopio electrónico del Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid (MEB, ver especificaciones en el apartado del instrumental) han permitido deducir aspectos sobre su estructura interna, y su comportamiento ante los procesos de absorción y desorción.

La comparación del comportamiento de los materiales en los distintos ensayos ha proporcionado una idea bien fundamentada sobre la idoneidad de los propios ensayos, los normalizados y los no normalizados, así como de la validez de los datos obtenidos en ellos. Ha sido de suma importancia contrastar los datos deducidos de los ensayos que se han llevado a cabo sobre el ladrillo y la argamasa individualmente con los datos que se han obtenido del comportamiento del agua en dichos materiales cuando formaban parte de las fábricas, sobre todo en el ensayo realizado sobre los cuatro muros (ensayo 10.1). Con ello se ha podido deducir cuales de los datos obtenidos según los ensayos eran realmente válidos y cuales eran poco significativos o poco fiables, al menos para la investigación que se ha llevado a cabo.

Si bien el título de la tesis hace referencia expresa a la influencia de las juntas de argamasa de cal en la humedad capilar, es indispensable, y así se ha podido comprobar a lo largo de la investigación, hacerlo por comparación con el comportamiento de la capilaridad en los ladrillos, y por ende en las fábricas. De modo que son inevitables las referencias constantes al comportamiento de la humedad en los tres tipos de probetas y a los datos obtenidos en ellas.

Con el fin de ordenar la argumentación de los resultados, ésta se ha dividido en los apartados que se exponen a continuación:

- Discusión sobre la idoneidad de los resultados obtenidos del instrumental
- Discusión de resultados sobre el comportamiento de la argamasa
- Discusión de resultados sobre el comportamiento de los ladrillos
- Discusión de resultados sobre el comportamiento de las fábricas

## 5.2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.2.1. DISCUSIÓN SOBRE LA IDONEIDAD DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL INSTRUMENTAL

El instrumental utilizado para el desarrollo de esta tesis ha posibilitado obtener datos sumamente fiables y precisos, que a su vez han permitido deducir conclusiones fiables y veraces. En este apartado de discusión sobre los datos obtenidos del instrumental se intenta dar luz sobre la validez e idoneidad de los mismos.

El instrumental utilizado y los datos generados y obtenidos por él han sido los siguientes:

Instrumento	Datos obtenidos
Sonda termohigrométrica	Humedad Temperatura
Cámara termográfica	Imágenes termográficas
Microscopio	Imágenes
Básculas de precisión	Peso
Cámara climática	Humedad Temperatura
Estación meteorológica	Humedad Temperatura

Tabla 53. Relación del instrumental utilizado

Los primeros datos sobre los que se comienzan a sacar conclusiones son los que se obtienen, al inicio de las investigaciones, de las sondas termohigrométricas (humedad y temperatura), al ser introducidas éstas en perforaciones que se realizaron en ladrillos y probetas de fábrica.



Imagen 137. Imágenes de sonda termohigrométrica y de ésta tomando datos de una probeta.

Posteriormente se comienzan a obtener otros datos relacionados con la absorción de agua por parte de las argamasas de cal, de los ladrillos y de las fábricas, deducidos de los procedimientos definidos en los ensayos de las normas UNE y de los ensayos de diseño propio. Los datos más importantes, que se obtienen por medio de pesadas y mediciones, son: cantidad de agua absorbida por superficie y tiempo, cantidad de agua máxima que pueden llegar a absorber las probetas, altura alcanzada por el frente húmedo en las probetas y tiempos de absorción.

Otros de los datos obtenidos han sido las imágenes obtenidas por medio de la cámara termográfica. En dichas imágenes es fácil apreciar la presencia y el movimiento del agua en las probetas, además de comprobar cómo es su distribución y gradación. Este tipo de cámaras suministran imágenes que muestran las variaciones de temperatura que se generan en la superficie de los objetos, debido a la radiación infrarroja emitida. En nuestro caso la variación de temperatura está provocada por la evaporación del agua en la superficie de las probetas. La evaporación, al ser un proceso endotérmico, enfría el objeto que está sometido a un proceso evaporativo, de modo que las superficies húmedas están más frías que las secas, permitiendo de este modo detectar la presencia de la humedad.

Asimismo las imágenes tomadas por medio del microscopio electrónico (modelo Quanta FEG 250-ESEM) han sido de gran utilidad para comprobar la estructura interna de la argamasa de cal y de los ladrillos y así corroborar algunas de las hipótesis que se intuían al analizar los datos obtenidos en los ensayos.

Comparar y contrastar la información obtenida por los distintos instrumentos utilizados en los diferentes ensayos ha sido fundamental para sacar conclusiones fiables.

### **1. Sobre los datos de las sondas.**

De las sondas termohigrométricas se han obtenido dos datos, humedad en tanto por ciento y temperatura. Todos los datos que se han obtenido son los que la sonda ha medido, bien del ambiente, bien del interior de las perforaciones en donde hemos introducido el extremo del instrumental, lugar donde se ubica el sensor capaz de tomar dichos datos. Una de las primeras cuestiones a la que se tuvo que dar respuesta era la de saber exactamente qué estaba midiendo la sonda en la perforación, si la humedad era la del material de la probeta o la del espacio de la perforación. También se plantearon otras cuestiones como si se podría deducir la cantidad de agua en volumen que tiene la probeta con los datos suministrados por la sonda. A priori, era imposible determinar con exactitud ningún de esos datos.

Para ello se pusieron en marcha ensayos paralelos con el fin de intentar establecer la correlación exacta entre los valores suministrados por la sonda y la cantidad de agua que realmente estaba presente en el entorno del sensor. Sin embargo, aun sin poder sacar datos concretos y cuantificables, si se comenzaron a deducir conclusiones a la vista de los resultados que se iban generando:

- Las sondas utilizadas detectan **cantidades muy pequeñas de agua** en las probetas. El sistema de medir la humedad en perforaciones practicadas en la probeta hace que pequeñas cantidades de agua presente en las mismas, conlleve que las sondas midan valores elevados de humedad.
- La presencia de **cantidades pequeñas** de agua en las probetas, en torno al 20%, hace que las sondas indiquen **valores del 99,9 %** (valor máximo que marcan estos instrumentos), por lo que solamente sirven de referencia las medidas cuando el contenido de agua es relativamente bajo.
- Las sondas no suministran datos significativos hasta que la cantidad de agua en las probetas no es muy baja.
- Las sondas permiten detectar con bastante precisión y fiabilidad la presencia de agua en las probetas y con ello conocer la cota o altura del frente húmedo. De tal modo se puede deducir que las sondas ofrecen una información más **cualitativa** (presencia o no de agua) que cuantitativa (cantidad de agua).
- Una vez llevados a cabo los primeros ensayos, enseguida se vio la necesidad de idear otros que permitiesen comparar los datos de las sondas con los datos obtenidos por pesadas, con el fin de transformar los datos de humedad en tanto por ciento, en datos de cantidad de agua por volumen.

Si bien se ha conseguido establecer una cierta correlación entre los datos de humedad suministrada por las sondas y la cantidad de agua contenida en las probetas, se entiende que es más importante la información cualitativa aportada. Ello ha permitido a lo largo de todo el trabajo realizado detectar la presencia de humedad en las probetas así como el gradiente de humedades.

En las tablas adjuntas se muestra la correlación entre los valores suministrados por las sondas termohigrométricas y la cantidad de agua por volumen en las muestras. Correlación que se ha deducido sobre todo tras la realización de los ensayos: ensayo 7.1 (ensayo sobre probeta de base un asta por un asta por tres hiladas de altura), ensayo 8.1 (ensayo sobre probeta de base la tabla de un ladrillo y tres hiladas de altura), y ensayo 10.1 (ensayo sobre 4 muros).

Cantidad en gramos de agua evaporada (de una total de 4010 gramos)	Porcentaje de agua evaporada respecto del inicial	Dato de humedad en % que marca la sonda	Cantidad de agua en gramos que queda en la probeta por encima del estado de equilibrio	Cantidad de agua que tiene la probeta en l/m <sup>3</sup> por encima del estado de equilibrio
0	0 %	<b>99,9 %</b>	4010	<b>255,0 l/m<sup>3</sup></b>
3720	92 %	<b>99 %</b>	290	<b>18,0 l/m<sup>3</sup></b>
3853	96 %	<b>90 %</b>	157	<b>10,0 l/m<sup>3</sup></b>
3912	97,5 %	<b>80 %</b>	98	<b>6,3 l/m<sup>3</sup></b>
3938	98,2 %	<b>60 %</b>	72	<b>4,6 l/m<sup>3</sup></b>
4008	99,9 %	<b>50 %</b>	2	<b>1,3 l/m<sup>3</sup></b>

**Tabla 54. Datos obtenidos del ensayo 7.1 (ensayo sobre probeta de 1x1 asta con tres hiladas)**

Cantidad en gramos de agua evaporada (de una total de 1436 gramos)	Porcentaje de agua evaporada respecto del inicial	Dato de humedad en % que marca la sonda	Cantidad de agua en gramos que queda en la probeta.	Cantidad de agua que tiene la probeta en l/m <sup>3</sup>
0	0 %	<b>99,9 %</b>	1436	<b>223,6 l/m<sup>3</sup></b>
1394	97,1 %	<b>99 %</b>	42	<b>6,5 l/m<sup>3</sup></b>
1401	97,5 %	<b>90 %</b>	35	<b>5,4 l/m<sup>3</sup></b>
1402	97.6 %	<b>80 %</b>	34	<b>5,3 l/m<sup>3</sup></b>
1405	97.9 %	<b>60 %</b>	31	<b>4,8 l/m<sup>3</sup></b>
1408	98.2 %	<b>50 %</b>	28	<b>4,3 l/m<sup>3</sup></b>

**Tabla 55. Datos obtenidos del ensayo 8.1 (ensayo sobre probeta de tres ladrillos y tres hiladas)**

En estas tablas, cuando hablamos del estado inicial de la probeta, nos referimos a la cantidad de agua que contiene, en las condiciones de laboratorio con una temperatura de unos 20 grados y una humedad en torno al 40-50 %.

También del ensayo de los cuatro muros podemos extraer datos obtenidos de las sondas, que se pueden consultar en el ensayo 10.1, en donde se puede comparar el valor de humedad suministrado por las sondas con la cantidad de agua contenida.

En la tabla siguiente se aportan valores de humedad de ladrillos donde estaban situadas las sondas en el momento del desmontaje. Como se conoce la cantidad de agua de cada uno de los ladrillos, podemos establecer una cierta correlación con los datos de las sondas. Los datos son de los dos muros fabricados con ladrillos de tejar.

Los porcentajes de humedad detectados por las sondas que están reflejados en esta tabla no coinciden exactamente con los de las anteriores. La razón es que los porcentajes seleccionados eran los que marcaban las sondas en el momento del desmontaje, y no coincidían en ese momento con los de las tablas 54 y 55.

Denominación del ladrillo en el ensayo	Dato de humedad en % que marca la sonda	Cantidad de agua que tiene el ladrillo en l/m <sup>3</sup>
Ladrillo 12.2 (1 ½ asta)	99,9 %	132,6 l/m <sup>3</sup>
Ladrillo 8.2 (1 asta)	99,9 %	41,2 l/m <sup>3</sup>
<b>Ladrillo 10.2 (1 ½ asta)</b>	<b>90 %</b>	<b>29,0 l/m<sup>3</sup></b>
Ladrillo 6.2 (1 asta)	57 %	5,0 l/m <sup>3</sup>
Ladrillo 8.2 (1 ½ asta)	52 %	15,0 l/m <sup>3</sup>
Ladrillo 6.2 (1 ½ asta)	44 %	8,2 l/m <sup>3</sup>
Ladrillo 4.2 (1 ½ asta)	42 %	8,6 l/m <sup>3</sup>
Ladrillo 4.2 (1 asta)	40 %	5,5 l/m <sup>3</sup>
Ladrillo 2.2 (1 ½ asta)	39 %	2,2 l/m <sup>3</sup>

Tabla 56. Datos obtenidos del ensayo 10.1 (Ensayo realizado sobre los cuatro muros)

Aunque no existe una correlación exacta, con los valores suministrados por las sondas se puede tener una **estimación aproximada de la cantidad de agua que hay en una zona del muro**. Por ejemplo si analizamos el valor de humedad del 60 % en las tres tablas podemos deducir lo siguiente:

- Tabla 54: 4,6 l/m<sup>3</sup>
- Tabla 55: 4,8 l/m<sup>3</sup>
- Tabla 56: 5,0 l/m<sup>3</sup> (en este caso la sonda marcaba 57%)

Bien es cierto que con otros valores de humedad la distorsión en las cantidades de agua contenidas es mayor.

Con el fin de mostrar la desproporción que hay entre la cantidad de agua contenida y el valor de humedad marcada por las sondas analizamos el dato señalado en negrita de la tabla 56: Un ladrillo de tejar puede llegar a tener una absorción de agua de hasta 290 l/m<sup>3</sup>. En este caso cuando se ha producido una absorción de únicamente el 10% de esta cantidad máxima de agua posible (en nuestro caso 29 l/m<sup>3</sup>), la sonda ya indica el 90% de humedad.

Otro dato a destacar, previsible por otra parte, y que se puede comprobar con los valores obtenidos de las sondas, es que se cumple en todos los casos que a mayor humedad en un muro, menor temperatura tiene. Hecho debido al proceso de evaporación y que está además corroborado con total nitidez por las imágenes suministradas por la cámara termográfica.

También es interesante llegar a cuantificar el dato de la variación de la temperatura en función del grado de humedad. De manera que saltos de humedad en muros como los ensayados pueden provocar variaciones de temperatura de hasta **2 y 3 grados centígrados**. Lo que demuestra que la presencia incontrolada de humedad puede generar, además de problemas importantes de salubridad, constructivos y estéticos, unas pérdidas energéticas en climatización muy considerables.

A continuación se exponen gráficos que muestran los valores de humedad y temperatura detectados por las sondas en las perforaciones realizadas en los muros.

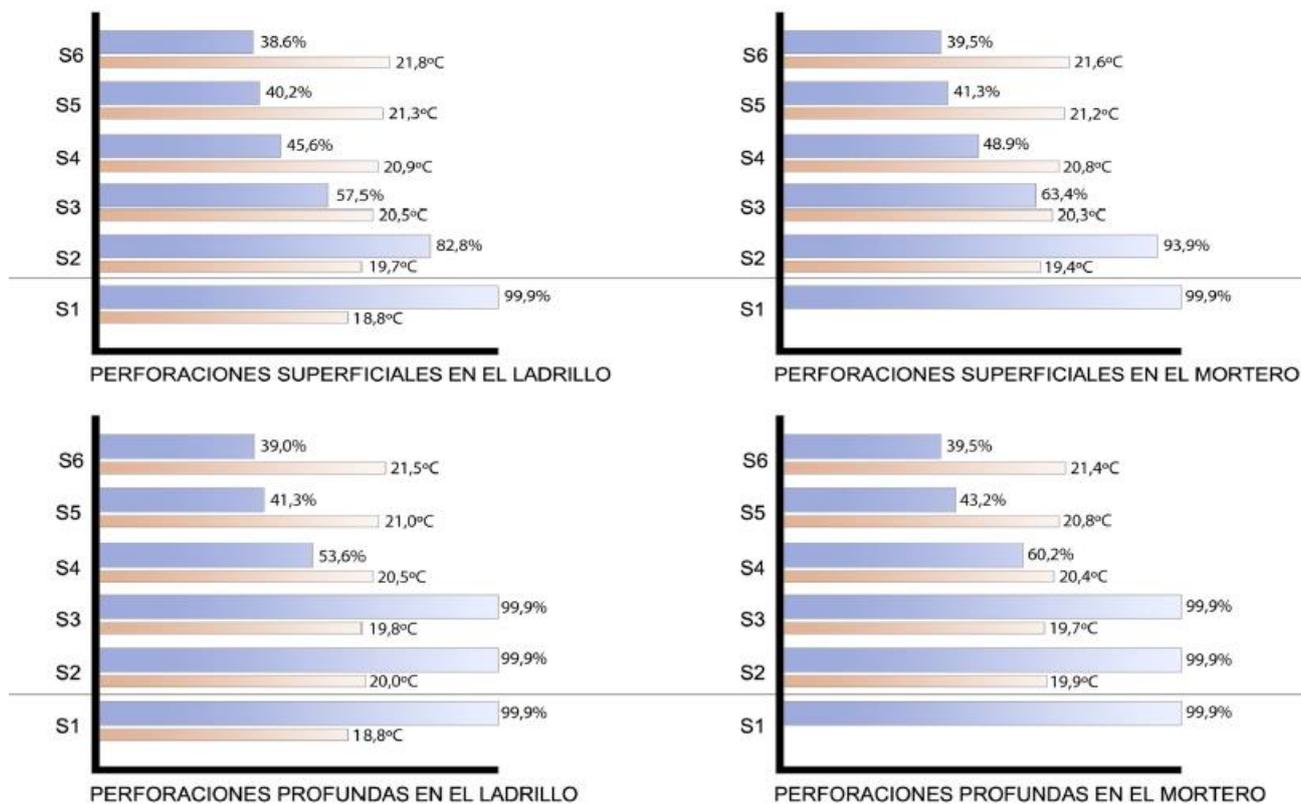


Gráfica 39. Datos en muro de ladrillo de tejar de 1 asta

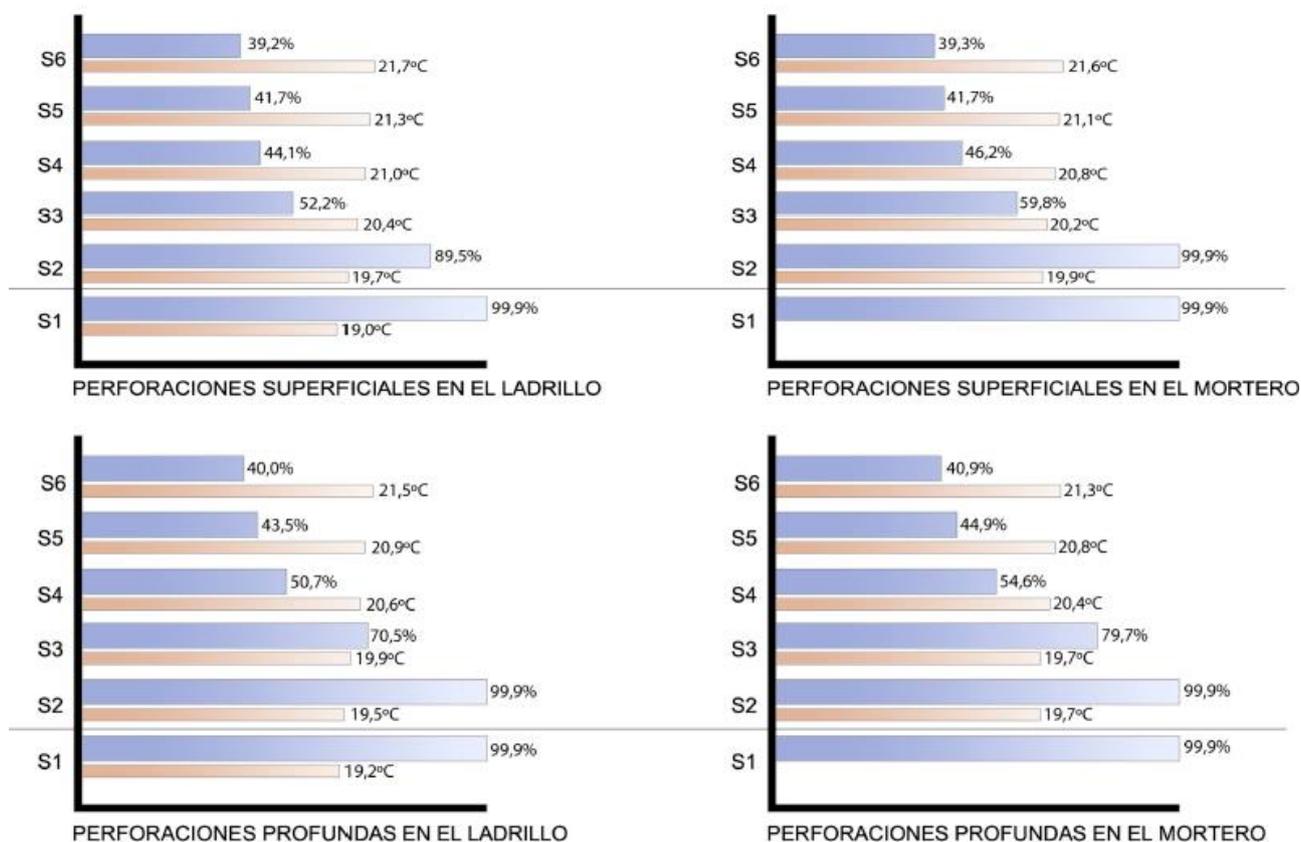


Gráfica 40. Datos en muro de ladrillo moderno de extrusión de 1 asta

INFLUENCIA DE LAS JUNTAS DE ARGAMASA DE CAL EN EL ASCENSO DE HUMEDAD CAPILAR QUE AFECTA A LAS FÁBRICAS DE LADRILLO DE TEJAR ANTIGUO



Gráfica 41. Datos en muro de ladrillo moderno de extrusión de 1 1/2 asta



Gráfica 42. Datos en muro de ladrillo de tejar de 1 1/2 asta

Nota: la línea horizontal continua indica la cota de la hidrofugación.

## 2. Sobre los datos de la cámara termográfica

Los datos obtenidos de la cámara termográfica en forma de imágenes son muy clarificadores a la hora de detectar la presencia de humedad en las fábricas. Sin embargo presentan cierta dificultad para ser tenidos en cuenta como datos cuantitativos. A pesar de ello, y como se puede apreciar en las imágenes que se adjuntan a continuación existe una **correlación bastante aproximada entre variación cromática y contenido de humedad**. Esta posibilidad es de una enorme utilidad y sobre ella se están iniciando líneas de investigación de cara a poder determinar con unas ciertas garantías la cantidad de agua presente en una fábrica a partir del uso de cámaras termográficas.

Si bien esto es tema de una futura investigación, el planteamiento que se propone sería el siguiente: Se tendrían que extraer de la fábrica dos porciones de argamasa o dos ladrillos con cantidades de humedad lo más antagónicas posibles, uno muy seco y otro muy húmedo. Con ellos se graduaría la cámara termográfica y a partir de los datos reflejados por la cámara sobre esas porciones de argamasa o sobre los ladrillos, se podría deducir la cantidad de agua o humedad en el resto de la fábrica una vez deducida por pesadas de las muestras extraídas.

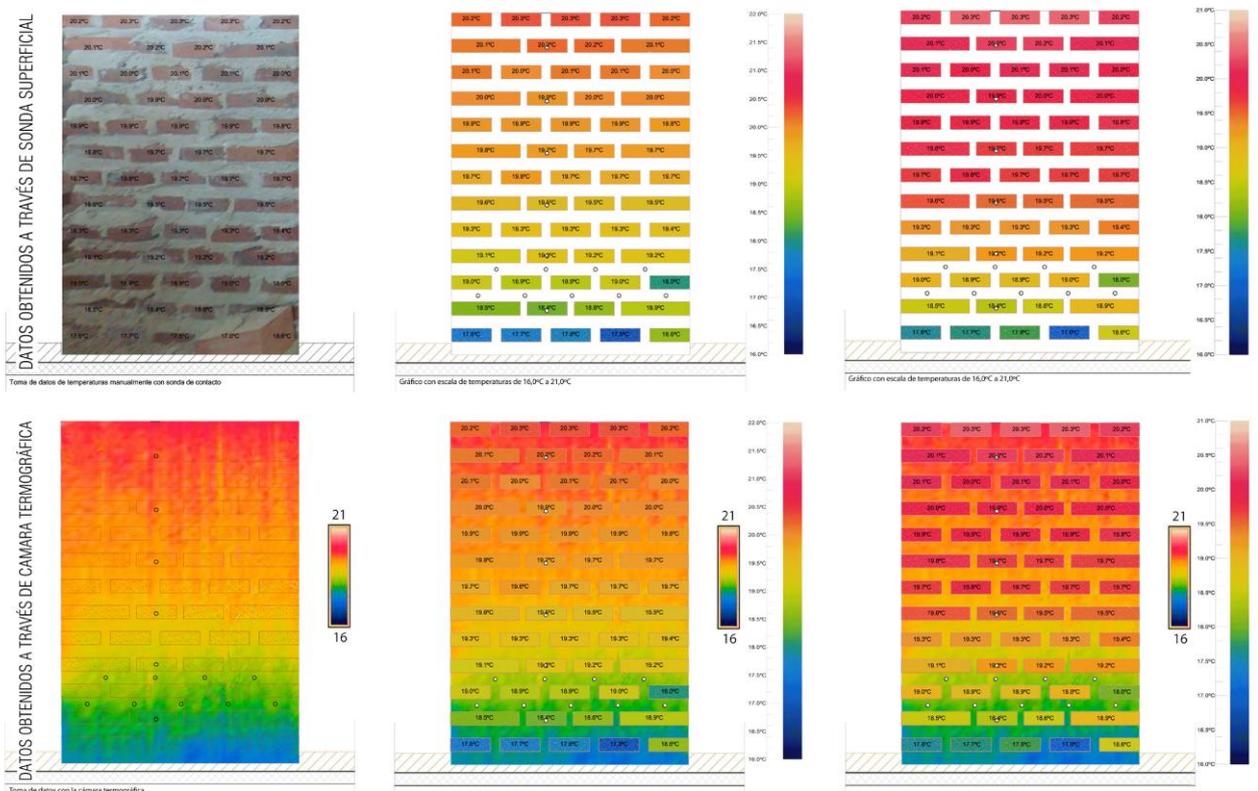


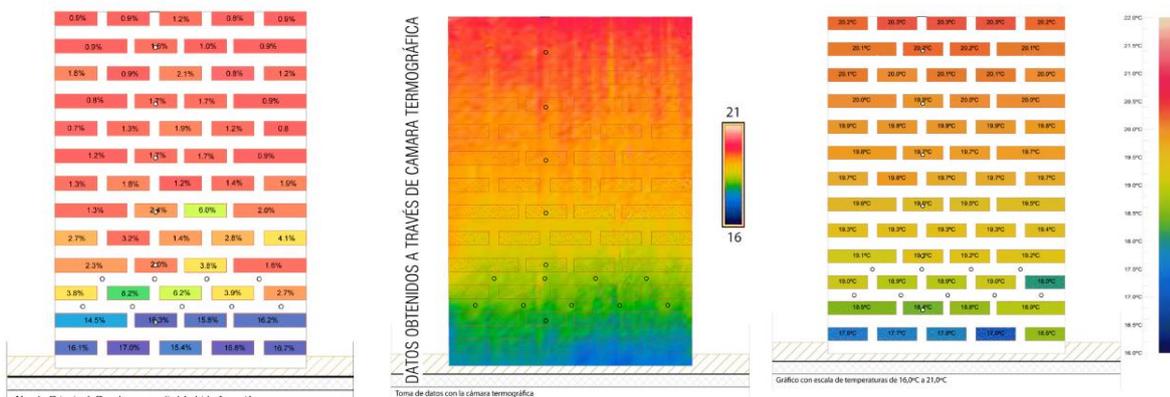
Imagen 138. Imágenes de sonda termohigrométrica y de ésta tomando datos de una probeta.

Los valores numéricos de temperatura se han obtenido mediante sonda de contacto para cada uno de los ladrillos. A ese valor, reflejado numéricamente en cada pieza, se le ha

asignado una graduación de color, lo que se refleja en dos gradaciones diferentes (para las mismas temperaturas) en los dos dibujos de la derecha de la fila superior. En los dos dibujos de la derecha de la fila inferior se han superpuesto estas imágenes superiores con la que se ha tomado por cámara termográfica (que es la que se muestra sin ningún elemento sobrepuesto en la imagen izquierda de la fila inferior), de modo que se puede apreciar que las gradaciones de color, sobre todo en la imagen inferior del centro, son bastante coincidentes. Es decir que los colores asignados a los ladrillos en función de su temperatura son bastante coincidentes con los detectados por la cámara.

Esto confirma la idoneidad e interés de la información obtenida por la cámara termográfica.

En las imágenes que se exponen a continuación se colocan una al lado de otra tres imágenes dispuestas en este orden: a la izquierda, la imagen que muestra con colores la cantidad de agua absorbida por cada uno de los ladrillos que conforman el muro según el incremento de peso, respecto del peso inicial, en porcentaje; en el centro, la imagen tomada por la cámara termográfica; y a la derecha la composición cromática que se deduce de los datos de temperatura de la sonda de contacto. Se ha realizado este montaje gráfico tomando como base el muro de ladrillo moderno de 1 ½ asta.



**Imagen 139. Izquierda: alzado representativo de los incrementos de peso en porcentaje. Centro: imagen termográfica. Derecha: imagen cromática según temperaturas tomadas por la sonda de contacto sobre los ladrillos.**

Aunque la correlación no es exacta se puede establecer un paralelismo bastante aproximado entre las tres informaciones, de modo que ajustando los valores extremos de la cámara termográfica sobre dos porciones de argamasa o dos ladrillos de los que se pudiese conocer su estado de humedad, se podrían deducir los valores hídricos del resto, mediante la imagen obtenida por la cámara.

## 5.2.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA ARGAMASA

A modo de introducción sobre el comportamiento de la argamasa de cal en las fábricas antiguas, podemos decir que el elemento más deteriorado suele ser precisamente las juntas de argamasa, mientras que los ladrillos sufren un deterioro menor porque *“en la argamasa de las juntas se produce la mayor evaporación de la humedad ocasionando depósitos de sales que con el tiempo ocasionan la disgregación superficial de los morteros de las juntas”*<sup>88</sup>. De esta forma las juntas de argamasa se desmoronaban pero el ladrillo permanecía entero, se volvían a rejuntar las fábricas y se repetía el proceso. Por este motivo, algunos estudios realizados sobre fábricas de ladrillo de tejar y argamasas de cal que estudian la composición de la argamasa, han encontrado proporciones de árido silíceo del orden del 76,4%, que presentan una elevada porosidad de hasta el 36% en volumen, con una densidad de alrededor de 1,6 gr/ml<sup>89</sup>. Valores que por otra parte son bastante coincidentes con los obtenidos en esta investigación y que se muestran en el ensayo 6.1.

La argamasa, mezcla de cal, arena y agua, ha sido ensayada en probetas con tres tipos de proporciones 1:2, 1:3 y 1:4, con el fin de comprobar como influía el porcentaje de la mezcla en el comportamiento del agua sobre la argamasa. De estos ensayos se observan comportamientos diferentes según las proporciones utilizadas.

Sin embargo para los ensayos realizados sobre probetas de fábrica (ensayos: 7.1, 8.1, 9.1, 10.1, 11.1, 12.1, 13.1 y 14.1), se optó por la mezcla 1:3, ante la imposibilidad de realizar toda la casuística de muros y/o fábricas con diferentes tipos de mezcla, y por ser esta mezcla, la de proporción 1:3, la que al parecer se usaba con más frecuencia en las obras de fábricas antiguas, como ya se comentó en el capítulo correspondiente.

Los ensayos realizados a la argamasa han sido hechos sobre tres tipos diferentes de probetas, dos de ellas normalizadas de dimensiones 160x40x40 mm, y de 40x40x40 mm; y otras probetas, que han sido porciones de argamasa recogidas, por un lado del desmontaje

---

<sup>88</sup> IGLESIAS, M.C. : Análisis de la variación de la composición de los morteros utilizados en los muros de fábrica tradicionales: compatibilidad de los morteros tradicionales de cal y la incompatibilidad de los morteros de cemento en funcionamiento constructivo y estructural de los muros de fábrica tradicionales, *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid*, Ed Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 1996.

<sup>89</sup> MARTÍNEZ E., CASTILLO, A., MARTÍNEZ I., CASTELLOTE M.: Metodología para la intervención de elementos históricos: el caso de la espadaña del convento de Nuestra Señora de la Consolación (Alcalá de Henares-Madrid-España), *Informes de la Construcción*, Vol 65 (2013) 359-399, doi:10.3989/ic.12.005

<sup>90</sup> LLORENTE, A., CAMINO, S., LEÓN, J., OLIVAR JM. *Contribución de los morteros de cal y arena en el proceso de absorción de agua por capilaridad de las fábricas de ladrillo antiguas*. 9<sup>th</sup> International Masonry Conference 2014 in Guimarães

de las llagas y los tendeles del ensayo de los cuatro muros (ensayo 10.1) y porciones de argamasas de cal procedentes del derribo de muros de edificios antiguos existentes.



**Imagen 140. Probetas de argamasa. Arriba: Porciones de argamasa del desmontaje de los 4 muros del ensayo 10.1 y probetas normalizadas de 160x40x40 mm. Abajo: probetas normalizadas de 40x40x40 mm y porciones de argamasa procedentes del derribo de muros de edificaciones antiguas.**

En el ensayo realizado sobre los cuatro muros de fábrica, uno de cuyos fines era analizar la eficacia de las barreras hidrófugas, se consideró que al ser el conjunto formado por las llagas y los tendeles de argamasa una retícula continua homogénea, sería ésta la parte de la fábrica donde mejor se podía generar una barrera continua. De modo que se optó por inyectar dicho producto en dos tendeles ubicados en la base de los muros de las fábricas. Inyección que se realizó siguiendo las instrucciones de la casa comercial, en perforaciones al tresbolillo, con una separación máxima entre perforaciones de 10 cm, y en dos tendeles consecutivos situados uno encima del otro. Si bien es cierto que como las perforaciones debían de hacerse con una cierta inclinación, y como bien se pudo comprobar durante el proceso de desmontaje, la parte final de la perforación llegaba en algunos casos a rozar superficialmente la tabla de algunos de los ladrillos.

Los ensayos realizados a las probetas de argamasa han sido los siguientes:

- UNE-EN 772-11:2001. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.
- UNE-EN 15801. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.
- UNE-EN 67027-84. Determinación de la absorción de agua.
- UNE-EN 1015-18. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.
- Ensayos en cámara climática. Ensayos con cámara climática para comprobar la absorción de agua tomada del aire del ambiente.
- Ensayo sobre 4 muros. Ensayos sobre pesadas realizadas a porciones de argamasa, de llagas y tendeles, procedentes del desmontaje del ensayo de los 4 muros de fábrica.
- Ensayos sobre porciones de argamasas procedentes de muros de edificios antiguos.

Los datos obtenidos de los ensayos se muestran resumidos en la siguiente tabla:

Ensayo Datos	UNE-EN 772-11	UNE-EN 15801	UNE-EN 67027-84	UNE-EN 1015-18	Ensayo cámara climática	Ensayo sobre 4 muros
1:2	1,9 kg/m <sup>2</sup> min	14,09 % 249 l/m <sup>3</sup>	12,58 % 221,4 l/m <sup>3</sup>	1,37 kg/m <sup>2</sup> min		
1:3	1,1 kg/m <sup>2</sup> min	12,06 % 213 l/m <sup>3</sup>	11,29 % 205,1 l/m <sup>3</sup>	1,22 kg/m <sup>2</sup> min	0,4 - 1,3 %	10,41 % 13,60 %
1:4	0,8 kg/m <sup>2</sup> min	11,51 % 199 l/m <sup>3</sup>	9,21 % 171,1 l/m <sup>3</sup>	1,15 kg/m <sup>2</sup> min		

**Tabla 57. Tabla resumen de los valores obtenidos para los ensayos realizados en argamasas**

Tras la realización de los ensayos se pudo deducir que en el comportamiento de este material influyen muchos factores, de los cuales los más significativos según lo observado en los ensayos son:

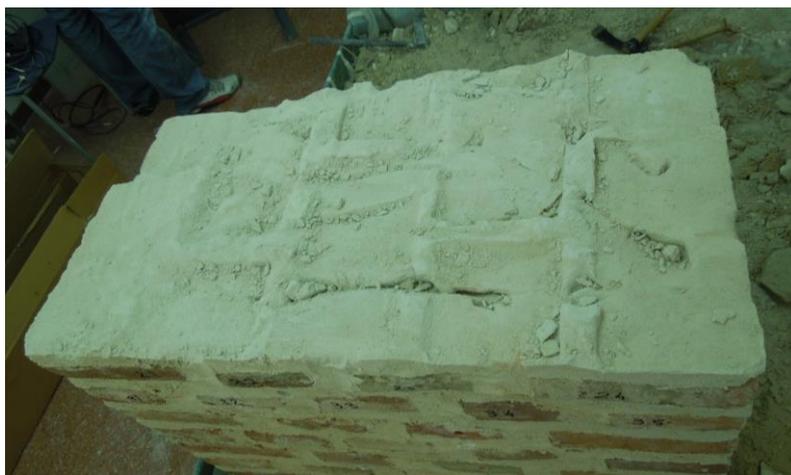
- El porcentaje de cada uno de los materiales en las mezclas
- El proceso de amasado de la mezcla
- El proceso de compactado que se produce durante la puesta en obra
- El tiempo de fraguado
- Las condiciones ambientales
- La propia puesta en obra

Estos factores pueden variar el comportamiento de la argamasa ante la presencia del agua y modificar las tasas de absorción, los procesos de capilaridad y el grado de

impermeabilidad.

Hay que tener en cuenta que estamos ante un material, la argamasa de cal, cuya ejecución tiene un alto componente de elaboración manual, y por lo tanto de aleatoriedad. En un intento de reproducir con la mayor fidelidad posible la ejecución de las fábricas antiguas, la ejecución de los cuatro muros (ensayo 10.1) fue llevada a cabo por un albañil con amplia experiencia en el campo de la construcción, en concreto de la zona de donde se tomaron los ladrillos utilizados en los ensayos.

Durante el proceso del desmontaje de estos muros, se pudo comprobar como llagas y tendeles presentaban algunas irregularidades propias de un proceso de ejecución manual, como pueden ser pequeñas fisuras, zonas sin masa, oquedades de pequeño tamaño, etc., que pueden dar lugar a algunas discontinuidades en la fábrica. Bien es cierto que en este proceso del desmontaje, se pudo apreciar que en general casi todas las llagas y los tendeles presentaban un aspecto bastante uniforme, con escasas coqueras u oquedades y con apariencia de que el asentamiento de los ladrillos era el correcto.



**Imagen 141. Detalle de un tendel de argamasa en el proceso de desmontaje de los 4 muros**

Es necesario hacer esta puntualización para entender que muchos de los datos y de las gráficas, y por tanto de las conclusiones obtenidas, han de ser analizadas dentro de un marco de comparación con los resultados de otros ensayos y no como unos valores aislados del contexto en el que se han producido todas las actuaciones de esta investigación, ya que se está analizando el comportamiento de unos materiales, el ladrillo y la argamasa, elaborados con un bajo control de calidad, sujetos a muchas casuísticas, y que a su vez se unen para formar un conjunto, la fábrica, quizás más heterogéneo y aún menos controlado que el proceso de elaboración de los propios materiales.

Los ensayos realizados según la norma **UNE-EN 67027-84** (Determinación de la absorción de agua, normativa derogada), han generado unos resultados muy interesantes sobre la

cantidad de agua que es capaz de absorber la argamasa. Es un ensayo realizado con 18 probetas de argamasa, con tres tipos de mezclas, 1:2, 1:3 y 1:4 (cal/arena). Los datos indican que **las probetas con una mayor proporción de cal en la mezcla, son capaces de absorber mayor cantidad de agua**. Este resultado en principio parece lógico, ya que el sitio ocupado por el árido es un espacio donde se puede almacenar una cantidad muy reducida de agua, mucho inferior al agua que puede albergar la cal. Son datos cuyas conclusiones coinciden con los que se obtienen del ensayo de la norma **UNE-EN 15801**.

Los valores obtenidos de este ensayo son los siguientes:

PROPORCIÓN DE LAS MEZCLAS	UNE 67027-84	Volumen de agua
1:2	<b>12,58 %</b>	<b>221,44 l/m<sup>3</sup></b>
1:3	<b>11,29 %</b>	<b>205,15 l/m<sup>3</sup></b>
1:4	<b>9,21 %</b>	<b>171,13 l/m<sup>3</sup></b>

Si lo comparamos con los datos obtenidos del desmontaje de los trozos de argamasa en el **ensayo de los cuatro muros**, veremos que los datos son casi coincidentes. Los valores de la absorción de los trozos de argamasa de la hilada inferior son, en el muro de ladrillo rústico de **13,60 %** y en el muro de ladrillo moderno de **10,41 %**. De este ensayo podemos concluir que es, al igual de lo que pasa con el ladrillo, el ensayo que más se aproxima a la realidad de lo que ocurre en las hiladas inferiores de los muros, y por lo tanto de la realidad de los edificios construidos.

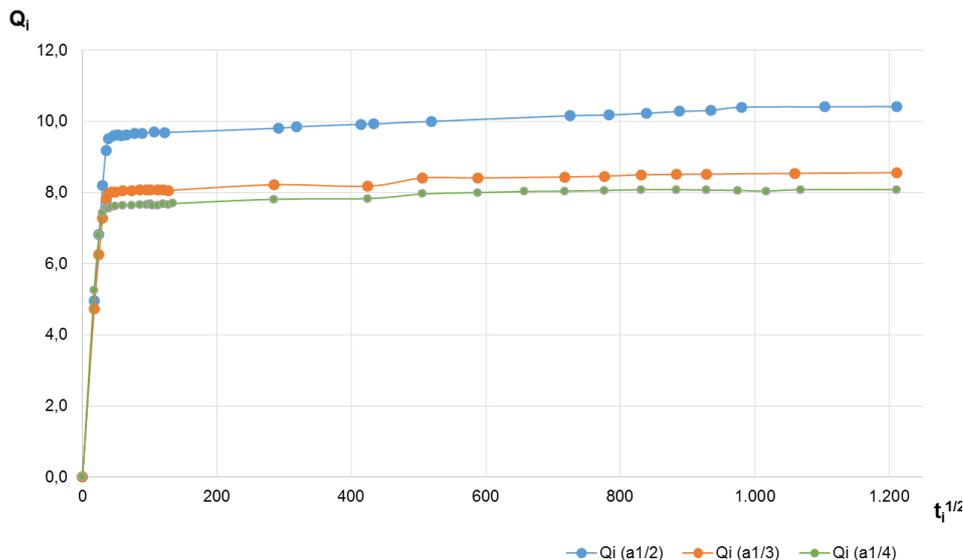
Si analizamos el ensayo **UNE-EN 1015-18**, se puede deducir que, en principio, la argamasa que más rápidamente permite el paso del agua a su través por capilaridad es la que tiene la proporción 1:2, es decir **a mayor proporción de cal, mayor velocidad de absorción de agua**. En comparación con el ladrillo de tejar podría parecer que la argamasa hace de "barrera", ya que el valor de **1,22 kg/m<sup>2</sup>min** (dato para la argamasa de mezcla 1:3), es mucho más bajo que el dato de **1,60 y 1,78 kg/m<sup>2</sup>min**, que son los datos obtenidos para los ladrillos de tejar ensayados. Sin embargo en el caso de los muros con ladrillo moderno ocurre exactamente lo contrario ya el valor obtenido para estas piezas es de **0,9 kg/m<sup>2</sup>min**. Pero esto no es exactamente así ya que, **aunque la cantidad de agua absorbida por unidad de superficie y de tiempo es mayor en los ladrillos de tejar que en las argamasas, al poder albergar más volumen de agua los ladrillos que las argamasas, el agua sube con mayor velocidad por ellas que por los ladrillos**.

Los datos obtenidos en este ensayo permiten deducir conclusiones que coinciden con las que se obtienen del ensayo de la norma **UNE-EN 772-11** como se puede comprobar en la siguiente tabla, donde se puede ver la concordancia entre los valores obtenidos en ambos ensayos.

Ensayo Datos	UNE-EN 772-11	UNE-EN 1015-18
1:2	1,9 kg/m <sup>2</sup> min	1,36 kg/m <sup>2</sup> min
1:3	1,1 kg/m <sup>2</sup> min	1,22 kg/m <sup>2</sup> min
1:4	0,8 kg/m <sup>2</sup> min	1,15 kg/m <sup>2</sup> min

**Tabla 58. Tabla comparativa de los ensayos realizados bajo las normas UNE-EN 772-11 y UNE-EN 1015-18 en argamasas**

La siguiente gráfica, resultado del ensayo realizado según la norma **UNE-EN 15801**, muestra como es la velocidad de absorción de agua en peso por unidad de superficie y de tiempo. Se puede comprobar que los inicios son prácticamente idénticos para los tres tipos de proporción de la mezcla, con ligeras diferencias en las pendientes iniciales, como se puede comprobar en la gráfica 2 del ensayo 3.1. Si bien es la mezcla 1:2 la que puede contener más volumen de agua en su interior.



**Gráfica 43. Gráfico de la absorción de agua en peso y por unidad de superficie de probetas de argamasa**

Con las probetas de argamasa procedentes del desmontaje de los muros del ensayo 10.1, el de los cuatro muros, se llevaron a cabo varios ensayos realizados con la **cámara climática** (Ver ensayo 15.1) con el fin de comprobar cuál era la cantidad de agua que la argamasa

era capaz de absorber de la humedad ambiente. De estos ensayos se sacaron los siguientes datos:

Denominación porción de argamasa	M.6.1	M.10.1	M.5.1.	M.11.3	M.6.2	M.5.2	T.6	T.4	T.4.1
Incremento de peso	0,71%	1,29%	0,54%	1,13%	0,64%	0,68%	0,63%	0,44%	0,94%

**Tabla 59. Tabla de valores de incremento de peso en % para porciones de argamasa recuperadas del ensayo 10.1**

De este ensayo, cuyo valor medio es de **0,78 %**, podemos deducir que la aportación de agua del medio ambiente, al igual que ocurre con los ladrillos, es baja. Es decir, que las condiciones ambientales pueden acelerar o retrasar los procesos de evaporación, pero aportan una cantidad poco significativa de agua a las fábricas.

Los datos del ensayo 6.1, son muy interesantes, y aportan como conclusión muy relevante que las densidades de la argamasa son prácticamente iguales sea cual sea la proporción de la mezcla. Estando en torno a valores de **1.850 kg/m<sup>3</sup>**, para argamasas compactadas. Sin embargo las argamasas no compactadas, las puestas directamente en obra, que en nuestro caso son las procedentes de ensayos y de edificios existentes, tienen valores en torno a los **1.700 kg/m<sup>3</sup>**. El valor de la porosidad abierta, sin embargo varía sustancialmente, de manera que a mayor proporción de cal en la mezcla el valor de la porosidad abierta es significativamente mayor. Para las proporciones de mezclas 1:2 dicho valor es del **21,99 %**, para las mezclas 1:3 es del **19,51%** y para las mezclas 1:4 es del **16,62 %**. Mientras que para las argamasas no compactadas, estos valores suben hasta el **22,40 %** y el **27,26 %** de valor de porosidad abierta.

Como resumen de los datos obtenidos de los ensayos y de la observación de la tabla resumen, podemos concluir que:

- Las argamasas de cal **absorben más cantidad de agua cuanto mayor es la proporción de cal** que contienen en la mezcla.
- Las argamasas de cal **absorben, por capilaridad desde la base, agua con mayor rapidez cuanto mayor es la proporción de cal** que contienen en la mezcla.
- Las argamasas de cal **reciben del ambiente una cantidad de agua poco significativa** respecto de la que se absorbe por capilaridad.
- Las argamasas de cal tienen **valores de porosidad abierta mucho más elevados cuanto mayor es la proporción de cal** que contiene la mezcla.
- La **compactación** o no de las mezclas influye notablemente tanto en la densidad aparente seca, como en la porosidad aparente. A mayor compactación mayor

densidad y menor porosidad.

- En relación con el ladrillo, la argamasa tiene:
  - Unas tasas de **absorción inicial de agua más bajas** que los del ladrillo de tejar, pero más altas que los de los ladrillos de ejecución moderna, para las argamasas de proporción en la mezcla 1:3.
  - Unos procesos de **desorción más rápidos** que los del ladrillo (ver ensayo 16.1).
  - Unas velocidades de **ascensión de la humedad capilar más rápidas** que las que se producen en los ladrillos (ver ensayo 16.1).

Como resumen de todo lo expuesto en este capítulo, y en referencia a las hipótesis de partida, podemos concluir como hecho más importante que **las argamasas de cal acumulan menos cantidad de agua que los ladrillos, pero que la velocidad de ascensión de la humedad capilar es superior en ellas.**

### 5.2.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LOS LADRILLOS

Una de las primeras aproximaciones que se llevaron a cabo sobre los ladrillos fue la de observar a simple vista su apariencia externa y la estructura interna. Estas observaciones se hicieron, en el caso de los ladrillos, mediante la recogida de un número significativo de tipos de ladrillos de tejar antiguos, y otros de manufactura moderna. Se procedió al cortado de algunos de ellos mediante sierra de disco circular con el fin de poder apreciar, primero a simple vista y luego mediante microscopio, la estructura interna. Como era predecible y así se puede observar en las imágenes de los ladrillos en los capítulos correspondientes, éstos presentan características diferentes, apreciables a simple vista.

<b>Ladrillo macizo de tejar antiguo elaborado manualmente</b>	<b>Ladrillo macizo de ejecución moderna fabricado por extrusión</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaboración manual</li> <li>• Variaciones significativas en las dimensiones de las piezas</li> <li>• Presencia de caras con alabeos</li> <li>• Heterogeneidad en la disposición de los componentes</li> <li>• Disposición irregular de huecos y/o poros</li> <li>• Presencia de oquedades superiores a 1 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaboración por extrusión</li> <li>• Homogeneidad en las dimensiones</li> <li>• Caras de las piezas prácticamente planas</li> <li>• Homogeneidad en la disposición de los componentes</li> <li>• Homogeneidad en la disposición de los poros</li> <li>• Oquedades casi imperceptibles a simple vista</li> </ul>

Se muestran en la tabla adjunta los datos obtenidos en los diferentes ensayos a los que se han sometido los ladrillos.

<b>Ensayo</b>	<b>UNE-EN 772-11</b>	<b>UNE-EN 772-7</b>	<b>UNE-EN 15801</b>	<b>UNE 67027-84</b>	<b>Ensayo cámara climát.</b>	<b>Ensayo sobre 4 muros</b>
Ladrillo de tejar antiguo	1,6 kg/m <sup>2</sup> min	18,36 %	13,90 – 14,80 % 276 l/m <sup>3</sup> / 59,0 kg/m <sup>2</sup>	15,60 % 269 l/m <sup>3</sup>	4 %	15,12 %
Ladrillo de fabricación moderna	0,9 kg/m <sup>2</sup> min	14,32 %	15,00 – 15,97 % 289 l/m <sup>3</sup> / 72,8 kg/m <sup>2</sup>	13,40 % 245 l/m <sup>3</sup>	6 %	17,11 %

**Tabla 60. Tabla resumen de los valores obtenidos para los ensayos realizados en ladrillos**

A la vista de los ensayos realizados a los ladrillos se puede extraer una primera conclusión, y es que el comportamiento que tienen los dos tipos de ladrillos es distinto en función de si se produce o no evaporación durante la realización de los ensayos. Esta consideración es válida para aquellos ensayos que tienen un periodo de ejecución prolongado en el tiempo.

De la observación de los datos obtenidos de los ensayos se puede afirmar que, en todos aquellos en los que se produce evaporación durante el proceso, los valores de incremento de peso o de cantidad de agua absorbida son superiores en los ladrillos de ejecución moderna que en los ladrillos de tejar. Ello es debido a la mayor facilidad que tiene este último ladrillo para evaporar la humedad contenida en su interior.

A continuación se exponen cada uno de los diferentes ensayos que se han llevado a cabo con los dos tipos de ladrillos elegidos.

Uno de los ensayos se ha llevado a cabo según los procedimientos establecidos en la norma **UNE-EN 772-11**. Se trata de conocer la tasa inicial de absorción. Para ello las probetas se colocan en contacto con el agua por la tabla del ladrillo durante 1 minuto. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Para los ladrillos de tejar el valor obtenido fue de  $c_{wi,s} = 1,6 \text{ [kg/m}^2 \text{ x min)]}$  [t = 1 min]

Con:  $m_{so,s} = 3.240,1 \text{ gr}$  y  $m_{seco,s} = 3.177,4 \text{ gr}$

Para los ladrillos modernos el valor obtenido fue de  $c_{wi,s} = 0,9 \text{ [kg/m}^2 \text{ x min)]}$  [t = 1 min]

Con:  $m_{so,s} = 1.798,9 \text{ gr}$  y  $m_{seco,s} = 1.755,5 \text{ gr}$

Los valores obtenidos por el ladrillo de tejar prácticamente doblan a los del otro ladrillo. Pero de la misma manera que se produce más rápidamente la absorción, también se produce más rápidamente la desorción. Hecho este que explica, como ya se ha comentado, el diferente comportamiento de ambos ladrillos en función de si en el ensayo se produce o no evaporación y que en principio tiene que ver con la presencia de poros más voluminosos en los ladrillos de tejar que en los otros ladrillos.

Otro de los ensayos se llevó a cabo según la norma **UNE-EN 772-7**. Una vez realizado este ensayo, que consiste en medir el incremento en peso de las probetas sumergidas en agua hirviendo, obtenidos los valores de las masas secas y saturadas se obtienen los siguientes resultados:

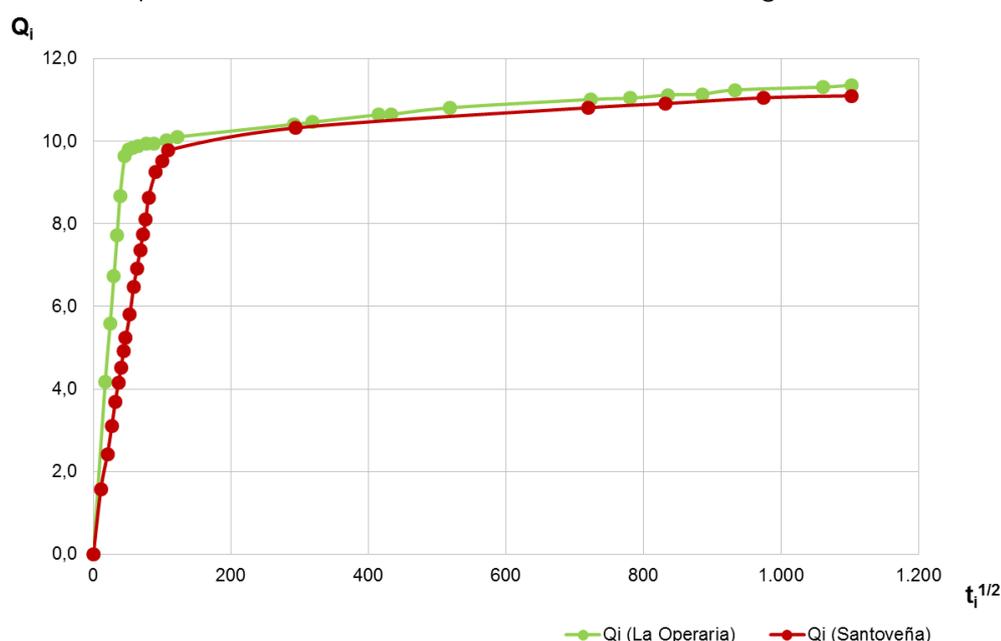
Para los ladrillos de tejar el valor medio de las probetas ensayadas fue de  **$W_s = 18,36\%$** .

Para ladrillos macizos modernos el valor medio de las probetas ensayadas fue de  **$W_s = 14,32\%$** .

Al no existir evaporación en este ensayo los valores obtenidos por el ladrillo de tejar son

superiores a los de los ladrillos de fabricación moderna.

El ensayo desarrollado según la norma **UNE-EN 15801** es un ensayo de absorción que se hace apoyando sobre un lecho húmedo los dos tipos de ladrillos ya descritos. En la gráfica siguiente se ha representado el valor  $Q_i$  medio (en unidades de  $\text{kg}/\text{m}^2$ ) de las probetas cúbicas de ladrillo en función de  $t_i^{1/2}$  sg. Se puede apreciar que, en general, las líneas transcurren bastante similares en su trazado. En el origen del ensayo el ladrillo de tejar supera en sus valores al de ejecución moderna, si bien, según se va desarrollando el ensayo los valores de ambos tipos de ladrillos se van acercando entre sí, sin llegar a coincidir del todo.



**Gráfica 44. Representa la curva de absorción de agua por capilaridad de las probetas cúbicas**  
El eje horizontal es el tiempo  $t_i^{1/2}$ . El eje vertical es el valor de  $Q_i$

Otro de los ensayos está realizado según la Norma **UNE-EN 67027-84**, en el cual las probetas están sumergidas en agua fría (ensayo sin evaporación posible en las probetas) un tiempo indefinido hasta que el incremento de peso se estabiliza. Se han obtenido los siguientes valores:

- Para los ladrillos de tejar el valor medio de las probetas ensayadas es de  **$W_m = 15,6 \%$** . Con unas cantidades de agua almacenada cercanas a los  $270 \text{ l}/\text{m}^3$ .
- Para los ladrillos de fabricación moderna el valor medio de las probetas ensayadas es de  **$W_m = 13,4 \%$** . Con unas cantidades de agua almacenada en torno a los  $250 \text{ l}/\text{m}^3$ .

Respecto de los valores que se acaban de mostrar hay que apuntar el hecho, ya comentado a lo largo de esta tesis, que estos presentan una horquilla significativamente más amplia de lo que ocurre con los valores que se obtienen para las argamasas.

Se puede observar que para este ensayo el ladrillo de tejar antiguo tiene más incremento de

peso que el ladrillo moderno.

Del ensayo que se llevó a cabo sobre los cuatro muros de fábrica (ensayo 10.1) se tomaron datos de los ladrillos de ambos tipos situados en las hiladas inferiores. Estos datos se compararon con los que se habían obtenido en los diferentes ensayos con el fin de comprobar, por un lado si los valores obtenidos eran coherentes, y por otro lado para saber cuál o cuáles eran los ensayos que mejor podían predecir el comportamiento real de los ladrillos<sup>91</sup>.

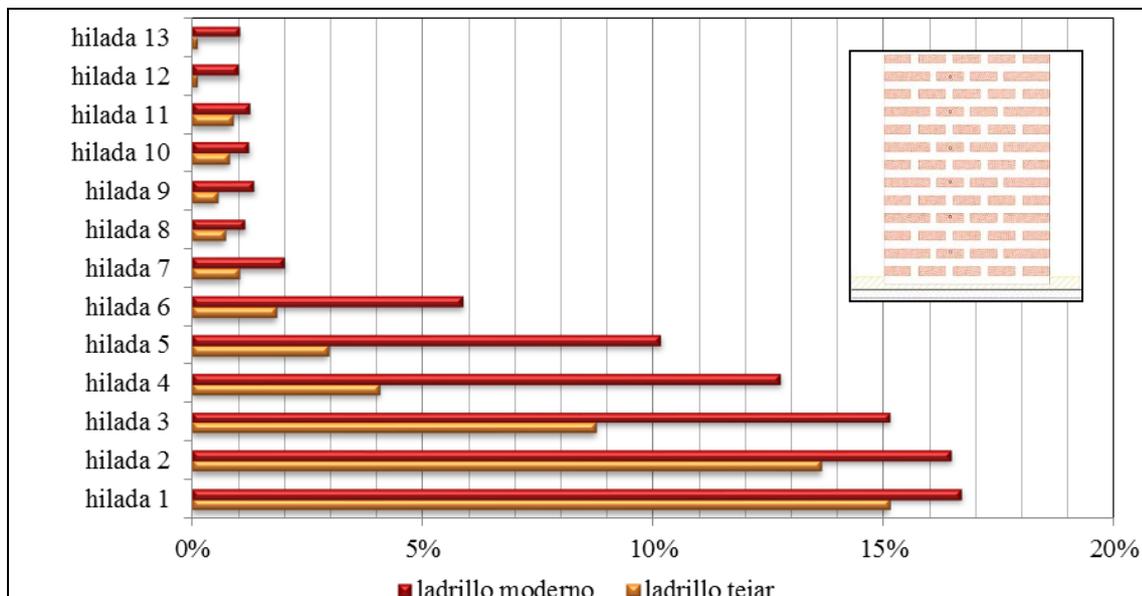


Imagen 142. Muro de ladrillo de tejar con las sondas sobre la base de arena.



Imagen 143. Desmontaje del muro con los ladrillos numerados.

En el gráfico siguiente se han representado los valores medios de humedad relativa por hiladas de los dos tipos de ladrillo. La hilada inferior, más próxima a la base de arena saturada de agua es la número 1 y la hilada superior es la número 13.



Gráfica 45. Gráfico que muestra los incrementos de peso en % en el ensayo 10.1 por hiladas y por tipo de ladrillo<sup>92</sup>

<sup>91</sup> CAMINO, M.S., LEÓN, F.J., LLORENTE, A., OLIVAR, J.M. Propuesta de ensayo para evaluar las barreras químicas para evitar la subida del agua del terreno en fábricas. *Actas del 4º Congreso de patología y rehabilitación de edificios. PATORREB 2012*, Santiago de Compostela, abril 2012.

<sup>92</sup> Olea, M. S. C., Vallejo, F. J. L., Álvarez, A. L., & Parra, J. M. O. (2014). Análisis de los resultados de determinación de la absorción por capilaridad de ladrillos macizos según diversos ensayos. In *Congreso Latinoamericano sobre*

Este ensayo reproduce una situación bastante similar a la que acontece en los muros reales. En lo relativo a la evaporación se observa claramente que, al existir este fenómeno en este ensayo, los valores de un ladrillo superan a los del otro. En las hiladas inferiores, donde menos evaporación se produce y donde la humedad es mayor por la evaporación del agua de la capa de arena saturada, la diferencia entre estos valores es menor. En las intermedias, donde el aporte de agua por capilaridad es más escaso la dispersión es mucho mayor, ya que la evaporación influye mucho más. Y en las superiores donde casi no hay aporte de agua los valores son casi coincidentes ya que la presencia de agua es casi insignificante.

De todo lo expuesto anteriormente se puede deducir lo siguiente:

Con los ensayos realizados según las normas UNE-EN 15801 y 772-11 se pretende conocer la cantidad de agua que pueden absorber las probetas de ladrillo principalmente por el mecanismo de la succión capilar cuando solo una parte de la pieza está sumergida parcialmente, o simplemente por estar en contacto con una base húmeda. Es el mismo fenómeno que tiene lugar en las situaciones de los edificios existente en los que el agua asciende por capilaridad desde el terreno a través de cimientos muy permeables.

Por el contrario, en el ensayo UNE-EN 67027-84, de absorción por inmersión total de la pieza en agua fría, y en el ensayo UNE-EN 772-7 inmersión en agua hirviendo, se ofrecen los datos de la cantidad máxima de agua que pueden captar los ladrillos principalmente por el mecanismo de la absorción debida a la presión hidrostática, por la cual el agua penetra por todas sus caras en todos los poros accesibles, pero sobre todo en los mayores (de más calibre).

Como resumen de los datos obtenidos de los ensayos, de la observación de la tabla resumen y de todo lo expuesto anteriormente podemos concluir que:

- En general, los valores obtenidos en los ensayos no tienen una dispersión muy grande si comparamos los dos tipos de ladrillos. **El ladrillo de tejar antiguo absorbe algo más de agua** en todos los ensayos de inmersión, en los que no hay evaporación. Las razones son dos, por una parte su mayor porosidad aparente (ver ensayo 6.1) fruto del proceso de compactación de la pieza arcillosa antes de su cochura; y por otra su estructura porosa, que es distinta, con preponderancia de los poros gruesos, sobre los capilares, al contrario de lo que sucede con el ladrillo moderno.
- Se aprecia una mayor **homogeneidad** en los **ladrillos modernos** en los resultados de absorción obtenidos en los ensayos. **Los ladrillos de tejar**, más irregulares en su geometría y con una tecnología cerámica de elaboración muy precaria, ofrecen

mejores resultados de absorción en las bases de los muros sometidos a la succión capilar desde las capas freáticas del terreno, en buena medida gracias a que **este tipo de ladrillos favorece la evaporación**. Por el contrario, absorben más humedad por inmersión o por absorción debida a la presión del agua de lluvia.

- Si relacionamos los resultados obtenidos en los diferentes ensayos sobre probetas de ladrillo con los que se obtuvieron sobre piezas cerámicas obtenidas tras el desmontaje de los muros de fábrica (ensayo 10.1) ensayados en laboratorio, que suponemos proporciona datos de humedad más cercanos a los reales que se darían en muros de edificios existentes, parece claro que **el ensayo que más se aproxima a la realidad es el realizado bajo la norma UNE-EN 15801**.
- Si comparamos estos resultados con los de los muros en el ensayo 10.1 se puede comprobar que, de los dos tipos de ladrillos, es el ladrillo de tejar es el que menos agua absorbe por capilaridad tanto en las hiladas inferiores como en las siguientes, dada su estructura porosa, ya que puede evaporar más humedad desde los grandes poros accesibles. El ladrillo moderno absorbe más agua cuando es succionada por capilaridad.

## 5.2.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LAS FÁBRICAS

Sobre probetas de fábricas de ladrillo se han realizado varios tipos de ensayos: unos encaminados a verificar la relación que hay entre los datos de humedad obtenidos por las sondas termohigrométricas y los valores reales de humedad o presencia de agua en las probetas; otros desarrollados con el fin de observar y analizar el fenómeno de la ascensión de la humedad por capilaridad y comprobar la eficacia de la barrera hidrófuga; otros pretendían analizar específicamente la influencia que tienen las juntas de argamasa en la capilaridad; y otros que buscaban determinar la cantidad de agua que puede aportar el entorno a este tipo de fábricas y materiales.

Uno de los primeros ensayos que se llevaron a cabo sobre probetas de fábrica para observar el proceso de la capilaridad y la influencia de la barrera química de corte hídrico fue el que se realizó, a modo de prueba, sobre un murete de seis hiladas de altura (ensayo 9.1). Una vez finalizado éste, que sirvió como ensayo previo, se llevó a cabo otro, de mayor envergadura, que se realizó a continuación del anterior sobre cuatro muros de mayores dimensiones que se construyeron sobre una balsa impermeable (ensayo 10.1). También se han utilizado otras probetas de fábrica realizadas a menor escala con el fin de observar el fenómeno de la capilaridad y la influencia de las juntas de argamasa en los ensayos 11.1, 12.1, 13.1 y 14.1.

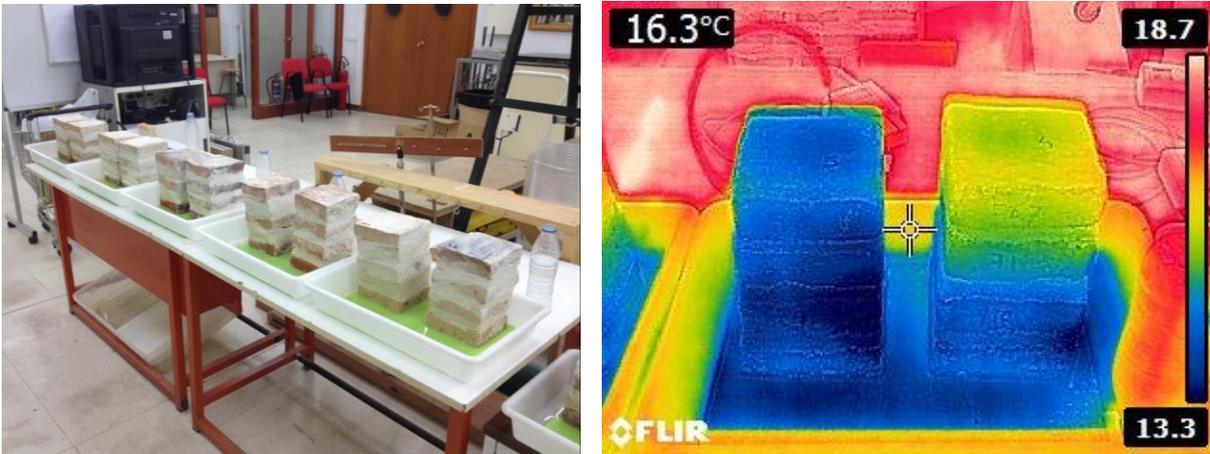


Imagen 144. Imágenes del ensayo 9.1 sobre murete de 6 hiladas y del ensayo 10.1 sobre cuatro muros.

Del ensayo llevado a cabo sobre los cuatro muros de grandes dimensiones (ensayo 10.1) se deducen muchas de las comprobaciones y conclusiones finales. El uso del instrumental, sondas y cámaras termográficas, y sobre todo, el proceso de pesado de todos y cada uno de los materiales que conformaron dichos muros, porciones de argamasa y ladrillos en todos los niveles o hiladas, ha permitido conocer exactamente el contenido de agua acumulado

en todas las ubicaciones posibles y valorar la eficacia de la barrera química de corte hídrico.

Uno de los ensayos que ha aportado información muy importante, sobre todo en lo que se refiere a la influencia que las juntas de argamasa y la interfase tienen en el fenómeno de la ascensión capilar del agua, ha sido el ensayo realizado sobre las 10 probetas pareadas (ensayo 11.1). De la observación del comportamiento de la humedad en todo el conjunto de probetas se ha podido concluir claramente que aquellas que presentaban mayor número de juntas tenían velocidades de ascensión capilar inferiores a las que tenían menos juntas, que la cantidad de agua absorbida también era menor, y que la cota del frente húmedo también era más baja. Es decir la ascensión de la humedad por capilaridad se ve claramente dificultada por la interfase que se genera en las juntas, entre la argamasa y el ladrillo.



**Imagen 145. Imagen del ensayo 11.1 sobre probetas pareadas e imagen tomada con la cámara termográfica que permite apreciar con nitidez la presencia de agua y la cota del frente húmedo.**

Con el ensayo 12.1, realizado con el objetivo de observar como es la ascensión de la humedad por capilaridad únicamente por las llagas y los tendeles, se pudo comprobar, con la ayuda imprescindible de la cámara termográfica, que la argamasa por sí sola es una vía muy importante de entrada y ascenso del agua en las fábricas. Llagas y tendeles conforman una redícula continua y sin interrupciones, de manera que esta disposición y la facilidad que tiene la argamasa, como se ha visto en varios de los ensayos, para favorecer el paso de la humedad capilar a su través hacen de este material un camino que ayuda a que el agua acceda al interior de la fábricas y avance por ellas.

Para conseguir que el agua ascendiese únicamente por la argamasa de cal se realizó un tratamiento previo muy intenso de hidrofugación de los ladrillos, de manera que fuesen prácticamente impermeables al agua. El pesaje posterior de los mismos después del desmontaje de la probeta así lo corroboró.

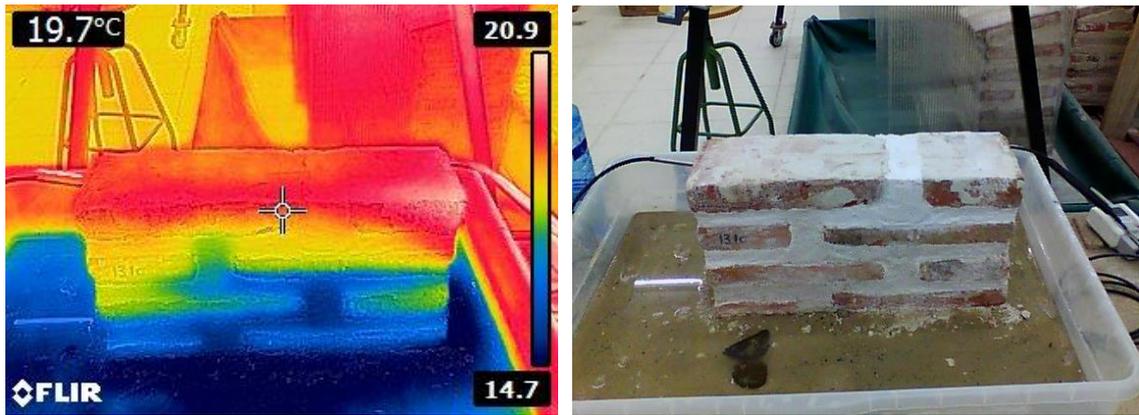
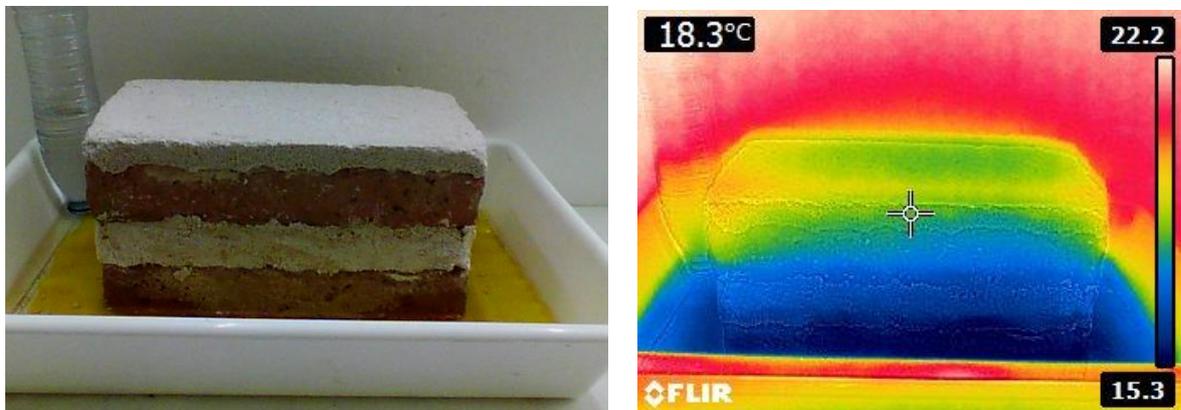


Imagen 146. Imágenes del ensayo 12.1. A la izquierda se puede apreciar la imagen termográfica que muestra con claridad como la humedad "serpentea" por las llagas y los tendeles. A la derecha la misma probeta a simple vista.

Los ensayos 13.1 y 14.1 fueron ideados con el fin de observar la influencia de la junta de argamasa de las fábricas en la capilaridad. El primero de los dos con el fin de estudiar con más precisión que en el ensayo 11.1 la ascensión de la humedad capilar al atravesar capas alternas de argamasa y ladrillo. La posibilidad de pesar y medir con precisión y regularidad, y la ayuda de la cámara termográfica y de las básculas de precisión, permitió analizar la variación del progreso de la humedad en la probeta y comprobar como en los cambios de material, en la interfase, se producían ralentizaciones del proceso capilar. Una de las dudas que se plantearon al inicio de esta tesis era saber si la interfase ladrillo-argamasa dispuesta en vertical, es decir la que se genera en las llagas, influía o no en la ascensión capilar y con qué grado de alcance. Para ello se ideó el segundo ensayo, que dio como conclusión que no era así. La humedad, como se ha visto en el resto de ensayos, ascendía por capilaridad con más rapidez por la argamasa que por el ladrillo, pero no por la interfase que se genera entre ellos. Se ha observado en algunos ensayos que por las grietas o fisuras que algunos ladrillos presentan, la humedad asciende más rápidamente por esa zona que por el resto de la pieza. Pero al ser zonas muy puntuales y sin continuidad en la fábrica no se ha tenido en cuenta.



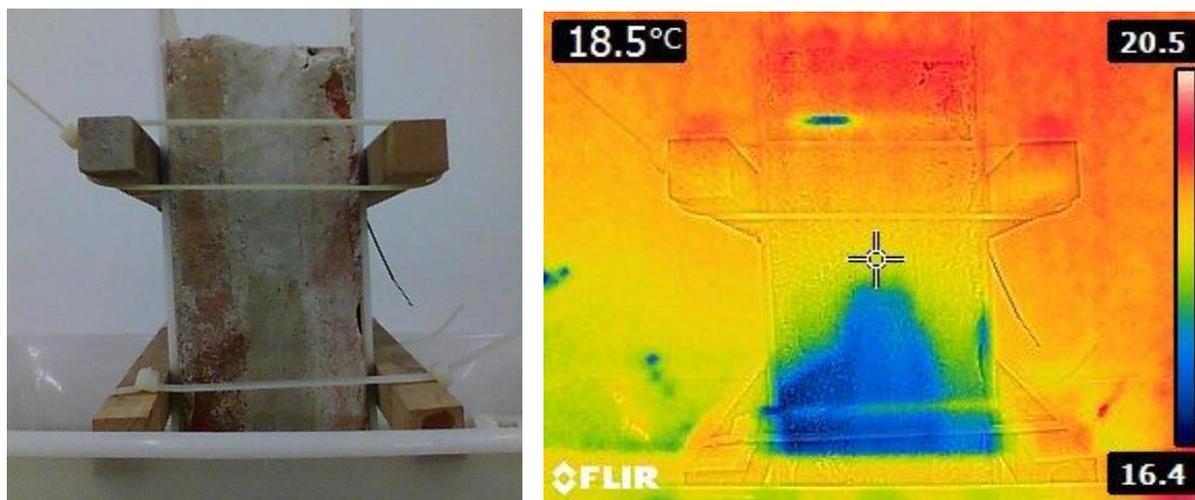


Imagen 147. Arriba imágenes del ensayo 13.1. Abajo imágenes del ensayo 14.1

La mayor parte de las aportaciones sobre las fábricas ya han sido expuestas en los apartados correspondientes de los ensayos, haciendo especial hincapié, como ya se ha comentado, a lo expuesto en el ensayo 10.1, el realizado sobre los cuatro muros, que ha sido objeto de un estudio y una exposición exhaustiva.

El comportamiento de los cuatro muros en el ensayo que para ellos se ha diseñado, a la vista de los efectos que sobre ellos se han producido y comparándolos con los ejemplos de las lesiones que se pueden apreciar con claridad en muchos ejemplos de edificios como los que se muestran en las imágenes siguientes, permiten concluir que se ha diseñado una metodología de trabajo y unos ensayos que reproducen el fenómeno de la capilaridad con bastante fiabilidad.

De este modo algunas de las características propias de las lesiones que presentan las fábricas de ladrillo recibidas con argamasas de cal en edificios reales, se han reproducido en los ensayos realizados, y más en concreto en el ensayo realizado sobre los cuatro muros, en lo que se refiere, por ejemplo, a cotas del frente húmedo o a la heterogeneidad en el comportamiento de los ladrillos y de la propia fábrica.





Imagen 148. Imágenes de edificios con presencia de humedad capilar y daños derivados de dicha presencia de humedad.

Del análisis del ensayo realizado sobre los cuatro muros una de las conclusiones importantes es la que permite deducir **la cantidad de agua que aporta al conjunto de la fábrica** cada uno de los materiales. Teniendo en cuenta que las cantidades máximas de agua que pueden almacenar los materiales, según lo deducido en los ensayos 4.1 y 4.2 en los procedimientos descritos en la norma UNE-EN 67027-84, son de 269 l/m<sup>3</sup> para el ladrillo de tejar, y de 205 l/m<sup>3</sup> para la argamasa.

En una fábrica ejecutada con **ladrillos de tejar** con juntas de argamasa gruesas (poco habituales para el tipo de fábricas estudiadas), con espesores de llagas y tendeles cercanos al grueso del ladrillo (entre los 30 y los 40 mm), y según los cálculos por mí realizados, las proporciones en volumen suelen estar en torno a los siguientes valores:

Volumen del ladrillo	entre el 33 y el 40 % del volumen de la fábrica
Volumen de la argamasa	entre el 67 y el 60 % del volumen de la fábrica

Si las juntas son más finas, las más comunes para el tipo de fábricas que se han estudiado, (**entre los 20 y los 35 mm**) las proporciones son las siguientes:

Volumen del ladrillo	entre el <b>42 y el 57 %</b> del volumen de la fábrica
Volumen de la argamasa	entre el <b>43 y el 58 %</b> del volumen de la fábrica

Así, para fábricas como las del primer caso (juntas más gruesas), podemos deducir que la cantidad de agua que aporta cada material por m<sup>3</sup> de fábrica es la siguiente:

El volumen de agua que aportan los ladrillos a la fábrica está entre los 98 y los 118 l/m<sup>3</sup>.

El volumen de agua que aporta la argamasa a la fábrica está entre los 136 y los 152 l/m<sup>3</sup>.

Es decir que es mucha más la cantidad de agua que aporta la argamasa que el ladrillo en

este tipo de fábricas.

Para fábricas con las juntas de argamasa más finas (entre los 20 y los 35 mm), las más habituales para el tipo de fábricas estudiadas, los contenidos son los siguientes:

El volumen de agua que aportan los ladrillos a la fábrica está entre los **113** y los **153** l/m<sup>3</sup>.

El volumen de agua que aporta la argamasa a la fábrica está entre los **88** y los **118** l/m<sup>3</sup>.

Tras lo expuesto se puede concluir lo siguiente respecto del comportamiento de la humedad capilar en las fábricas:

- Respecto de la hidrofugación efectuada sobre la retícula de argamasa, **la eficacia es muy elevada**. Como se apunta en la discusión de resultados del ensayo, la barrera que se forma al inyectar el producto en la argamasa de cal cumple su función como barrera de corte hídrico, impidiendo casi totalmente o ralentizando significativamente la ascensión de la humedad capilar. Pasando de valores de incremento de peso en ladrillos modernos de extrusión que oscilan entre el **8%** y el **17%** (entre los 146 y los 310 l/m<sup>3</sup>) a valores entre el **2,6%** y el **4%**, (entre los 48 y los 73 l/m<sup>3</sup>) y de valores de incremento de peso en ladrillos de tejar que están entre el **15%** y el **16%** (entre los 258 y los 275 l/m<sup>3</sup>) a valores que se sitúan entre el **2,7%** y el **8%** (entre los 47 y los 138 l/m<sup>3</sup>). Datos todos ellos para ladrillos situados en las zonas inferiores de los muros, las más afectadas por la humedad de capilaridad.
- De los ensayos 11.1 y 13.1, este último efectuado sobre probetas de hiladas alternas de ladrillo y argamasas de cal, la conclusión más importante es que **la discontinuidad que generan las interfases entre los dos materiales ralentizan notablemente la ascensión de la humedad capilar**. Otra de las conclusiones es que el espesor de la banda formada por la argamasa apenas influye en la ascensión capilar. A mayor espesor no hay mayor ralentización de la ascensión, es más, **la ascensión de la humedad capilar es mucho más rápida por la argamasa que por el ladrillo**, como también se puede observar con claridad en las imágenes obtenidas por la cámara termográfica en los ensayos 12.1, 14.1 y sobre todo en el ensayo 16.1.
- En el ensayo 12.1 se puede observar con claridad como **la argamasa**, al conformar una retícula continua y gracias a su facilidad para el transporte de agua a su través, **es una vía continua en la ascensión de la humedad por capilaridad**.

## 6. CONCLUSIONES

A la vista de lo expuesto en el desarrollo de la tesis, paso a exponer las conclusiones que se han obtenido tras el desarrollo de la misma. Son síntesis de las ideas más relevantes, ya que son muchas las apreciaciones que a modo de reflexiones en voz alta apuntan conclusiones parciales o de menor entidad a lo largo del texto.

Recordamos a continuación las **hipótesis** planteadas al inicio de la tesis:

La hipótesis principal de partida es que **las retículas de juntas continuas que conforman las llagas y los tendeles de argamasa de cal en las fábricas se comportan de forma diferente a los ladrillos en el fenómeno de la ascensión capilar del agua, favoreciendo dicho fenómeno.**

Esta hipótesis principal se complementa con otras dos, -siendo el conjunto de ellas las que han dado cuerpo a la presente tesis-, y es que, al conformarse esas retículas continuas:

1. El **tratamiento de las juntas de argamasa con productos hidrofugantes mejora notablemente el comportamiento de éstas como barrera química de corte hídrico**, impidiendo totalmente o ralentizando sustancialmente el ascenso de la humedad por capilaridad en las fábricas.
2. La **interfase** o discontinuidad que se genera en la superficie de contacto entre las caras del ladrillo y la argamasa **ralentiza y dificulta notablemente la ascensión capilar de la humedad.**

## CONCLUSIONES PRINCIPALES

Después del trabajo realizado, del análisis de los datos, imágenes y gráficos obtenidos y de todas las consideraciones expuestas a largo de este estudio, podemos establecer las siguientes conclusiones:

1. **Las retículas continuas que conforman las llagas y los tendeles en las fábricas ejecutadas con ladrillos antiguos de tejar recibidos con argamasas de cal se comportan de forma diferente a los ladrillos en el fenómeno de la ascensión capilar del agua facilitando dicho fenómeno.**

Esto se confirma con lo expuesto en las conclusiones del apartado 5.2.4 *Discusión de resultados sobre el comportamiento de las fábricas* y con las conclusiones deducidas sobre todo del ensayo 12.1, y también con las obtenidas de los ensayos 10.1, 11.1 y 16.1. En todos ellos se puede observar con claridad que el comportamiento de la argamasa y la del ladrillo son diferentes y que es el conjunto o retícula que conforman las llagas y tendeles la parte de la fábrica que más facilita el fenómeno de la ascensión capilar de la humedad.

**2. La interfase que se forma entre las argamasas de cal y los ladrillos actúa como freno que ralentiza y dificulta la ascensión de la humedad por capilaridad en las fábricas.**

En la discusión de resultados y conclusiones del ensayo 11.1, y a lo largo de la exposición de los datos y de las imágenes de dicho ensayo, es donde más claramente se argumenta la veracidad de esta conclusión. Además de lo también expuesto en el ensayo 13.1. En ambos ensayos se comprueba la ralentización que sufre el proceso de ascensión de agua por capilaridad cada vez que se produce un cambio de material en las fábricas.

**3. El tratamiento de las juntas de argamasa con productos hidrofugantes mejora notablemente el comportamiento de éstas como barrera de corte hídrico, impidiendo totalmente o ralentizando sustancialmente el ascenso de la humedad por capilaridad en este tipo de fábricas.**

Tras la ejecución de ensayos de larga duración sobre probetas de fábricas en los que se ha observado la evolución del frente húmedo antes y después de la aplicación de productos hidrofugantes se ha podido comprobar la alta eficacia de esta solución como barrera química de corte hídrico como método de control de la ascensión de la humedad capilar. Esta conclusión queda perfectamente argumentada y demostrada en los ensayos 9.1 y 10.1. La continuidad espacial de la retícula que conforman las llagas y los tendeles de las juntas, y la buena capacidad que tiene la argamasa de cal de perfundir el producto aplicado a través de este material hacen de ésta, una solución óptima para atajar el problema de las humedades provenientes del terreno en las fábricas ejecutadas con los sistemas y materiales estudiados.

**4. La humedad capilar asciende con más rapidez por la argamasa de cal que por los ladrillos, para el tipo de fábricas estudiadas.**

Esta conclusión se aprecia con suma claridad en el ensayo 16.1. También se puede observar en todos aquellos en los que se analizan algunas de las distintas tasas de

absorción de ambos materiales y que permiten observar, bien a simple vista, o bien con ayuda de la cámara termográfica la evolución del frente húmedo, como por ejemplo ocurre en los ensayos 3.1, 3.2, y 14.1.

## CONCLUSIONES SECUNDARIAS

Además de las conclusiones principales, de los ensayos realizados se pueden deducir las siguientes conclusiones secundarias, que a continuación se exponen:

### Respecto de los materiales.

- Los procesos de elaboración, amasado, compactación y puesta en obra de las argamasas de cal, así como la **proporción de sus mezclas** tienen una incidencia directa en el comportamiento de la misma ante la presencia de la humedad por capilaridad, variando sustancialmente los valores de tasas de absorción de agua, tanto en volumen contenido como en velocidad de absorción.

Esta conclusión queda totalmente demostrada en los ensayos 1.1, 3.1, 4.1, 5.2 y 6.1. En todos ellos la proporción de las mezclas y los valores obtenidos son coherentes entre sí, de modo que las probetas realizadas con proporciones en sus mezclas 1:2, 1:3 y 1:4 tienen valores correlativos con esta secuencialidad.

- Los ladrillos de tejar son capaces de contener en su interior una cantidad significativamente **más alta** de agua en volumen que la argamasa. Y los procesos de absorción y de desorción son mucho más lentos en los ladrillos que en las argamasas.

Con los datos obtenidos en los ensayos 3 y 4, y en el ensayo E-10.1 se puede demostrar esta conclusión. Las argamasas, dependiendo de su proporción pueden albergar en su interior cantidades de agua que pueden estar entre los 200 y los 250 l/m<sup>3</sup>, mientras que los ladrillos de tejar pueden albergar en su interior cantidades comprendidas entre los 270 y los 300 l/m<sup>3</sup> pudiendo incluso superar en algunos casos esos 300 l/m<sup>3</sup>.

- Los ladrillos de tejar presentan una significativa **dispersión** de comportamiento frente a la humedad, con una desviación de valores en todos aquellos relacionados con la absorción de agua por el material, lo que no ocurre ni en los ladrillos modernos fabricados por extrusión, ni en las probetas de argamasa fabricadas en laboratorio.

Esta tendencia en la dispersión de datos para un tipo de ladrillos, los de tejar, y menor para los otros materiales se puede apreciar en todas las tablas y gráficos en donde se ensayan varias piezas o probetas, como ocurre en los 6 primeros ensayos. También se puede apreciar en los valores obtenidos para ladrillos y porciones de argamasa de cal obtenidos del desmontaje de los muros del ensayo 10.1.

### Respecto del fenómeno de la capilaridad.

- La cota que alcanza la humedad por capilaridad, o el frente húmedo, en este tipo de muros de fábrica de ladrillo, cuando están afectados por el fenómeno de la capilaridad y no disponen de zócalo o de barrera de corte hídrico, se sitúa en torno a los **0,6 y 0,8 metros** de altura.

Esta conclusión se deduce de la cota alcanzada por el frente húmedo en los muros que se utilizaron en el ensayo 10.1. Coincide aproximadamente con la cota de frentes húmedos observados en edificaciones existentes ejecutadas con fábricas similares a las estudiadas y con condiciones formales también similares. Es cierto que las condiciones ambientales influyen notablemente en la ascensión capilar, por lo que el dato de cota de esta conclusión ha de enmarcarse dentro de un rango de valores sensiblemente amplio.

- La presencia de humedad en un paramento puede generar descensos de hasta **3 grados centígrados** en él mismo, con el consiguiente gasto energético que ello conlleva.

Que la temperatura de muros húmedos sea inferior a la de muros secos es lo previsible, ya que a mayor cantidad de agua, mayor evaporación y por lo tanto menor temperatura en los materiales. Lo que tiene de interesante esta conclusión es la cuantificación de los grados de diferencia que hay entre los dos estados, el seco y el húmedo. Los valores se han obtenido del ensayo E-10.1 y han sido tomados por las sondas termohigrométricas introducidas en perforaciones realizadas en los muros. En el apartado 5.2.1. *Discusión de resultados sobre la idoneidad de los resultados obtenidos del instrumental* se pueden observar los gráficos que muestran el estado de las temperaturas en los muros ensayados.

- Las condiciones del entorno (humedad y temperatura) son fundamentales en los procesos de absorción capilar y desorción. Pueden acelerar o ralentizar el proceso de evaporación, pero no aportan cantidades apreciables de agua a las fábricas (en

torno al **1%** de incremento de peso para argamasas y al **4%** para el ladrillo de tejar).

Con el fin de conocer la cantidad de agua que las fábricas podrían tomar del ambiente se ideó y desarrolló el Ensayo 15 que es el que ha permitido, con ayuda de una cámara climática, recrear un entorno con unas condiciones determinadas de temperatura y humedad, que han ido variándose en el tiempo, y que han permitido determinar los porcentajes de incremento de peso que se pueden deber al aporte de agua por parte del entorno.

### Respecto del instrumental.

- La **cámara termográfica** se ha mostrado como un instrumento fundamental para la detección y diagnóstico de la humedad en las fábricas. Permitiendo incluso una cierta **cuantificación** del volumen de agua retenido.

Son varios los ensayos que han tenido en la cámara termográfica un instrumento fundamental para determinar la presencia de agua en las diferentes probetas ensayadas. Concretamente se ha utilizado en los ensayos: 3.1, 3.2, 9.1, 10.1, 11.1, 12.1, 13.1, 14.1 y 16.1. Sin el apoyo de las imágenes de esta cámara algunos de estos ensayos hubiesen o bien sido inútiles, o bien se hubiese desperdiciado mucha información. La posibilidad de determinar la cantidad de agua con este instrumento es aún poco precisa, y entra dentro de las líneas de investigación que se han abierto a raíz de las observaciones surgidas durante el desarrollo de esta tesis.

- Los datos obtenidos por las **sondas termohigrométricas** utilizadas en esta investigación son de una elevada fiabilidad en la detección de la humedad. Si bien son más útiles para **concentraciones muy bajas** de humedad.

Las sondas que se han utilizado en esta tesis son instrumentos que se han mostrado muy fiables y de mucha precisión. Su colocación en perforaciones realizadas en las distintas probetas ha permitido detectar la humedad aun estando presente en cantidades muy bajas. Han sido utilizadas en los siguientes ensayos: 7.1, 8.1, 9.1, 10.1, 11.1, 12.1 y 13.1.

### Respecto de los ensayos.

- Los ensayos basados en normas UNE, se han mostrado en general poco eficaces a la hora de aportar datos sobre el estado del problema, tanto en lo que se refiere a las fábricas como a sus componentes. Sin embargo, la norma **UNE-EN 67027-84** ha aportado valores muy similares a los de las hiladas inferiores de las fábricas, mostrándose como una herramienta capaz de suministrar información muy cercana

a la realidad del fenómeno. La norma **UNE-EN 15801** describe un procedimiento de ensayo que se ha mostrado igualmente muy útil a la hora de observar el comportamiento de la humedad capilar, sobre todo para el análisis del fenómeno en las fábricas. De tal manera que muchos de los ensayos ideados se han hecho siguiendo procedimientos similares al descrito en esta norma.

Ya se ha comentado que la normativa existente apenas presta atención al estudio del problema de la capilaridad en las fábricas antiguas. Existen algunas normas UNE que desarrollan procedimientos para determinar el comportamiento de algunos materiales ante la presencia del agua, determinando ciertas tasas de absorción de agua. Pero en ningún caso abordan la problemática de las fábricas. Esta es una de las razones fundamentales que han impulsado el desarrollo de esta tesis. De entre todas las normas estudiadas es la UNE 67027-84 la que aporta datos por una parte interesantes y útiles para investigar en este campo, y por otra parte datos que sean próximos a los que se producen en situaciones reales.



## **7. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

## **7.1. EMPLEO DE SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS PARA CUANTIFICAR LA PRESENCIA DE AGUA EN LAS FÁBRICAS ANTIGUAS DE LADRILLO DE TEJAR**

A raíz de la ejecución de alguno de los ensayos se ha planteado la posibilidad de conseguir uno de los retos más interesantes que han surgido de la tesis como es deducir la cantidad de agua presente en el interior de una fábrica utilizando métodos no destructivos. En concreto una de las posibilidades sería hacerlo mediante el uso de las sondas termohigrométricas, intentando establecer una correlación lo más exacta posible entre el valor de humedad suministrado por la sonda y la cantidad de agua que hay en el entorno próximo de la sonda. Comprobando además si el dato de temperatura suministrado aporta o no información necesaria para cuantificar el volumen de agua buscado.

## **7.2. ESTUDIO DE BARRERAS HIDRÓFUGAS AL AGUA DE LLUVIA**

Del estudio de la influencia del agua sobre las fábricas de ladrillo por el efecto de la capilaridad, han surgido inquietudes sobre como es el comportamiento de las mismas, ante otros procesos de entrada del agua, con el fin de estudiar, como ha sido el caso de esta tesis, los procesos de entrada y las propuestas para impedir dicho acceso al interior de las fábricas.

Las investigaciones versarán sobre los procesos de entrada del agua de lluvia según tres supuestos:

- Por incidencia directa sobre paramentos verticales
- Por incidencia directa sobre paramentos horizontales
- Por escorrentía

## **7.3. ESTUDIO DE NUEVAS BARRERAS HIDRÓFUGAS BASADAS EN NANOCOMPONENTES**

El estudio de la eficacia de las barreras hidrófugas que se ha desarrollado en esta tesis se ha sustentado sobre un tipo de productos, de uso muy habitual a día de hoy. Pero como todo lo relacionado con la ciencia, nuevos productos aparecen en el mercado, y este es el caso de los nanocomponentes, con un futuro, al parecer prometedor. Es interés del redactor de esta tesis seguir investigando en los procesos de capilaridad y por supuesto en los nuevos sistemas de contención del fenómeno, y concretamente en el uso de los nanocomponentes como productos hidrofugantes.

## **8. DIFUSIÓN CIENTÍFICA. ARTÍCULOS Y CONGRESOS**

## ARTÍCULO 1. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN  
Vol. 64, Issue 314, April–June 2014, e020  
ISSN-L: 0465-2746  
<http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.02513>

# Evaluation of the behavior of brick tile masonry and mortar due to capillary rise of moisture

M.S. Camino<sup>a</sup>✉, F.J. León<sup>a</sup>, A. Llorente<sup>a</sup>, J.M. Olivar<sup>a</sup>

a. Universidad de Valladolid (Valladolid, Spain)  
✉[mcamino@arq.uva.es](mailto:mcamino@arq.uva.es)

Received 8 April 2013  
Accepted 20 January 2014  
Available on line 03 June 2014

**ABSTRACT:** For a better understanding of the behaviour of old brick masonry in facing the rising damp problem, multiple tests were made in the laboratory: water absorption, moisture content, apparent porosity, temperature and thermal camera imaging on brick masonry and its components: brick and mortar. This has allowed us to determine which of the previous tests is the best in predicting the behaviour of a real wall. In addition, the tests have also helped in defining a process to evaluate the moisture content of walls in a buildings, which is important for heritage restoration projects.

**KEYWORDS:** Brick; Brickwork; Rising damp; Absorption; Thermography

**Citation / Citar como:** Camino, M.S.; León, F.J.; Llorente, A.; Olivar, J.M. (2014). Evaluation of the behavior of brick tile masonry and mortar due to capillary rise of moisture *Mater. Construcc.* 64 [314], e020 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.02513>.

**RESUMEN:** *Evaluación del comportamiento de las fábricas de ladrillos de tejar y argamasa debido a la humedad que asciende por capilaridad.* Para un mejor conocimiento del comportamiento de las fábricas antiguas de ladrillo frente a la ascensión capilar de agua, se han realizado en laboratorio ensayos de absorción de agua, de contenido de humedad, de porosidad aparente, de temperatura e imágenes con cámara termográfica sobre muros de fábrica y sus materiales componentes: ladrillo y argamasa. Ello ha permitido inferir cuál es el ensayo realizado a los ladrillos que mejor predice el comportamiento del muro real. También ha permitido definir un procedimiento para evaluar el contenido de humedad de fábricas existentes, importante para los proyectos de restauración del patrimonio construido.

**PALABRAS CLAVE:** Ladrillo; Fábrica de ladrillo; Ascensión capilar; Absorción; Termografía

**Copyright:** © 2014 CSIC. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial (by-nc) Spain 3.0 License.

## 1. INTRODUCTION

The research on the behavior of old brick masonry against capillary rise of moisture, brings about the need to know the exact behavior of each components that make up these walls: ceramic bricks and air-entrained hydrated lime mortar.

The theoretical analysis that study the capillary rise of water can be of use to us to know this process when it comes to homogeneous constructive

elements, but this is not the case with brick masonry which are made up of two materials: bricks and mortar, with each having different characteristics, causing this capillary rise not to be linear or uniform.

The classic expression of capillary rise is by Jurin, by which the height reached within a capillary tube depends on the surface tension, of the wettability or the angle created by the surface of the liquid with the wall of the tube, capillary radius, density of the liquid and gravity.

CONGRESOS 1. PATORREB 2012

4º Congreso de Patología y Rehabilitación de Edificios  
**PATORREB 2012**

Colexio Oficial de Arquitectos de Galicia

**ALFREDO LLORENTE ÁLVAREZ,**

con DNI 09296647R , asistió en condición de autor al:

**4º Congreso Internacional de Patología y Rehabilitación de Edificios  
PATORREB 2012**

celebrado en:

Santiago de Compostela del 12 al 14 de abril del 2012  
con una duración de 25 horas

con la sesión **R5-02**

**PROPUESTA DE ENSAYO PARA EVALUAR LAS BARRERAS QUÍMICAS PARA EVITAR LA  
SUBIDA DEL AGUA DEL TERRENO EN FÁBRICAS**

(M<sup>a</sup> Soledad Camino Olea, Fco. Javier León Vallejo, Alfredo Llorente Álvarez, José M<sup>a</sup> Olivar Parra)

Y para que conste expido la presente certificación en Santiago de Compostela a lunes, 16 de abril de 2012.

Firmado:



Jorge Duarte Vazquez  
Decano del Colexio Oficial de Arquitectos de Galicia

Código de verificación electrónica (CVE): **C011980244F**  
Data-hora: 30/04/2012 20:26:57  
A verificar deste documento pódese comprobar na  
zona de verificación da web do COAG [www.coag.es/cve](http://www.coag.es/cve)

Digitally signed by COLEXIO OFICIAL DE  
ARQUITECTOS DE GALICIA  
Date: 20.12.04.30 20:26:58 +02:00  
Reason: Certificado de asistencia a curso  
Location: Santiago de Compostela



Colexio Oficial de  
Arquitectos de Galicia





## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN POR CAPILARIDAD DE LADRILLOS MACIZOS SEGÚN DIVERSOS ENSAYOS

Camino Olea, María Soledad<sup>1</sup>, León Vallejo, Fco. Javier<sup>2</sup>, Llorente Álvarez, Alfredo<sup>3</sup>,  
Olivar Parra, José M<sup>4</sup>

1: Dpto de Construcciones Arquitectónicas IT y MMC y TE, Universidad de Valladolid  
[mcamino@arq.uva.es](mailto:mcamino@arq.uva.es)

2: Dpto de Construcciones Arquitectónicas IT y MMC y TE, Universidad de Valladolid  
[fleon@arq.uva.es](mailto:fleon@arq.uva.es)

3: Dpto de Construcciones Arquitectónicas IT y MMC y TE, Universidad de Valladolid  
[llorente@arq.uva.es](mailto:llorente@arq.uva.es)

4: Dpto de Construcciones Arquitectónicas IT y MMC y TE, Universidad de Valladolid  
[jmo@arq.uva.es](mailto:jmo@arq.uva.es)

**PALABRAS CLAVE:** absorción, capilaridad, ladrillo, humedad, conservación.

### RESUMEN

Es muy común encontrar edificios de fábrica de ladrillo antiguos en los que la base de los muros está muy degradada mientras que el resto se encuentra en mejor estado de conservación. El proceso que más influye en este deterioro es la subida por capilaridad del agua procedente del terreno. La investigación del comportamiento de las fábricas de ladrillo frente a la humedad de ascenso capilar conlleva la necesidad de conocer adecuadamente el comportamiento de los materiales componentes de dichas fábricas. En lo relativo a los ensayos de absorción de agua de los ladrillos hay diferentes normas UNE con procedimientos diversos porque estudian desde diferentes puntos de vista la absorción de agua de los ladrillos. Se pretende comparar los resultados los ensayos realizados a los ladrillos con los obtenidos en el ensayo de absorción de agua por capilaridad de unos muretes de fábrica de ladrillos, para concluir cual de los procedimientos de ensayo para ladrillos de las normas UNE, proporciona una información más próxima a la absorción del muro de de ladrillos.

### 1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se van a presentar los resultado de los ensayos realizados según normas UNE a ladrillos macizos de tejar, procedentes de demoliciones de edificios de más de cien años, y a ladrillos macizos fabricados recientemente, y cuyos resultados se van a comparar entre sí y con los obtenidos en otro ensayo de absorción de agua por capilaridad de dos muretes de ladrillo, en laboratorio. La norma en principio mas adecuada para conocer la absorción de agua por capilaridad es la "UNE EN 15801: Conservación del patrimonio cultural. Determinación de la absorción de agua por capilaridad" que se refiere al ensayo a



## Contribution of lime and sand mortar in the process of capillary water absorption in old brick masonry

Camino, Soledad, Universidad de Valladolid, Avenida de Salamanca 18, 47014 Valladolid, España, mcamino@arq.uva.es  
 León, Javier, Universidad de Valladolid, Avenida de Salamanca 18, 47014 Valladolid, España, fjeon@arq.uva.es  
 Llorente, Alfredo, Universidad de Valladolid, Avenida de Salamanca 18, 47014 Valladolid, España, llorente@arq.uva.es  
 Olivar, José, Universidad de Valladolid, Avenida de Salamanca 18, 47014 Valladolid, España, jmo@arq.uva.es

### Introduction

The deterioration at the base of brick masonry in historic buildings due to water rising is a very common problem. Research on this problem usually studies the influence of brick although the mortar of lime and sand in bed joints have relevant thickness and its proportion can be between 40% and 50% of the total volume. To analyze the importance or not of the mortar in this phenomenon we will compare the results of tests conducted on samples of mortar and brick with those of a wall.

### Methodology

The tests were conducted on a specimen of mortar of 160x40x40 mm according to the Standard UNE EN 1015-11, UNE-EN: 1015:18, 15801, 771-1 Annex C in which we varied the proportion of lime and sand: 1/2, 1/3 and 1/4 and brick tiles from demolitions. Later, a 1 m high wall was built with these bricks and mortar with a proportion 1/3 on a bed of 5 cm of water saturated sand. The water rose through the wall by capillary action and when it reached an equilibrium the wall was demolished and the bricks and mortar specimens were weighed to calculate the volume of water absorbed in l/m<sup>3</sup>.

The tests are performed with the aid granted by the Ministry of Science and Innovation of Spain Research Project entitled "Protection against moisture in old brick masonry walls. Study of the use of repellents in their restoration" BIA 2010-19245.

### Results and Discussion

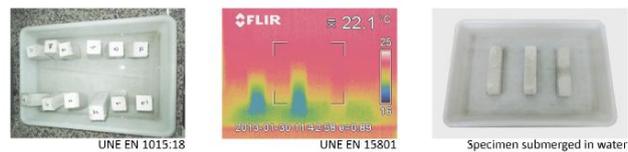
At the base of the wall water absorption per volume of bricks is similar to the tests of absorption with the submerged brick while in the case of the mortar specimen is always superior absorption of water per volume in the wall than in the rest of the tests.

The two materials: brick and mortar present different results in tests carried out according to the standards UNE however in the brick wall, its behavior is very similar.

### Remarks and Conclusions

In conclusion, it seems that the results of the tests on bricks provide more information about the behaviour of the wall.

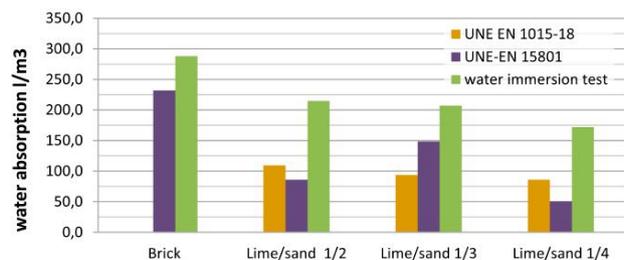
### Modeling



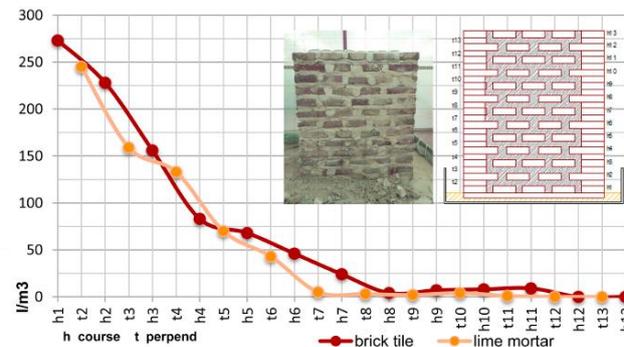
### Results

Water absorption from the three tests

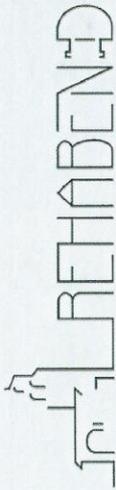
specimen	UNE EN 1015:18		UNE EN 15801		Specimen submerged in water
	C kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )	l/m <sup>2</sup>	Q <sub>s</sub> kg/m <sup>2</sup>	l/m <sup>2</sup>	l/m <sup>3</sup>
lime/sand 1/2	1,36	109,4	13,8	85,9	214,8
lime/sand 1/3	1,22	93,8	23,8	148,4	207
lime/sand 1/4	1,15	85,9	11,8	50,8	171,8
brick	--	--	60,3	231,9	288



Results of water absorption of the brick wall



CONGRESOS 4. REHABEND 2016



## REHABEND 2016

Congreso Euro-Americano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio

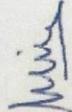
Que tuvo lugar en Burgos, España, del 24 al 27 de Mayo de 2016, certifica que el Artículo 1.7.68

**“ANALYSIS OF THE RESULTS OF TESTS FOR DETERMINING THE WATER ABSORPTION BY MORTAR SPECIMENS OF THE 15801 STANDARD UNE”**

Por:

Camino, Soledad; León, Francisco Javier; Llorente, Alfredo; Olivar, José M<sup>a</sup>

Ha sido presentado, revisado por pares académicos pertenecientes al comité científico-técnico del congreso e incluido en el Libro de Resúmenes y en el Libro Digital de Artículos completos

  
**GTED - UC**  
Gestión y Tecnología de la Edificación

Prof. Luis Villegas  
Co-Director del Congreso  
Catedrático de la Universidad de Cantabria  
<http://grupos.unican.es/GTED/>

  
Prof. Juan M. Manso  
Co-Director del Congreso  
Profesor Titular de la Universidad de Burgos

## 9. BIBLIOGRAFÍA

## 9.1 BIBLIOGRAFÍA ACTUAL

- ADAN, O., et al. Determination of liquid water transfer properties of porous building materials and development of numerical assessment methods: introduction to the EC HAMSTAD project. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 2004, vol. 27, no 4, p. 253-260.
- ALONSO, J., et al. Glosario de morteros. *Revista electrónica ReCoPaR*, 2009, no 6, p. 33-40.
- APOLO, Gerónimo Lozano; MORROS, Carlos Santolaria; MARTÍNEZ-LUENGAS, Alfonso Lozano. *Curso de tipología, patología y terapéutica de las humedades*. Consultores Técnicos de la Construcción, 1993.
- CAMINO OLEA, M<sup>a</sup> S. *Construcción y ornamentación de las fachadas de ladrillo prensado, al descubierto, en la ciudad de Valladolid*. 2001. Tesis Doctoral. Tesis Doctoral (Director: Dr. Juan Monjó Carrió). ETS Arquitectura de Madrid. Madrid.
- CAMINO, M. S., et al. Evaluation of the behavior of brick tile masonry and mortar due to capillary rise of moisture. *Materiales de Construcción*, 2014, vol. 64, no 314, p. 020.
- CARBONARA, Giovanni. Tendencias actuales de la Restauración en Italia. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, 1998, no 6, p. 12-23.
- CULTRONE, Giuseppe; MADKOUR, Fatma. Evaluation of the effectiveness of treatment products in improving the quality of ceramics used in new and historical buildings. *Journal of Cultural Heritage*, 2013, vol. 14, no 4, p. 304-310.
- CULTRONE, Giuseppe; SEBASTIAN, Eduardo; DE LA TORRE, M. J. Mineralogical and physical behaviour of solid bricks with additives. *Construction and Building Materials*, 2005, vol. 19, no 1, p. 39-48.
- DALTON, John. *Experiments and observations to determine whether the quantity of rain and dew is equal to the quantity of water carried off by the rivers and raised by evaporation: With an enquiry into the origin of springs*. R. & W. Dean, 1802.
- DE FREITAS, Vasco Peixoto. *Humidade Ascensional*. FEUP edições, 2008.
- DE FREITAS, Vasco Peixoto. Tratamento da humidade ascensional em edificios antigos. En *Patorreb 2012: 4º Congreso de patología y rehabilitación de edificios: 12-14 de abril de 2012, Santiago de Compostela*. Colexio Oficial de Arquitectos de Galicia, 2012. p. 40.

- DE VILLANUEVA, Juan. *ARTE DE ALBAÑILERIA O INSTRUCCIONES PARA LOS JOVENES QUE SE DEDIQUE A ÉL*. Editorial MAXTOR, 2008.
- ELERT, Kerstin, et al. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings-influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, vol. 4, n 2, p. 91-99.
- ELISA FRANZONI: "Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge", *Construction and Building Materials* 2014; 54:123-136.
- ESBERT, Rosa María, et al. *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Collegi d'Aparelladors i Arq. Tècnics de Barcelona, Barcelona, Spain, 1997.
- FASSINA, Vasco, et al. Evaluation of compatibility and durability of a hydraulic lime-based plaster applied on brick wall masonry of historical buildings affected by rising damp phenomena. *Journal of Cultural Heritage*, 2002, vol. 3, no 1, p. 45-51.
- FORT, R. Polímeros sintéticos para la conservación de materiales pétreos. *Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo*, 2007, p. 71-82.
- FRANZONI, Elisa. Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 54, p. 123-136.
- FRANZONI, Elisa; BANDINI, Simone. Spontaneous electrical effects in masonry affected by capillary water rise: The role of salts. *Construction and Building materials*, 2012, vol. 35, p. 642-646.
- GARATE ROJAS, I. *Artes de la Cal*, Instituto español de Arquitectura. MRRP., Madrid, 2002.
- GARCÍA MORALES, Soledad. *Metodología de diagnóstico de humedades de capilaridad ascendente y condensación higroscópica, en edificios históricos*. 1995. Tesis Doctoral. Arquitectura.
- GARCÍA MORALES, Soledad; COLLADO GÓMEZ, Ana; LÓPEZ GONZÁLEZ, Laura. *Metodología de diagnóstico de humedades: La inspección higrotérmica con ayuda instrumental*. 2012.
- GÓMEZ-HERAS, Miguel, et al. Ejemplos de análisis cuantitativo de imágenes de infrarrojos obtenidas por termografía activa para la detección de patologías de humedades. En *Congreso Latinoamericano sobre patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio: REHABEND 2014, Santander (España), 1-4 de abril de 2014*. Universidad de Cantabria, 2014. p. 461-468.

- GUIMARÃES, A. S.; DELGADO, J. M. P. Q.; DE FREITAS, V. P. Rising damp in building walls: the wall base ventilation system. *Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 48, no 12, p. 2079-2085.
- GUIMARÃES, Ana Sofia; DELGADO, J. M. P. Q.; DE FREITAS, V. P. Mathematical analysis of the evaporative process of a new technological treatment of rising damp in historic buildings. *Building and Environment*, 2010, vol. 45, no 11, p. 2414-2420.
- HACQUEBORD, Anke, et al. Evaluation of spreading and effectiveness of injection products against rising damp in mortar/brick combinations. *Procedia Chemistry*, 2013, vol. 8, p. 139-149.
- HALL, Christopher; HOFF, William D. Rising damp: capillary rise dynamics in walls. En *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society, 2007. p. 1871-1884.
- I'ANSON, S. J.; HOFF, W. D. Chemical injection remedial treatment for rising damp—II. Calculation of injection times. *Building and Environment*, 1990, vol. 25, no 1, p. 63-70.
- I'ANSON, S. J.; HOFF, W. D. Chemical injection remedial treatments for rising damp—I. The interaction of damp-proofing fluids with porous building materials. *Building and Environment*, 1988, vol. 23, no 3, p. 171-178.
- I'ANSON, S. J.; HOFF, W. D. Water movement in porous building materials—VIII. Effects of evaporative drying on height of capillary rise equilibrium in walls. *Building and Environment*, 1986, vol. 21, no 3-4, p. 195-200.
- LOZANO MARTINEZ-LUENGAS, Alfonso. Curso: síndrome, patología y terapéutica de las humedades. *Autor-Editor*. ISBN, 2006, vol. 230674937.
- LOZANO, G.; LOZANO, A.; DEL COZ, J. J. Síndrome, patología y terapéutica de las humedades. *Consultores Técnicos de Construcción, SL Gijón, Spain (in Spanish)*. Google Scholar, 2006.
- LOZANO, G.; SANTOLARIA, C.; LOZANO, A. Curso de tipología, patología y terapéutica de las humedades. *Gijón: Consultores técnicos asociados*, 1993.
- LUBELLI, B.; VAN HEES, R. P. J.; HACQUEBORD, A. Experimental study of the distribution of chemical products against rising damp in substrates with different water saturation degrees. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 40, p. 891-898.

- MARTÍN, Jesús Angel Coronado; SANTOS, Alfonso García; MOLINA, Jose Francisco Padial. Análisis mediante microscopio electrónico de barrido de la succión del ladrillo visto de fabricación extrusionada hidrofugado. *REVISTA CIENTÍFICA AXIOMA*, 2014, vol. 2, no 11, p. 27-33.
- MARTÍNEZ, Enrique, et al. Metodología para la intervención en elementos históricos: el caso de la espadaña del convento de Nuestra Señora de la Consolación (Alcalá de Henares-Madrid-España). *Informes de la Construcción*, 2013, vol. 65, no 531, p. 359-366.
- MARTÍNEZ, María Cruz Iglesias. Análisis de la variación de la composición de los morteros utilizados en los muros de fábrica tradicionales. En *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Madrid, 19-21 de septiembre de 1996*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, 1996. p. 271-276.
- MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C. *Operaciones básicas de ingeniería química*. Reverté, 1981.
- MONJO CARRIÓN, J., et al. Patología y técnicas de intervención fachadas y cubiertas. *Murilla-Leria*, 1999.
- MONJO CARRIÓN, Juan. La patología y los estudios patológicos. AA. VV.: *CURSO DE PATOLOGÍA, CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE EDIFICIOS*, 1993, vol. 1, p. 11-41.
- MONJO CARRIO, Juan. *Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos*. Munilla-Lería, 1997.
- MONTORO, Rosa Bustamante. Términos relacionados con la patología y restauración de fábricas de ladrillo. Terms Used in the Pathology and Restoration of Brick Masonry. *Revista electrónica ReCoPar*, 2014, no 4, p. 47-50.
- OLEA, María Soledad Camino, et al. Análisis de los resultados de determinación de la absorción por capilaridad de ladrillos macizos según diversos ensayos. En *Congreso Latinoamericano sobre patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio: REHABEND 2014, Santander (España), 1-4 de abril de 2014*. Universidad de Cantabria, 2014. p. 477-484.
- OLEA, María Soledad Camino, et al. Propuesta de ensayo para evaluar las barreras químicas para evitar la subida del agua del terreno en fábricas. En *Patorreb 2012: 4º Congreso de patología y rehabilitación de edificios: 12-14 de abril de 2012, Santiago de Compostela*. Colexio Oficial de Arquitectos de Galicia, 2012. p. 163.

- ORTEGA, Francisco. Humedades en la edificación. 1994.
- P DE FREITAS, V.; S GUIMARAES, A.; MPQ DELGADO, J. The "Humivent" device for rising damp treatment. *Recent Patents on Engineering*, 2011, vol. 5, no 3, p. 233-240.
- PARRA, José M<sup>a</sup> Olivar; ÁLVAREZ, Alfredo Llorente; OLEA, María Soledad Camino. Elaboración artesanal de adobes y ladrillos de tejar en la cerámica Nietos de Eulogio Bernardos Artesanos, en Arévalo. En *Construcción con tierra: investigación y documentación*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, 2015. p. 287-296.
- PRYOR, E. J. Selected Ore Treatments. En *Mineral Processing*. Springer, Dordrecht, 1965. p. 702-808.
- RIRSCH, Eric; ZHANG, Zhongyi. Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, no 10, p. 1815-1820.
- RIVAS, Raúl; WEINZETTEL, Pablo; USUNOFF, Eduardo. Resultados preliminares de la estimación del estrés hídrico a partir de temperatura de superficie y NDVI. *Actas II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología Subterránea-Relación aguas superficiales-aguas subterráneas*, 2005, p. 195-202.
- SANDROLINI, Franco; FRANZONI, Elisa. An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings. *Building and environment*, 2006, vol. 41, no 10, p. 1372-1380.
- SARTORI, Ernani. A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces. *Solar energy*, 2000, vol. 68, no 1, p. 77-89.
- SARTORI, Ernani. A mathematical model for predicting heat and mass transfer from a free water surface. En *Advances In Solar Energy Technology*. 1988. p. 3160-3164.
- SARTORI, Ernani. Solar still versus solar evaporator: a comparative study between their thermal behaviors. *Solar energy*, 1996, vol. 56, no 2, p. 199-206.
- SEBASTIÁN, E., et al. Evaluación de la durabilidad de ladrillos mediante técnicas destructivas (TD) y no-destructivas (TND). *Materiales de construcción*, 2003, no 269, p. 41-59.
- SICKELS, Lauren-Brook. Organic additives in mortars. *Edinburgh architecture research*, 1981, vol. 8, p. 7-20.

TORRES, Isabel; DE FREITAS, Vasco Peixoto. The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings. *Construction and building materials*, 2010, vol. 24, no 8, p. 1331-1339.

TORRES, M. Isabel M.; DE FREITAS, Vasco Peixoto. Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation. *Building and environment*, 2007, vol. 42, no 1, p. 424-435.

WACKER-CHEMIE, G. Procedimiento para hidrofugar superficies de materiales de construcción. *Invention Patent*.[\[Links\]](#), 1973.

WILSON, Moira A.; HOFF, W. D.; HALL, Christopher. Water movement in porous building materials—XIV. Absorption into a two-layer composite ( $S_A < S_B$ ). *Building and environment*, 1995, vol. 30, no 2, p. 221-227.

ZHANG, Zhongyi. A review of rising damp in masonry buildings. *Advanced Polymer and Composite Research*, 2010.

## 9.2 BIBLIOGRAFÍA HISTÓRICA

- ALBERTI, Leon Battista, et al. Los diez libros de Architectura/de Leon Baptista Alberto; traducidos de latin en romance..
- BAILS, Benito, et al. *Elementos de matematica... Tom. IX. Parte I, que trata de la arquitectura civil*. 1796. Tesis Doctoral.
- BARBEROT, Etienne. *Tratado práctico de edificación*. Editorial MAXTOR, 1927.
- BRIZGUZ, Athanasio Genaro, et al. *Escuela de arquitectura civil: en que se contienen los rdenes de arquitectura, la distribucion de los planos de templos y casas, y el conocimiento de los materiales*. en la oficina de Joseph de Orga, 1804.
- DE SAN NICOLÁS, Lorenzo. *Arte y vso de Architectura.../Compuesto por Fr. Laurencio de S. Nicolas, Agustino Descalço..*
- DE SAN NICOLÁS, Lorenzo. *Arte y vso de Architectura.../Compuesto por Fr. Laurencio de S. Nicolas, Agustino Descalço..*
- DE VILLANUEVA, Diego; BLANCO, Luis Moya. *Colección de diferentes papeles críticos sobre todas las partes de arquitectura:(Valencia, Benito Monfort, 1766)*. Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, 1979.
- FORNÉS Y GURREA, Manuel. *Observaciones sobre el arte de edificar*. 1857.
- GER-LÓBEZ, F. *Manual de construcción civil. Badajoz: La Minerva Extremeña*, 1898.
- PERRAULT, Claude. *Compendio de los diez libros de arquitectura de Vitruvio*. En la imprenta de D. Gabriel Ramirez, impresor de la Academia, 1761.
- RIEGER, Christian. *Elementos de toda la architectura civil: con las mas singulares observaciones de los modernos*. por Joachin Ibarra, 1763.
- VITRUVIO POLIÓN, Marco, et al. *Los diez libros de Architectura de M. Vitruvio Polión*. 1787.

## 9.3 NORMATIVA

DE LA EDIFICACIÓN, Código Técnico. Madrid: Boletín Oficial del Estado. Ministerio de la Vivienda, 2006.

MV 201-1972. Muros resistentes de fábrica de ladrillo.

NBE FL-90. Muros resistentes de fábrica de ladrillo.

RL 88. Pliego general de condiciones para la recepción de los ladrillos cerámicos en las obras de construcción.

UNE-EN 1015-18. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.

UNE-EN 15801. Conservación del patrimonio. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.

UNE-EN 67019. Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Definiciones, clasificaciones y especificaciones

UNE-EN 67027. Ladrillos de arcilla cocida. Determinación de la absorción de agua por inmersión total en agua fría.

UNE-EN 771-1. Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1. Piezas de arcilla cocida.

UNE-EN 772-11. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11. Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción inicial de las piezas de arcilla cocida para fábricas de albañilería.

UNE-EN 772-13. Determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería (excepto piedra natural).

UNE-EN 772-16. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 16. Determinación de las dimensiones.

UNE-EN 772-2. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Determinación del porcentaje de superficie de huecos en piezas de hormigón para fábrica de albañilería.

UNE-EN 772-20. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 20. Determinación de la planeidad de las caras de piezas para fábrica de albañilería de hormigón, piedra artificial y piedra natural.

UNE-EN 772-21. Determinación de la absorción de agua de piezas para fábrica de albañilería de arcilla cocida y silicocalcáreas por absorción de agua fría.

UNE-EN 772-3. Determinación del volumen neto y del porcentaje de huecos por pesada hidrostática de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.

UNE-EN 772-9. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Determinación del volumen y porcentaje de huecos y del volumen neto, de piezas silicocalcáreas para fábrica de albañilería, mediante relleno de arena.

UNE-EN ISO 12571. Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica.

## 10. ANEXO

# ANEXO: INSTRUMENTAL Y EQUIPAMIENTO

## PREÁMBULO Y JUSTIFICACION

No hubiese sido posible la realización de este trabajo sin la utilización de un instrumental específico y adecuado. La mayoría de los aparatos o máquinas con los que se han llevado a cabo los ensayos formaban parte del equipamiento con el que está dotado el Laboratorio de Construcción de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Valladolid. Otros, al carecer de ellos, han tenido que ser adquiridos por ser necesarios para la realización de algunas pruebas o ensayos descritos en las Normas UNE o necesarios para los ensayos específicos diseñados para esta tesis. Y otros han tenido que ser utilizados en laboratorios externos<sup>93</sup>, bien por el elevado coste de su adquisición, o bien por qué su uso iba a ser muy escaso y no parecía sensata su adquisición para un aprovechamiento tan limitado.

El manejo de alguno de ellos ha sido un reto, en especial la cámara climática y las sondas termohigrométricas, por la complejidad del software y de todos los accesorios periféricos.

## DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTAL

A continuación se enumeran y se describen los distintos tipos de instrumental que se han utilizado para la realización de los ensayos. La descripción de su funcionamiento puede ayudar en algunos casos a comprender mejor el significado y validez de los datos obtenidos.

### 1. Sondas termohigrométricas y periféricos

Ha sido un instrumental fundamental e imprescindible para el desarrollo de las investigaciones. Su función es la de suministrar datos de humedad y temperatura en las diferentes probetas ensayadas.

Se compone de sondas y de una base general que recibe vía telemática la información recogida por aquellas. Es necesario disponer además de un equipo informático y un software específico que gestione los datos generados.

Las sondas se componen a su vez de una base y de un sensor que se sitúa en el extremo de un cable que lo conecta con la base, y que es donde se mide tanto la humedad como la temperatura. La base de la sonda recoge los datos a intervalos que pueden ser modificados por el usuario, y que van desde un minuto hasta varios días. Una vez generados los datos, estos son enviados a una base general que almacena los datos de todas las sondas y los

---

<sup>93</sup> Se han llevado a cabo ensayos en el laboratorio de la empresa General de Morteros, S.A., que nos realizó el ensayo UNE-EN 1015-18:2003. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. También se han realizado observaciones y captaciones de imágenes con microscopio de electrónico de barrido (MEB) en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid, Edificio i + d

vuelca al ordenador donde está instalado el software correspondiente. Como la base de la sonda dispone de una pantalla donde se pueden observar los datos de humedad y temperatura, en algunos casos la toma de los mismos se ha hecho de forma manual, pasándose posteriormente dichos datos a tablas EXCEL con el fin de facilitar el análisis y poder generar las gráficas que tanto han ayudado a interpretar los comportamientos del fenómeno de la capilaridad.



Imagen 149. Imágenes de las sondas y de la base que recoge los datos

Es precisamente el extremo metálico, que va recubierto con una funda y dentro del cual se ubican los sensores, el que se introduce en el interior de las perforaciones que hemos hecho en las probetas ensayadas, con el fin de tomar los datos de temperatura y humedad.

La sensibilidad en la medición de la temperatura es de una décima parte de grado centígrado, y en humedad de una décima parte de uno por ciento.

La base a la que se conectan las sondas y vuelca toda la información es de la marca TESTO, serie SAVERIS, modelo 0572 0221, tiene una transferencia de archivos a través de radio o Interfaz USB, módulo GSM integrado (para alarma SMS), tiene hasta 15 interfaces inalámbricas conectables directamente, con un máximo de 150. Es posible combinar transmisión por radio / router / convertidor / Ethernet, hasta un máximo de 450 canales. De esta forma se encuentra conectada simultáneamente con las sondas, colocadas en las probetas y al ordenador, al cual va volcando datos, bien por intervalos de minuto, de horas, diarios, mensuales, etc. Las especificaciones técnicas se adjuntan a continuación:

- Marca: TESTO SAVERIS
- Modelo: 0572 0221
- Radiofrecuencia: 868 MHz
- Transf. de archivos: Por radio e Interfaz USB
- Clase de protecc.: IP42

- Memoria 40.000 valores por canal

Las sondas que se han utilizado son de la casa TESTO, serie SAVERIS, modelo H4 B. Las especificaciones técnicas se adjuntan a continuación:

- Modelo: 0572 6224
- Clase de protección IP54
- Frecuencia de radio 868 MHz
- Cobertura aprox. 300 m sin obstáculos, frecuencia 868 MHz
- Conexión 1 sonda de humedad externa y conex. mini DIN
- Tª de funcionamiento De -20°C hasta +50 °C
- Tª de almacenamiento De -40°C hasta +55 °C
- Memoria 6.000 valor medio.
- Precisión +- 0,20°C

## 2. Cámara termográfica

La cámara termográfica es un instrumento que genera imágenes de objetos en las que se muestran con diferentes tonos o colores zonas que presentan diferentes temperaturas superficiales. Como el fin fundamental de los ensayos es detectar la presencia de agua, su distribución y su movimiento dentro de argamasas, ladrillos y fábricas, este instrumento, ha sido de una enorme utilidad. Como es conocido, el fenómeno de la evaporación es un proceso endotérmico, es decir que genera una bajada de temperatura en su entorno. Este fenómeno permite que la cámara detecte esos cambios de temperatura, lo cual nos ha permitido tomar imágenes como las anexas que muestran claramente la presencia o ausencia de agua en las probetas.

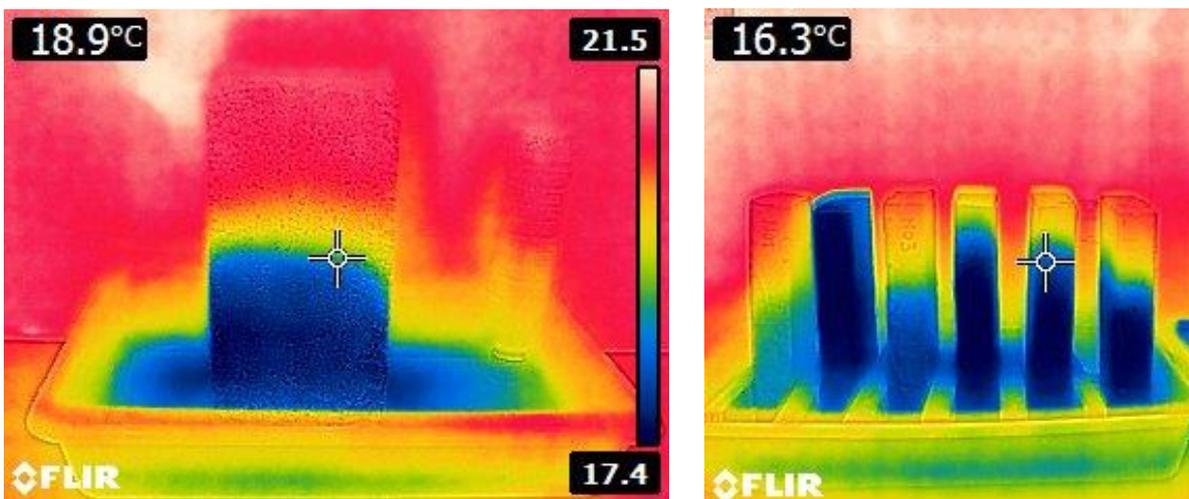


Imagen 150. Imagen tomada con la cámara termográfica sobre probetas de argamasa y ladrillos. Se observa claramente la presencia de agua en las zonas de color azul

Se han utilizados dos tipos de cámara termográfica, la segunda, adquirida con posterioridad al inicio de los ensayos ha suministrado imágenes de mucha más calidad y definición que la primera. Esta última cámara presenta las siguientes características:

- Marca: FLIR
- Modelo: E8
- Precisión: 2,0%
- Resolución: 76 800 píxeles (320 x 240)
- Sensibilidad Térmica: < 0,06°C
- Frecuencia de imagen: 9 Hz
- Campo de visión: 45° x 34°
- Enfoque: Sin enfoque
- Intervalo de tº: De -4 a 482 °F (de -20 a 250 °C)
- Modos de medición: Punto central, área, detección automática de punto caliente/punto frío.

Sus principales características son las siguientes: Pantalla LCD a color de 3", Cámara digital integrada 640 x 48, 2 % de precisión, formato de archivo: JPG radiométrica, modo de medición de puntos, almacenamiento simultáneo de imágenes IR/visuales/MSX, imagen con formato Imagen en Imagen (función PiP), y modo de medición de áreas.

La gran mejora de la última cámara respecto de la primera, es el sistema de "Imagen Dinámica Multiespectral" (MSX) la cual facilita la interpretación de una imagen, añade definición del espectro visible a las imágenes IR mediante la detección de los bordes de los objetos y la inclusión de este detalle en la termografía. El texto se convierte en visible con claridad, de tal modo que se puede leer una etiqueta o identificador dentro de la imagen IR. Esta función exclusiva proporciona detalles térmicos extraordinarios que ponen de relieve y orientan inmediatamente ubicaciones problemáticas y elimina la necesidad de hacer referencia a una imagen visual para obtener información.

Además de lo expuesto la cámara también muestra información, con bastante precisión, de la temperatura del objeto en el punto que enfoca un puntero que aparece en el centro de la pantalla. Además, una barra lateral muestra un degradado cromático que identifica colores con temperaturas.



Imagen151. Cámara termográfica tomando una imagen



Imagen 152. Imagen de la cámara termográfica



Imagen 153. Imagen del estuche con instrumental

### 3. Cámara climática

Este instrumento consta de una cámara hermética, la cual, conectada a unos sistemas de climatización, permite regular en su interior unas condiciones concretas de humedad y temperatura reguladas por el usuario. Aunque no se ha hecho uso de ello, tiene un sistema que permite incluso reproducir condiciones de lluvia en su interior. Es de la marca WEIS TECHNICS, modelo WK3-340/40. Permite tanto un control manual como a través de ordenador, al cual vuelca todos los datos sobre las condiciones climáticas que se generan en el interior del recinto.

Se ha utilizado durante los ensayos con el fin de determinar la cantidad de agua que es capaz de absorber o perder del ambiente una probeta, y en cuanto tiempo se produce una estabilización en ambos procesos.

Las especificaciones técnicas de la cámara climática utilizada se adjuntan a continuación:

- |                           |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| ▪ Marca:                  | WEIS TECHNICS            |
| ▪ Modelo:                 | WK3-340/40               |
| ▪ Tipo de protección      | IP54                     |
| ▪ Volumen interior (l)    | 335                      |
| ▪ Dimensiones interiores  | 580 x 765 x 750mm.       |
| ▪ Dimensiones exteriores  | 780 x 1700 x 1805mm.     |
| ▪ Rango de temperatura    | -45°C → +180°C           |
| ▪ Rango de humedad        | 10% → 98%                |
| ▪ Rango del pto. de rocío | -3°C → +54°C             |
| ▪ Tipo                    | cooling air              |
| ▪ Tipo de refrigerante    | R-404 <sup>a</sup> 2,5kg |

- Valores de calibración +23 °C / 50 % r.h. and +95 °C / 50 % r.h.



Imagen 154. Imágenes de la cámara climática



Imagen 155. Imágenes de la cámara climática

#### 4. Balanzas de precisión y balanza hidrostática

Se han utilizado tres tipos de balanzas, en función de la sensibilidad necesaria y del peso de la probeta. La utilidad principal de este instrumental ha sido la de tomar pesos con el fin de medir el contenido de agua que iban perdiendo o ganando las diferentes probetas ensayadas.

Los modelos son los siguientes:

##### Balanza de precisión GIBERTINI EUROPE 3000 HR

Balanza de precisión marca "GIBERTINI", serie EUROPE, modelo "EU-3000 HR", con una medición máxima de hasta 3300 g., y una precisión de 0,01g. Posee sistema de calibración automática externa, display de siete dígitos con cifra decimal, salida de datos RS-232 I/O, membrana "teckadi" de fácil limpieza a prueba de disolventes, posibilidad de efectuar pesadas hidrostáticas bajo balanza, precisión de célula de carga de transportes, blíster protección polvo y líquidos, plato de acero inoxidable, membrana táctil, y tara sustractiva en toda su capacidad.

- Marca: GIBERTINI
- Modelo: EUROPE3000HR
- Masa máxima: 3300 g

- Masa mínima: 0,1 g
- Tª func. 15°C / 30°C
- Precisión e = 0,10 g  
d = 0,01 g



Imagen 156. Imagen de la báscula pesando una probeta de argamasa

### Balanza industrial D-17 CBKI

Balanza Industrial de marca "COBOS", modelo "D-17 CDKi", con una medición máxima de hasta 17 kG, y una precisión de 1,0 g. Totalmente de acero inoxidable con protección IP-65. Calibración interna automática. Salida RS232C, ISO/GLP/GHP con función calendario y reloj. Pesada hidrostática bajo la balanza. Tiene función comparador (5 posiciones) Checkweighing. Medición de salida en intervalos. Con display fluorescente.

- Marca: COBOS
- Modelo: D-17 CBKI
- Masa máxima: 17 Kg
- Masa mínima: 5,0 g
- Tª func. 5 °C/35°C
- Precisión e = 1,0 g  
d = 0,1 g
- N° de serie 095625003
- N° Aprob. T7527 Rev.0



Imagen 157. Imágenes de la báscula



Imagen 158. Imagen de la báscula. Con los accesorios que permiten su uso como báscula hidrostática

#### **Báscula electrónica MOBBA 454**

Báscula electrónica de marca "Mobba", modelo "454", con una medición máxima de hasta 60 Kg, y una precisión de 20 g, compuesta por dos cuerpos, un primero sobre el que se asienta el cuerpo u objeto a medir, y otro, el de lectura. Este modelo de báscula electrónica tiene muchas de las ventajas propias de los sistemas electrónicos. Entre las mismas, cabe destacar la eliminación de los sistemas de cuchillas, cojinetes y flejes, así como la mayor facilidad de lectura característica de los visores digitales. La captación del peso se efectúa mediante célula central extensiométrica. Lleva incorporado un sistema de protección de sobrecargas.

Hemos usado esta báscula para tomar datos de pesadas realizadas a las fábricas ya que su elevado peso sobrepasaba la capacidad de las otras.

- Marca: MOBBA
- Modelo: 454
- Masa máxima: 60 kg
- Precisión  $e = 20$  g



Imagen 159. Imagen de la báscula

## 5. Medidor de humedad y temperatura ambiente

Dispositivo destinado a tomar los datos de temperatura y humedad ambiente del laboratorio donde se han desarrollado los ensayos.

Es de la marca Testo, modelo 608-H2.



Imagen 160. Imagen de la estación

## 6. Microscópios

Con el fin de observar la estructura interna de las probetas de ladrillo y argamasa, se han utilizado dos tipos de microscópios.

### Microscópio tipo MOTIC SMZ-168 (Stereo zoom microscope)

Dispositivo de ampliación visual de imagen con un zoom de 7,5x - 50x aumentos. Permite acoplar una cámara de fotografía para toma de imágenes. Siendo el modelo de cámara que se adaptó, un modelo Moticam 2300 – 3.0 M Píxel.



Imagen 161. Imagen del microscopio. Foto de la casa

Características técnicas:

- Oculares de campo amplio apareadas 10x / FN23 son 35° inclinadas con ajustes duales dioptrías. Ajuste interpupilar de 52 a 75mm. 60° de inclinación opcional. Diámetro del tubo del ocular es de 30 mm.
- Visualización de la cabeza gira 360°, disponible con cabeza de visión binocular o trinocular.
- Sistema de Greenough óptico con rango de zoom 6,7: 0,75 a 5 veces (7.5x de 50 aumentos con lentes suministrados estándar). Clic positivo para en 7.5x, 10x, 20x, 30x, 40x y 50x. Excelente imagen 3-D enfocado fuerte color corregido sistema óptico acromático parfocalled ofrece toda la gama zoom.
- Distancia de trabajo 113 mm con lentes estándar.
- Rango total de ampliación con lentes opcionales 1.1x-320x.

### **Microscópio Electrónico de Barrido (MEB)**

El microscopio electrónico de barrido ambiental que nos ha suministrado las imágenes de las muestras de las probetas es un modelo Quanta FEG 250 (ESEM). El ESEM Quanta FEG 250 permite trabajar bajo tres diferentes modos de presión, la máxima presión que se puede obtener es de 2600 Pa. Este microscopio permite incluso la observación de muestras biológicas, poco conductoras, sin tratamiento previo ya que se puede controlar la humedad

relativa de la cámara y la temperatura de la muestra para evitar daños durante el tiempo de observación.

Permite aumentar la temperatura de la muestra hasta 1000 °C observando durante dicho proceso de calentamiento los cambios en la topografía del material. Este microscopio de barrido posibilita la desaceleración de electrones sobre muestras no conductoras con lo que obtendríamos resoluciones de hasta 1,4 nm incluso a 1 kV.

Nos ha permitido obtener información acerca de la estructura interna de los materiales y la disposición y tamaño de los poros como se puede apreciar en las imágenes adjuntas en el capítulo correspondiente.



Imagen 162. Imagen del microscopio. Foto de la casa. Imagen obtenida con microscopio de este tipo sobre muestra de argamasa de cal 1:3

## 7. Estufa de secado

Este instrumento consta de una cámara semi-hermética, la cual, conectada a unos sistemas eléctricos de generación de calor, permite aumentar la temperatura del interior de la cámara hasta el valor deseado.

Ha sido un aparato muy utilizado a lo largo del desarrollo de la tesis para la deshidratación completa de las muestras. Para ello se introducían en el interior de la cámara, aumentando la temperatura del aire del hasta alcanzar temperaturas en algunos casos incluso superiores a los 100,0 °C, y manteniéndolas un determinado periodo de tiempo.



Imagen 163. Imágenes de la estufa de secado



Imagen 164. Imágenes de la estufa de secado

## 8. Molde para ejecución de probetas de mortero

Para la fabricación de las probetas de mortero, se ha utilizado un molde normalizado de acero inoxidable, de tal forma que todas las probetas obtenidas tuvieran las mismas condiciones de masa y volumen, según las dimensiones fijadas en las normas UNE para los ensayos a realizar.



Imagen 165. Imagen del molde



Imagen 166. Imagen del molde

## 9. Sierra de corte con aporte de agua

Máquina de corte con sierra circular y con aporte de agua para refrigeración de la superficie seccionada. Permite, escuadrar, pulir cantos y biselar piezas así como cortar toda clase de material para la construcción. Se ha utilizado para cortar los ladrillos que han servido como probetas y con los que se han ejecutado las fábricas.

Es de la marca AUDI, modelo E-Industrial. Sus características son: transmisión de correas directo al eje del motor; dispone de una plataforma que tiene avance transversal, quedando fijada su medida manualmente, y que se desliza montada con ruedas y rodamientos estancos para facilitar la operación del corte; motor eléctrico 5'5/40 H.P.; disco Ø 350 - Ø 600; corte longitudinal: 1.000 mm; y corte transversal: 1.000 mm.



Imagen 167. Imagen de la sierra



Imagen 168. Imagen de la sierra

## 10. Herramientas de albañilería

Se ha empleado instrumental propio de albañilería para la ejecución de las probetas objeto de estudio. Este instrumental es el utilizado usualmente para la ejecución de este tipo de fábricas, tales como paleta, llana, mezcladora, niveles, reglas, calderetas, etc.



Imagen 169. Imágenes de parte del instrumental usado para la preparación de las probetas