



Universidad de Valladolid



PROGRAMA DE DOCTORADO EN ARQUITECTURA

TESIS DOCTORAL:

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN EL
COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN LOS CERRAMIENTOS DE
FÁBRICA DE LADRILLO DEL PATRIMONIO CULTURAL.
PROPUESTA DE ENSAYO PARA EVALUAR EL CONTENIDO DE
AGUA.**

Presentada por Alejandro Cabeza Prieto para optar al
grado de Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:

Dra. Maria Soledad Camino Olea

Dr. Fco. Javier Neila González

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis ha sido una larga travesía compaginada con mi actividad profesional dedicándole a veces más tiempo y otras, menos del que me hubiese gustado, condicionando de forma indudable en la velocidad y la motivación del desarrollo. Durante estos altibajos siempre ha habido en especial dos personas que ha estado detrás empujando, Gracias Marisol y Alfredo.

En segundo lugar, agradezco a mis tutores y directores la Dra. Maria Soledad Camino Olea y el Dr. Fco. Javier Neila González, su inestimable asesoramiento y tutela, y también a compañeros que han estado en primera línea como Alfredo, Jose Maria, Ernesto, Mari Paz y Maria Ascensión, cuyos comentarios, apoyo y su exhaustiva revisión han contribuido a que esta tesis saliese adelante.

No puedo dejarme a todos los profesores, investigadores y personal del Departamento de Construcciones de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Valladolid, que desde el primer momento me han mostrado su apoyo de una forma u otra, y me han acogido como uno más.

Por último, pero no por ello menos importante, gracias a mi familia, a mis padres Julio y Ana Isabel, a mi hermana Victoria, a mis Abuelos Eladio, Lumi, Pilar y Julio, a mis tíos Rosi, Juan, Miguel A. Maria José, Melanie, y en especial a Javier Cabezas, que me ha apoyado siempre en lo duro de la carrera y la profesión y, por último, a Cristina, sin cuyo apoyo y cariño nada de esto hubiese sido posible.

Esta tesis se ha llevado a cabo con el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España para la realización del proyecto de investigación “Propuesta de evaluación de la humedad que asciende por capilaridad en los muros de fábrica del patrimonio histórico mediante ensayos no destructivos” BIA2015-684449.

0. INDICE

0.	INDICE	4
1.	INTRODUCCIÓN JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	8
1.1.	CONTEXTO DE LA INVESTIGACION	8
1.2.	PROYECTO “PROPUESTA DE EVALUACION DE LA HUMEDAD QUE ASCIENDE POR CAPILARIDAD EN LOS MUROS DE FABRICA DEL PATRIMONIO HISTÓRICO MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS - BIA2015-68449”	13
1.3.	HIPÓTESIS DE PARTIDA.....	15
1.4.	PREGUNTAS DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.5.	OBJETIVOS	17
2.	ESTADO DEL ARTE.....	18
2.1.	CÁLCULO SEGÚN NORMAS ISO EN-10456.....	23
2.2.	CÁLCULO SEGÚN NORMA EN-1745	24
2.1.	CÁLCULO DE CONDUCTANCIA SEGÚN NORMA ISO 9869-1.....	24
3.	MATERIALES Y METODOLOGIA.....	26
3.1.	OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS. ENSAYO A LOS MATERIALES	28
3.1.1.	ARGAMASA.....	29
3.1.2.	LADRILLOS.....	30
3.1.3.	Ensayos realizados en el laboratorio de la ETSAVa	33
3.1.4.	Ensayos realizados en laboratorios externos de la ETSAVa	35
3.2.	ENSAYOS A LAS PROBETAS	40
3.2.1.	ENSAYOS PREVIOS	40
3.2.2.	ENSAYOS GENERALES	43
3.3.	ENSAYOS “IN SITU”	53
	EQUIPO UTILIZADO PARA ENSAYOS “IN SITU”	56
3.4.	SIMULACIÓN ENERGÉTICA.....	60
4.	ARTÍCULOS QUE RESPALDAN EL TRABAJO DE LA INVESTIGACIÓN	64
4.1.	MOISTURE INFLUENCE ON THE THERMAL OPERATION OF THE LATE 19TH CENTURY BRICK FACADE, IN A HISTORIC BUILDING IN THE CITY OF ZAMORA.	66
4.1.1.	Abstract	66
4.1.2.	Reference.....	66
4.1.3.	Contribución del Doctorando	66
4.2.	THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THE MASONRY OF HANDMADE BRICK CULTURAL HERITAGE WITH RESPECT TO DENSITY AND HUMIDITY.	67

4.2.1.	Abstract	67
4.2.2.	Reference	67
4.2.3.	Contribución del doctorando	67
4.3.	COMPARATIVE ANALYSIS OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF HANDMADE AND MECHANICAL BRICKS USED IN THE CULTURAL HERITAGE.	68
4.3.1.	Abstract	68
4.3.2.	Reference	68
4.3.3.	Contribución del doctorando	68
5.	RESULTADOS	69
6.	CONCLUSIONES	71
6.1.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	73
7.	BIBLIOGRAFIA	74
8.	DIFUSIÓN CIENTÍFICA	85
8.1.	ARTÍCULOS CIENTÍFICOS DE LA TESIS	85
8.2.	ARTÍCULOS COMPLEMENTARIOS	86
8.3.	CONFERENCE PAPERS.....	86

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Iglesia de Nava de la Asunción, Segovia, (Llorente 2017).	9
Figura 2. Viv. en Serrada (Llorente 2017).....	10
Figura 3. La Seca, Valladolid. (Llorente 2017)	10
Figura 4. Relación entre contenido de humedad y conductividad térmica para varios materiales aislantes a 10°C. (Millán García, 2010)	19
Figura 5. Cinco tipos de ladrillo en el laboratorio. Después de su proceso de limpieza tras su recuperación en demoliciones.	30
Figura 6. Esquema de proceso de ensayos a los materiales.	30
Figura 7. Ladrillos de diferentes formas de fabricación, de tejar, extrusionados y prensados.	31
Figura 8. Ladrillos de recuperación tras los ensayos a los materiales, preparados para la construcción de la probeta.	31
Figura 9. Localizaciones de donde se han obtenido los ladrillos para los ensayos.	32
Figura 10. Ladrillo recuperado de Arévalo (Ávila).....	33
Figura 11. Ladrillos recuperados.	33
Figura 12. Ejemplo resultado del análisis mineralógico del ladrillo 7 realizado por la Universidad de Granada.	35
Figura 13. Algunas de las muestras enviadas a ensayo de porosimetría de mercurio	36
Figura 14. Resultado ensayos de porosimetría de mercurio de varias muestras de ladrillos.....	38
Figura 15. Ficha tipo sobre un total de 14, de toma de datos de los materiales.	39
Figura 16. Cámara climática, caja fría y sistema de re-circulación del aire.....	40
Figura 17. Caja fría y probeta de fábrica.	41
Figura 18. Esquema de proceso de ensayos en laboratorio.....	43
Figura 19. Levantamiento de la caja guardada diseñada para los ensayos.	44
Figura 20. Despiece de placas de XPS de espesor 50mm.....	45
Figura 21. Construcción de la cámara.	45
Figura 22. Construcción de la cámara	45
Figura 23. Probeta siendo pesada para determinar su peso seco.	46
Figura 24. Levantamiento de una de las probetas.	47
Figura 25. Fotografía de alzado de una de las probetas con ubicación de la placa de flujo.	47
Figura 26. Probeta en laboratorio saturada. Preparada para el inicio del ensayo.....	47
Figura 27. Probeta en recipiente de polietileno para inicial el proceso de saturación.....	47
Figura 28. Ficha toma de datos de ensayo en laboratorio. Ladrillo de tejar antiguo de Arévalo. ...	48
Figura 29. Placa de flujo térmico, termopares y base de laboratorio para toma de datos.	49

Figura 30. Documentación del fabricante de la placa de flujo. ALMEMO®	50
Figura 31. Cámara abierta, pesando la probeta.....	50
Figura 32. Cámara abierta, pesando la probeta.....	50
Figura 33. Toma de datos durante el ensayo. Flujo térmico y tª superficiales. (Artículo 2).....	51
Figura 34. Contenido de agua de la probeta y variación de la conductividad térmica. Artículo 2 ...	52
Figura 35. Variación de la conductividad térmica en función del contenido de agua (artículo 3). ...	52
Figura 36. Esquema de proceso de ensayos “in situ”.	53
Figura 37. Casa Luelmo, Valladolid, Donde se realizó uno de los ensayos “in situ”.	54
Figura 38. Escuela de Arquitectura, Valladolid, Donde se realizó uno de los ensayos “in situ”.	55
Figura 39. (a) placa de flujo térmico rígida (b) placa de flujo térmico flexible; (c) sonda de temperatura; (d) Data logger.	56
Figura 40. Toma de datos de ensayo “in situ”. Temperatura superficial, aire, flujo int. y ext.	58
Figura 41. Cálculo del valor de conductancia térmica con valores acumulados durante el ensayo.	58
Figura 42. Ficha tipo de ensayos “in situ”. Ensayo de vivienda en Serrada, Valladolid.	59
Figura 43. Esquema de calibración de modelo energético	61
Figura 44. Calibración del modelo energético. (Artículo 1)	62
Figura 45. Simulaciones con diferente grado de humedad en las fábricas de ladrillo. (Artículo 1) .	62
Figura 46. Ábaco conductividad – contenido de agua flujo térmico y espesor de aislamiento equivalente. (Artículo 1)	63

Nota: Las figuras donde no se cita el autor son fotografías / documentos del proyecto de investigación BIA2015-68449

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de ladrillo ensayados	32
Tabla 2. Ensayos realizados sobre los ladrillos.....	33
Tabla 3. Ensayo mineralógico de todos los tipos de ladrillo estudiados en esta tesis.....	35
Tabla 4. Ensayos de porosimetría de mercurio.....	37
Tabla 5. Ensayos previos. Resultados de los ensayos sobre los materiales y probeta	41

1. INTRODUCCIÓN JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1.1. CONTEXTO DE LA INVESTIGACION

El Patrimonio Cultural

Para la sociedad, el Patrimonio Cultural es un gran valor, desde perspectivas culturales, medioambientales, sociales y económicas. Así pues, su gestión sostenible constituye una estrategia para el siglo XXI contemplada por la Unión Europea, la cual establece la necesidad de una gestión con un enfoque integral que permita su conservación para generaciones venideras, entre las que se incluye también la eficiencia energética.

Ante cualquier intervención en edificios existentes relativo a la eficiencia energética, un primer paso fundamental es la caracterización de la configuración arquitectónica del edificio objeto. En muchas ocasiones esta caracterización se realiza por medios destructivos, tales como extracción de probetas, catas, pruebas de carga etc., pero, como parece obvio, este tipo de ensayos no son aceptables en la mayoría de los inmuebles del Patrimonio Cultural, por lo que se hace necesario definir métodos no destructivos que permitan conocer el estado actual de los inmuebles, como actuación previa a posibles intervenciones. Por este motivo, diversos comités y equipos de investigación han elaborado guías, normas y han desarrollado metodologías encaminadas a la intervención en el Patrimonio Cultural, haciendo especial hincapié en los últimos tiempos, en propuestas para mejorar la eficiencia energética (Yu et al., 2019) (Litti et al., 2015a).

En general, estas propuestas para la mejora de la eficiencia energética y, en concreto para la reducción de la demanda, se basan en mejorar parámetros como la transmitancia en muros de fachada proponiendo soluciones constructivas que incluyen el adosado o inclusión de hojas de aislamiento térmico en los cerramientos, lo que no es posible en muchos edificios del patrimonio, por lo que se hace necesaria la búsqueda de nuevas alternativas.

La Humedad como una de las principales patologías del Patrimonio

Centrados en la problemática de este tipo de inmuebles, corresponde de forma previa destacar las lesiones que provoca la presencia de agua o de humedad en los elementos y sistemas constructivos. En el caso específico de edificios construidos con fábricas de muros de ladrillos,

hay que tener en consideración que la humedad puede llegar a provocar lesiones capaces de afectar a su integridad, o a los parámetros térmicos. Estos materiales se caracterizan por ser porosos, susceptibles de absorber cantidades importantes de agua del terreno y de la lluvia con mayor facilidad que otros, por lo que es importante conocer en ellos el contenido de agua antes de iniciar intervenciones, aunque es realmente difícil medir este contenido de agua (Degiovanni & Moyne, 1987) (Pavlik et al., 2013a). Como se observa en la Figura 1, 2 y 3 las humedades por ascensión capilar pueden alcanzar con facilidad alturas de un metro.



Figura 1. Iglesia de Nava de la Asunción, Segovia, (Llorente 2017).

Cabe destacar que este trabajo se centra principalmente en el estudio de edificaciones y sistemas constructivos de una zona de Castilla y León, en concreto la zona sur de provincia de Valladolid, y las zonas limítrofes de las provincias de Ávila, y Segovia, que se amplió durante la investigación a las provincias de León y Zamora, para incluir otros tipos de ladrillos y de edificios donde hacer ensayos “in situ”.

Actualmente existen distintos procedimientos de cálculo que permiten determinar el contenido de agua o humedad, siendo la norma **“UNE EN 16682 Conservación del Patrimonio Cultural. Métodos de medición del contenido de humedad o contenido de agua, en**

materiales constitutivos del Patrimonio Cultural inmueble”, el documento en el que se integran diversos de estos procedimientos.

Se pretende, sin embargo, dentro de los estudios que nos ocupan investigar para definir otro método a través del cual, de forma indirecta, se pueda llegar a estimar el contenido de agua en un muro de ladrillo con la combinación de ensayos no destructivos “in situ”, y de ensayos en laboratorio. La presente investigación se enmarca dentro de este contexto, en la búsqueda de una forma de estimar el contenido de agua de las fábricas antiguas y, de como esta humedad afecta al comportamiento térmico de los muros.

De la observación de este fenómeno en las edificaciones tradicionales ejecutadas con este tipo de fábricas, se enmarca el proyecto de investigación “BIA2010-19245. PROTECCION FRENTE A LA HUMEDAD DE LAS FÁBRICAS ANTIGUAS DE LADRILLO AL DESCUBIERTA. ESTUDIO DEL EMPLEO DE HIDROFUGANTES EN SU RESTAURACIÓN”.



Figura 2. Viv. en Serrada (Llorente 2017)



Figura 3. La Seca, Valladolid. (Llorente 2017)

La humedad en edificación puede ser causada por diferentes motivos:

- El primer de ellos es la filtración, es decir, cuando existe agua en las inmediaciones de la edificación y se filtra a través de elementos de envolvente al interior de la edificación o bien al interior de los elementos constructivos.
- El segundo es la ascensión capilar, siendo ésta una patología que tiene que ver con la existencia de humedad en el terreno, y la absorción de la misma por los elementos constructivos en contacto con este.
- El tercero es la absorción del agua de lluvia de los elementos constructivos, especialmente de fachada (Camino-Olea et al., 2019).
- En cuarto lugar, las condensaciones intersticiales producidas por el paso de vapor de agua a través de los cerramientos y las temperaturas intersticiales.

- Otra razón es la condensación superficial (habitualmente por puente térmico), la cual se produce especialmente por un defecto de aislamiento, más acusado en climas fríos, o lo que es lo mismo, excesiva transmitancia térmica de ciertos elementos de la envolvente, de tal forma que se genera un punto “frio” por debajo de la temperatura de rocío, en contacto con el aire calefactado interior.
- Finalmente, están las causas accidentales que son imprevisibles, como por ejemplo fugas de agua, lluvias torrenciales, etc.

Diversos autores y estudios, como los llevados a cabo por (Selvarajah & Johnston, 1995), exponen que entre el 30 y el 50% de las lesiones de las edificaciones, están asociados con la humedad.

Esta patología constructiva, puede provocar importantes perjuicios, tanto desde el punto de vista de la conservación de los edificios, como desde el punto de vista de la salud humana. Entre las lesiones constructivas relacionadas con la humedad se pueden enumerar: eflorescencias, criptoeflorescencias, organismos, disgregación por heladicidad, deterioro del material de revestimiento y disminución de la capacidad aislante, siendo este último en el que se va a centrar la presente tesis doctoral.

La Eficiencia Energética en el contexto del Patrimonio Cultural

Existe una disyuntiva a la hora de abordar las intervenciones para conservar y restaurar el Patrimonio Cultural (Lucchi & Pracchi, 2013). Por un lado, están los estudios que se centran en la importancia de mantener los valores patrimoniales y, por otro lado, y diametralmente opuestos, los estudios que abordan la sostenibilidad ambiental, centrándose principalmente en medidas de eficiencia energética (Lidelöw et al., 2019a). Evidentemente, la solución ideal es poder conseguir ambos retos, si bien, para poder abordar el segundo de ellos, y rebajar el gasto energético, se hace necesario conocer el funcionamiento térmico de la envolvente y en concreto de las fachadas, ya que estas constituyen el mayor porcentaje de superficie de esa envolvente (de Santoli, 2015).

Para conocer el funcionamiento térmico de la envolvente, se plantea realizar un estudio mediante el método de flujo térmico “in situ” según norma **ISO 9869-1**. Este método, realizado “in situ”, permite calcular el flujo térmico que atraviesa un muro de fachada cuando existe diferencia de temperatura entre ambas caras (Lucchi, 2017) (P Baker, 2011), de manera que, con este valor y el de las temperaturas superficiales, exterior e interior, se pueda calcular la conductancia térmica del mismo (Cesaratto & de Carli, 2013).

Cuando se realiza el ensayo de flujo térmico no se suele analizar la influencia del contenido de agua en los valores que se obtienen y que puede ser significativa, especialmente en edificios con muros macizos de gran espesor (Lidelöw et al., 2019b). Este contenido de agua puede ser

determinante en el comportamiento térmico de los edificios y es necesario conocer este parámetro para realizar propuestas de intervención que hagan posible una mejor y mayor utilización de los edificios controlando el consumo energético necesario para mantener el confort y la habitabilidad (Calzolari, 2016) (Litti et al., 2015a).

La influencia de la humedad en la conductancia de los muros

Como ya se ha avanzado, la hipótesis que se aborda en la presente tesis doctoral está basada en la variabilidad de la conductancia térmica de un muro en función del contenido de agua presente en los poros, de manera que, a mayor contenido de agua, mayor conductancia (Litti et al., 2015b).

Como se ha deducido de estudios anteriores, (Camino-Olea et al., 2019; Llorente-Álvarez, 2018) en las fábricas de ladrillo antiguo se pueden alcanzar valores de contenido de agua en torno a los 250 l/m³. Cuando esta absorción se produce en muros de espesores importantes, frecuentes en edificios que pertenecen al Patrimonio Cultural, además de provocar graves daños, la diferencia entre la resistencia térmica de un muro seco y un muro húmedo puede llegar a alcanzar valores elevados. Por lo tanto, y en relación a lo expuesto, este alto contenido de agua de los muros hace que aumente el flujo de calor cuando existe gradiente térmico entre sus caras en comparación con un estado seco del mismo.

Es decir, estamos manejando **dos variables dependientes entre sí**, el flujo de calor y el contenido de humedad. De este modo, conociendo una de ellas, se podría llegar a estimar el valor de la otra. En este trabajo se parte de conocer el flujo térmico mediante ensayos para estimar el contenido de agua.

1.2. PROYECTO “PROPUESTA DE EVALUACION DE LA HUMEDAD QUE ASCIENDE POR CAPILARIDAD EN LOS MUROS DE FABRICA DEL PATRIMONIO HISTÓRICO MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS - BIA2015-68449”

Esta Tesis se enmarca en el proyecto de investigación “**PROPUESTA DE EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD QUE ASCIENDE POR CAPILARIDAD EN LOS MUROS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO HISTÓRICO MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**” (BIA2015-68449), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad / Ciencia e Innovación del Gobierno de España. Y es igualmente resultado de los trabajos desarrollados por el equipo de investigadores, al que pertenezco como investigador, y que lleva años investigando sobre fábricas y sistemas constructivos del Patrimonio Cultural edificado con ladrillo.

El proyecto, que abarcó el periodo desde 2016 hasta 2019, fue coordinado desde la Universidad de Valladolid por la investigadora principal Dra. María Soledad Camino Olea. En el proyecto participaron investigadoras de otras universidades: Universidad de Salamanca y la Universidad de Granada.

El equipo de investigación, estuvo formado por: Dra. María Soledad Camino Olea, Dra. María Ascensión Rodríguez Esteban, Dra. María Paz Sáez Pérez y Dr. Alfredo Llorente Álvarez y colaboraron como técnicos de laboratorio y colaboradores en la realización de los ensayos D. José M^a Olivar Parra y D. Ernesto Martín Aldudo.

Los principales **objetivos que pretendía alcanzar el proyecto BIA2015-68449:**

Diseñar un procedimiento de ensayo que permitiese estimar el contenido de agua de un muro de fábrica al establecer una relación entre los resultados de otros ensayos tras la obtención de los siguientes datos:

- La transmitancia y conductancia térmica de los muros mediante ensayos de flujo.
- La humedad mediante método gravimétrico.
- La caracterización de los materiales que forman parte del muro, principalmente absorción, porosidad y composición química.;

Para ello se localizaron 14 tipos de ladrillo de diferentes procedencias. Con ellos se construyeron probetas de ladrillo con las que se realizaron ensayos de flujo térmico, basados en la norma ISO 9869-1. A partir de los valores obtenidos en los ensayos de flujo térmico y temperaturas superficiales, se obtuvo la conductividad térmica de la probeta.

El ensayo se realizó a probetas desde el estado saturado a seco, para establecer la relación entre el coeficiente de conductividad y su contenido de agua.

Previamente, a estos ladrillos utilizados para construir las probetas se realizaron varios ensayos de caracterización, con el fin de conocer: la densidad, la porosidad (laboratorio de construcción de la ETSA de Valladolid), sus características mineralógicas (Universidad de Granada) y el ensayo de posimetría de mercurio (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja).

Al tiempo se realizaban ensayos de flujo térmico “in situ” a fachadas con tipos de ladrillo similares a los ensayados en laboratorio. Con los resultados de los dos ensayos, por comparación, se ha podido hacer una estimación del contenido de agua de la fachada.

En este contexto, **el doctorando contribuyó participando de forma activa en la realización de las siguientes tareas:**

- Búsqueda de antecedentes y artículos que trataran sobre el tema, localizando diversas publicaciones relativas a la eficiencia energética de los edificios del Patrimonio Cultural.
- Diseño y Construcción de la primera caja aislada de menor tamaño y realización de dos ensayos previos (<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/40289>) de flujo térmico siguiendo el procedimiento de la norma ISO 9869-1.
- Diseño y construcción de una cámara térmica, fuertemente aislada, con dos puertas enfrentadas para poder realizar dos ensayos simultáneamente. En ella se instaló un equipo de frío para poder simular una situación climática de invierno en el interior de modo que la diferencia entre la temperatura del laboratorio y de la cámara fuera superior a 15 °C. Se diseñó de tal forma que las probetas se pudieran ir pesando para conocer la cantidad de agua que se había evaporado durante el ensayo.
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/40100>
- Realización de los ensayos de flujo térmico a las probetas ejecutados con cada tipo de ladrillo, (procedimiento Norma ISO 9869-1).
- Análisis de los resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio hasta relacionar los datos de temperatura, conductividad térmica con otras características de los materiales entre los que se encuentran el contenido de agua, densidad y porosidad.
- Desarrollo del procedimiento de ensayo “in situ” y realización de ensayos en los edificios seleccionados.
- Análisis de los resultados de los ensayos “in situ”, de manera similar a los de los ensayos en laboratorio.

- Realización de simulaciones energéticas a partir de los datos obtenidos en laboratorio y de los datos obtenidos “in situ”.
- Difusión de los resultados en publicaciones científicas: artículos y comunicaciones a congresos.

1.3. HIPÓTESIS DE PARTIDA

La hipótesis de partida de esta investigación surge de la relación entre la conductividad y la humedad que aparece descrita en las normas UNE EN-1745 y UNE EN ISO 10456, así como en la bibliografía consultada (Andreotti et al., n.d.; Campanale & Moro, 2016; Litti et al., 2015b; Vololonirina et al., 2014), donde se expone que los materiales y, en concreto las fábricas de ladrillo se comportan térmicamente de forma diferente en función de su contenido de humedad.

En base a esto se pretende, a partir de valores de los ensayos de flujo térmico según la norma ISO-8969-1 realizados a probetas y fábricas de ladrillo “in situ”, con diferentes contenidos de humedad, relacionar dos variables, contenido de agua de la fábrica, y conductividad termica (Ficco et al., 2015).

Por otro lado, en la normativa y en diversas publicaciones científicas (Dondi et al., 2004; García Ten et al., 2010a; Haffen et al., 2017; Lucchi, 2017; Lucchi et al., 2018; Pérez-Bella, Domínguez-Hernández, Cano-Suñén, del Coz-Díaz, et al., 2015; Rotilio et al., 2018; Sumirat et al., 2006), se relaciona la conductividad con la densidad y porosidad del material, en este caso el ladrillo y dado que la densidad del mismo es un parámetro sencillo de obtener, en este trabajo se pretende relacionar las tres variables.

A partir de datos previos obtenidos mediante ensayos de laboratorio de diferentes tipos de ladrillo (diferente densidad, método de fabricación, porosidad, etc.) que relacionan estas tres variables, se puede analizar los resultados de los ensayos “in situ” de flujo térmico y llegar a estimar el contenido de agua de una fábrica. La simulación energética basada en los datos obtenidos de los ensayos, permite evaluar el comportamiento de las fachadas en condiciones diferentes a las de los ensayos realizados.

1.4. PREGUNTAS DE LA INVESTIGACIÓN

Esta Tesis pretende contribuir a completar el conocimiento sobre la influencia del contenido de agua en el comportamiento térmico de las fábricas antiguas de ladrillo macizo, así como diseñar un método para evaluar ese contenido de agua. Se plantea las siguientes preguntas de investigación:

¿Se puede llegar a determinar la cantidad de agua que contiene una fábrica de ladrillo macizo a partir de la medición de la conductividad térmica “in situ”?

A partir del ensayo de flujo térmico “in situ” de una fachada y de la caracterización en laboratorio de los materiales componentes se podría llegar a estimar el contenido de agua. A esta cuestión se responde en el [artículo 1](#).

¿Es posible cuantificar las pérdidas de energía cuando la fábrica se encuentra húmeda en comparación a cuando se encuentra seca?

“In situ” se pueden realizar ensayos en zonas secas y húmedas, y cuantificar la diferencia, o bien, se puede llegar a los mismos resultados a partir de un ensayo “in situ” y los datos de los ensayos de laboratorio de piezas similares. Esta cuestión se responde en el [artículo 1](#).

¿Es posible mediante ensayos de laboratorio sobre distintos tipos de fábricas, obtener datos que relacionen la conductividad térmica, el contenido de agua y la densidad para poder estimar el contenido de agua de una fachada similar?

En edificios antiguos es difícil obtener suficientes muestras para caracterizar los materiales como para valorar los resultados de flujo térmico “in situ”. Por eso lo que se deben realizar ensayos en laboratorio para tener información sobre el comportamiento de materiales utilizados en una zona concreta. Esta cuestión se responde en el [artículo 2](#).

¿Existe diferencia en el comportamiento entre ladrillos con diferente proceso de fabricación?

Dado que en el Patrimonio Cultural nos podemos encontrar con edificios construidos con ladrillos hechos a mano y ladrillos mecánicos que presentan “a priori” características diferentes en cuanto a densidad y porosidad por el sistema de fabricación, entendemos que hay que evaluar esta posibilidad, ya que las normas y documentos técnicos, en general, no se establecen diferencias para los ladrillos macizos. Esta pregunta se responde en el [artículo 3](#).

1.5. OBJETIVOS

En base a lo expuesto, **el objetivo principal es, poder estimar el contenido de agua en una fábrica de ladrillo macizo antiguo, a partir del valor de conductancia obtenido mediante ensayo de flujo térmico.**

Como objetivos secundarios, se establecen los siguientes:

- Comparar los valores que ofrecen las normas actuales para ladrillos modernos, con los datos obtenidos de ladrillos antiguos.

Para conseguir este objetivo, se estima que es valioso generar un ábaco que relacione las tres variables mencionadas en apartados anteriores, conductividad térmica, contenido de agua y densidad para cada tipo de ladrillo.

- En laboratorio es posible diseñar un ensayo en el que se relacione la conductividad térmica con el contenido de agua y la densidad de un material o de una fábrica, en este caso. Por lo que, en este trabajo, se pretenden desarrollar ensayos para llegar a definir un método para definir un ábaco con esas variables, para un tipo de ladrillo y fábrica concreta, de manera que, a través del mismo, conociendo la conductividad térmica de un muro “in situ”, se pueda deducir su contenido de agua.
- Evaluar la influencia que tiene la presencia de humedad en los elementos que conforman la envolvente de un edificio en su comportamiento térmico.

Esto nos permite valorar la eficacia de los tratamientos contra la humedad no solo desde el punto de vista de la salubridad, la conservación, o la estética, sino también desde el punto de vista de la mejora de la eficiencia energética, y hacer propuestas que eviten intervenciones invasivas añadiendo hojas de materiales aislantes.

2. ESTADO DEL ARTE

Diversos autores, han analizado la relación entre la conductancia y/o conductividad térmica de los muros en estado seco y estado húmedo, llegando a diferentes relaciones entre ambas (Pavlík et al., 2013b) (Pérez-Bella, Domínguez-Hernández, Cano-Suñén, del Coz-Díaz, et al., 2015). Todos ellos coinciden que una fábrica presenta unos valores de conductancia superiores en estado húmedo que en estado seco.

Los ladrillos que se fabrican en la actualidad tienen unas características muy homogéneas, sin dispersiones importantes, todo lo contrario de lo que, previsiblemente, puede suceder en los ladrillos antiguos. Esto es debido a que los primeros se fabrican de manera industrial, bajo un riguroso control de fabricación, mientras que los ladrillos antiguos, este control es menor. Como resultados se obtienen ladrillos con una densidad y porosidad variable en las distintas piezas y por tanto, también la conductividad térmica, tal y como señalan diversos autores (García Ten et al., 2010a), (Azizi et al., 1988; Moyne et al., 1988). En el caso de la argamasa de cal y arena ocurre de manera similar aunque, por lo que se expondrá más adelante, se utilizará la misma argamasa para todos los casos de estudio, de tal forma que las diferencias en los resultados sean debidas únicamente a la variación del tipo de las piezas cerámicas.

Cuando se realizan cálculos y estimaciones de la demanda de energía debido a las pérdidas a través de la fachada es habitual trabajar con valores teóricos que figuran en normativa como la EN 1745. Por lo que para tener datos de ladrillos antiguos es necesario realizar ensayos que verifiquen la capacidad térmica de los materiales que fueron utilizados para construir estos edificios y conocer la influencia de la humedad.

Diversos autores estudian como presencia de agua en los cerramientos influye en la disminución de la resistencia térmica de la envolvente, lo que significa el deterioro de la capacidad de aislamiento térmico (de Freitas et al., 1996) (Gawin et al., n.d.), (Bondi & Stefanizzi, 2001) (Dell'Isola et al., 2012).

El impacto del contenido de humedad en la resistencia térmica de la envolvente particularmente en las fachadas exteriores, está generado por el aumento del valor de la conductividad térmica siendo esta propiedad de los materiales dependiente, además de otras características del material, del contenido de agua, como lo avalan estudios realizados por

Treschel y Kunzel (Trechsel, 1994) (Künzel & Kiessl, 1996)

Se han estudiado diversas experiencias como la llevada a cabo por Vasile (Vasile et al., 1998) en el cual se defiende que el valor del flujo térmico en ladrillos huecos puede variar en torno al 20% según el grado de humedad. Existen también experiencias similares con otros materiales, como madera, etc. (Bal et al., 2013; Vololonirina et al., 2014), obteniendo conclusiones en la misma línea.

Profundizando en lo anterior, se han estudiado también varias relaciones y ecuaciones para explicar la correlación entre estas propiedades. Estas ecuaciones ligan la conductividad térmica con la capacidad de los materiales para permitir la transferencia y el almacenamiento de humedad (Ojanen & Kumaran, 2016) y con la temperatura, la difusividad, la capacidad térmica, densidad, y contenido de humedad entre otros de menor repercusión.

Existen diferentes métodos, y algunos autores han comparado varios con el objeto de medir la transmitancia térmica en los muros, como (Choi & Ko, 2017) que estudia métodos mediante placa de flujo térmico y termografía infrarroja dando resultados satisfactorios y validando el método.

Lo anteriormente expuesto está relacionado con la presencia de agua líquida en los poros y en sus interconexiones, ya que determina un valor de conductividad térmica mucho mayor que si estos mismos espacios estuvieran rellenos de aire o incluso aire húmedo, ya que la conductividad térmica del agua es en torno a treinta veces superior a la del aire en calma, tal y como se puede apreciar en la Figura 4.

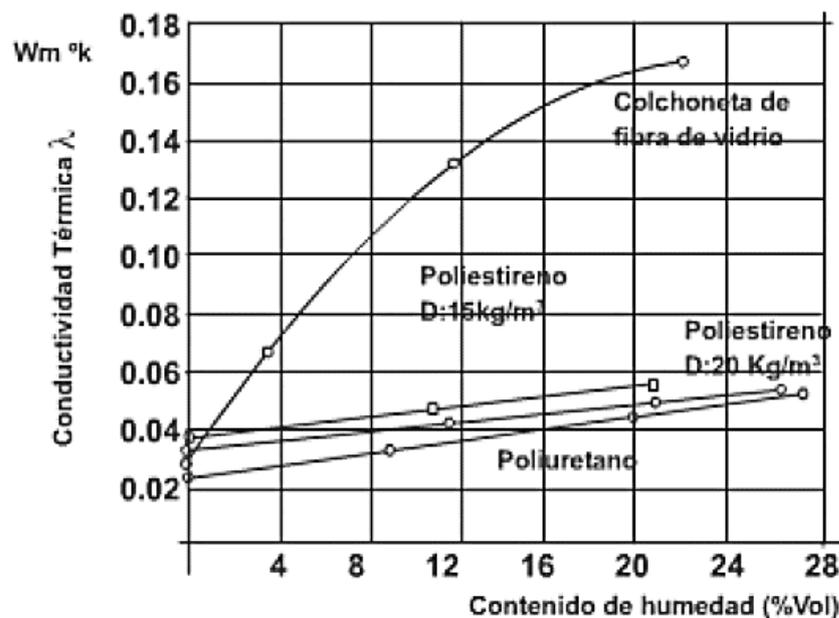


Figura 4. Relación entre contenido de humedad y conductividad térmica para varios materiales aislantes a 10°C. (Millán García, 2010)

En la tesis doctoral titulada “Influencia de la humedad en la transmitancia térmica de los cerramientos y en la demanda energética de los edificios”, realizada por D. José Antonio Millán García, y dirigida por el Dr. José María P. Sala Lizarraga, leída en el año 2010 (Millán García, 2010). El autor, realiza tanto ensayos “in situ”, como simulaciones energéticas por ordenador.

D. José Antonio Millán, destaca que para determinar correctamente la conductividad térmica es necesario impedir la transferencia de agua durante el ensayo, o bien, establecer las condiciones para que se pueda estimar con precisión este efecto en la medición. Se expone igualmente que se puede despreciar su efecto en los ensayos en los que los movimientos de humedad sean reducidos, de forma que las repercusiones de los cambios de fase durante el ensayo no sean significativas. En base a esta última premisa, se diseñan los ensayos de la presente tesis doctoral, donde los ensayos son muy lentos por lo que se considera despreciable. En esta tesis parte de la humedad de los materiales es tomada desde el ambiente, sin embargo, el presente estudio se pretende estudiar contenidos de humedad en los materiales mucho más altos que con la absorción desde ambiente (Camino et al., 2014), como se ha venido estudiando y demostrando desde hace varios años por el grupo de investigación. Esta diferencia, sumada a los equipos necesarios, hace que se deban adaptar los ensayos al caso de estudio que nos ocupa.

El autor hace un estudio muy exhaustivo, tanto mediante simulación energética, (Software COMOSOL: simulación de elementos finitos), como mediante ensayos de laboratorio. Realiza variaciones de los perfiles de humedad durante el ensayo. Simulación mediante WUFI Pro de perfiles de humedad durante el ensayo. Realiza también un análisis de los tiempos de acondicionamiento de las muestras y su relación con el número de Fourier, así como diferentes formulaciones para determinar el tiempo de acondicionamiento de muestras.

En el mencionado trabajo, se diseña una caja caliente guardada, similar a la que se construirá para la realización de los ensayos pertenecientes a esta tesis doctoral en la parte de “ensayos en laboratorio”. El equipo no dispone de control de humedad en las cámaras, solo de temperatura.

El autor estableció que las condiciones de humedad en la cámara fría cuando se fija una temperatura de aire a 0,00°C, está en torno al 90%, mientras que, en la cámara caliente con temperatura del aire de 20,00°C, la humedad relativa se estabiliza en torno a valores del 40%. Con estas condiciones, el autor realizó simulaciones con WUFI Pro del flujo de humedad durante el periodo de medida en la caja caliente, obteniendo los siguientes resultados:

En líneas generales, la tendencia durante el tiempo de ensayo en la cámara es de incremento del contenido de humedad de los componentes de la muestra. El movimiento de humedad hacia la probeta es inexorable por el desequilibrio que se genera entre las presiones de vapor de las cámaras y en los poros de los materiales de la probeta, al fijar las temperaturas de las cámaras caliente y fría.

Para evitar el efecto de la migración y redistribución de la humedad durante el ensayo de transmitancia térmica y su efecto sobre la transferencia térmica, el autor, propone la modificación del protocolo de medida y la preparación de las muestras, incorporando una lámina adicional que limite la transferencia de vapor superficial entre los ambientes de las cámaras caliente y fría.

En esta misma línea, Berardinis (de Berardinis et al., 2014), realiza estudios clasificando tipos de mampostería histórica, mediante ensayos “in situ” destinada a determinar el valor de la transmitancia térmica (U) de las mamposterías, estimando soluciones de sistemas secos y no secos, evaluando para cada caso la mejora del comportamiento energético poniendo especial énfasis en las singularidades de cada caso de los edificios históricos.

En línea con todo esto, existen varios proyectos europeos que abordan problemáticas similares a las expuestas.

Entre ellos, se encuentra el proyecto **“Co2olBricks” -Climate Change, Cultural Heritage and Energy-Efficient Monuments Is a Project in the Framework of the Baltic Sea Region Programme 2007–2013**. Este proyecto tiene entre sus objetivos la búsqueda de soluciones para modernizar edificios históricos, protegiendo su valor histórico y a la vez reduciendo su consumo energético, centrándose principalmente en la región del Mar Báltico. Se expone de forma clara que en lo que respecta a la restauración de edificios antiguos, existe la disyuntiva entre no intervenir energéticamente los edificios, inclumplir los objetivos de cambio climático y no conservar el patrimonio. Este proyecto, sin embargo, pretende encontrar soluciones para combinar los objetivos necesarios de reducción de CO₂ con enfoques técnica, administrativa e históricamente adecuados para esta conservación del Patrimonio Cultural. Por otro lado, se centra especialmente la arquitectura de ladrillo de la BSR en la antigua zona de la Liga Hanseática presenta una excelente posibilidad de encontrar métodos y soluciones transferibles

En una línea similar pero posterior en el tiempo (2010-2014) se engloba el **proyecto 3ENCULT Energy Efficiency Solutions for Historic Buildings**, el cual pretende unir la conservación de los edificios históricos y la protección del clima, lo cual, se defiende, no es en absoluto un antagonismo: “los edificios históricos sólo sobrevivirán si se mantienen como espacios habitables”. Para ello se realiza un estudio de ocho casos prácticos donde se comprueban soluciones aplicables a la mayoría del patrimonio construido europeo en zonas urbanas. Los principales objetivos que aborda son el desarrollo de soluciones pasivas y activas para la conservación y la rehabilitación energética, así como la definición de los instrumentos de diagnóstico y monitorización a largo plazo.

En los últimos años, se desarrolla el proyecto **HeLLO (2018-2020): Architettura Energia Research Centre. HeLLO-Heritage Energy Living Lab Onsite**. Uno de los objetivos de este proyecto es el divulgativo, dando a conocer a los agentes del sector de la construcción los puntos fuertes y débiles de las soluciones técnicas de rehabilitación energética más comunes

cuando se aplican a los edificios históricos, con una intencionalidad de contribuir a las estrategias de rehabilitación de la UE con cuestiones relacionadas con el Patrimonio Cultural, abriendo así el conocimiento académico a casos reales para que aumente la concienciación sobre el tema. Además, tiene una parte práctica en la cual se pretende comprobar la compatibilidad de algunas soluciones tecnológicas para la rehabilitación energética de edificios históricos.

ENSAYOS EN RÉGIMEN TRANSITORIO Y RÉGIMEN ESTACIONARIO

En cuanto a la realización de ensayos de flujo térmico, existen dos grandes tipos, los que se realizan en un régimen estacionario y los que se realizan en un régimen transitorio. La principal característica del régimen estacionario es que el gradiente de temperaturas a ambos lados de la muestra es constante, es decir, las temperaturas a ambos lados de la muestra no varían, obteniéndose así un flujo constante de calor que atraviesa la muestra.

Por otro lado, en un régimen dinámico o transitorio, las temperaturas a ambos lados de la muestra varían a lo largo del tiempo, de tal forma que el gradiente de temperatura varía a lo largo del tiempo, y por lo tanto el flujo no es constante. En este caso, tiene mucha importancia la inercia térmica del material, y los ensayos deben dilatarse en el tiempo para obtener resultados fiables (al menos 96 horas), todo ello establecido en la norma de ensayo ISO-9868-1. Los ensayos en régimen transitorio son ensayos realizados "in situ" ya que no se pueden fijar las temperaturas a ambos lados del cerramiento.

2.1. CÁLCULO SEGÚN NORMAS ISO EN-10456

UNE-EN ISO 10456 *Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotémicas. Valores tabulados de diseño y procedimiento para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño*, se establece el procedimiento para convertir los valores de conductividad térmica obtenidos bajo un conjunto de condiciones determinadas, en valores válidos para otro conjunto de condiciones diferentes: temperatura y humedad, admitidos para temperaturas ambiente entre -30°C y +60°C. La conversión de valores térmicos a partir de una condiciones iniciales (i) a otro conjunto de condiciones finales (f) se realizaría de acuerdo a la expresión:

$$\lambda_f = \lambda_i F_T F_m F_a$$

donde:

λ conductividad térmica en W/(m·K),
 F_T es el factor de conversión de temperatura,
 F_m es el factor de corrección de humedad y
 F_a el factor de corrección de envejecimiento.

Para materiales modernos, para los que el fabricante ha ensayado y declarado los valores del coeficiente de conductividad térmica de diseño, en seco y a una temperatura definida, así como los factores de corrección, es posible calcular la conductividad térmica del material para un determinado contenido de agua partiendo del valor en estado seco. En el caso que se estudia, y para ambos ensayos, los factores de conversión de temperatura y de antigüedad se han considerado con valor igual a 1 al ser utilizados ladrillos con antigüedad similar, y de los que no se conoce el factor de corrección por envejecimiento. Con respecto a las condiciones de temperatura se consideran tanto en el ensayo “in situ” como para el ensayo en el laboratorio que eran similares. Por último, el factor de conversión de humedad se determina para un contenido de humedad expresado como unidad de volumen:

$$F_m = e^{f_\psi (\psi_f - \psi_i)}$$

donde:

f_ψ es el coeficiente de conversión del contenido de humedad por unidad de volumen y
 ψ_i, ψ_f son los valores del contenido de humedad inicial y final por unidad de volumen en m³/m³.

** Para la arcilla cocida, según la tabla 4 de la norma citada, el valor de $f_\psi = 10$.

Si con el ensayo de flujo térmico se puede calcular el coeficiente de conductividad térmica de un mismo muro en dos zonas o en dos fechas diferentes, con la fábrica seca y la fábrica húmeda, se puede llegar a calcular el contenido de agua de la fábrica húmeda aplicando las

fórmulas de la norma, basándose en la relación entre la conductividad térmica de un muro y el contenido de agua de dicho muro.

Después de lo anteriormente comentado, y tratando de obtener datos fiables sobre el contenido de agua de una fachada de fábrica de ladrillos antiguos, entendemos que el mejor sistema es hacer dos ensayos de flujo térmico, uno "in situ" y otro en laboratorio, que permita analizar y comparar ambos resultados. En ambos siguiendo el procedimiento de la norma ISO 9869-1.

2.2. CÁLCULO SEGÚN NORMA EN-1745

En la norma EN-1745 se relaciona solamente con formulaciones similares la conductividad en estado seco y en estado húmedo para fábricas de albañilería y componentes.

A partir del valor de la conductividad térmica del material a 10º C de temperatura media y en estado seco $\lambda_{10,dry}$ se calcula el valor de la conductividad térmica de diseño $\lambda_{10,dry}$ correspondiente, utilizando el factor de conversión de la humedad F_m .

$$\lambda_{design} = \lambda_{10,dry} \times F_m$$

El factor F_m se calcula, a su vez, con el coeficiente de conversión de humedad por volumen f_ψ dado en el anexo A, de la citada norma, para cada material y el contenido de humedad de diseño:

$$F_m = e^{f_\psi \times \psi_{design}}$$

Para la obtención de los parámetros característicos de las fábricas a partir de los dos elementos componentes, las piezas de albañilería (ladrillos) y argamasa o mortero, se establece el siguiente procedimiento en función del porcentaje del área en el alzado, se indica la siguiente fórmula:

$$\lambda_{design,mas} = a_{unit} \times \lambda_{design,unit} + a_{mor} \times \lambda_{design,mor}$$

2.1. CÁLCULO DE CONDUCTANCIA SEGÚN NORMA ISO 9869-1.

La conductancia se calcula después de la realización del ensayo de flujo térmico, con una placa de flujo térmico y dos sondas de temperatura superficial que se sitúan en el interior y el exterior.

Según esta norma, con los datos obtenidos se puede calcular el valor de la conductancia térmica mediante la fórmula del método simplificado de la media,

$$\Lambda = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}$$

Donde:

Λ	Conductancia térmica, en W/ (m ² ·K)
q	Flujo térmico = Φ/A , en W/m ²
T_{si}	temperatura superficial interior, en °C
T_{se}	temperatura superficial exterior, en °C

Una vez conocido el valor de la conductancia térmica se puede estimar el valor de la conductividad térmica mediante la fórmula:

$$\lambda = \Lambda \times d$$

Donde:

λ	Conductividad térmica (W/m·K)
d	espesor de la probeta (m)

3. MATERIALES Y METODOLOGIA

Tras los primeros estudios llevados a cabo sobre el estado del arte respecto de los efectos de la humedad en las fábricas del patrimonio construido parece que existe un vacío importante sobre el comportamiento de estas fábricas del patrimonio construido de la zona de Castilla y León, desde el punto de vista térmico cuando se encuentran con medios o altos grados de humedad y que, además este conocimiento podría dar lugar al desarrollo de un método contrastado que nos permita estimar este contenido de humedad. Este vacío justifica por sí mismo el desarrollo de esta investigación.

Para analizar el fenómeno se comenzaron de forma prácticamente simultánea tres procesos diferentes:

- La selección y caracterización de materiales con los que se iban a ejecutar las probetas a ensayar.
- La selección de edificios para los ensayos “in situ”.
- La construcción de la caja fría y el diseño de los ensayos que se iban a llevar a cabo, aunque el proceso de selección de materiales, y ensayos fue continuo en el tiempo.

Para seguir a continuación con la fase de realización de ensayos.

- Caracterización de materiales en el laboratorio de la UVA. Ensayos de tipo físico.
- Caracterización mineralógica de los ladrillos. Ensayos Universidad de Granada.
- Caracterización por porosimetría de mercurio. Instituto Eduardo Torroja.
- Ensayos en laboratorio de probetas
- Ensayos “in situ” de muros de fábrica en edificios construidos

Y para finalizar, análisis y estudio de los resultados para llegar a proponer un ensayo de evaluación de la humedad en fábricas de ladrillo y contar con datos adicionales sobre el comportamiento térmico de diferentes tipos de ladrillos en condiciones desde seco hasta húmedo.

Comprobar cuál es la influencia que tiene la humedad absorbida por una fábrica de ladrillo del patrimonio construido en su comportamiento térmico supone abrir un campo de trabajo muy amplio, ya que en torno a este fenómeno se genera una variedad muy amplia de cuestiones que analizar.

Existen pocos trabajos sobre este fenómeno, especialmente con materiales de la zona que se analizan en la presente tesis doctoral a lo que se suma, tal y como se verá en apartados sucesivos, que la NORMA EN-1745 no responde estrictamente al comportamiento observado.

Debido a que se suponía que los ensayos iban a ser muy dilatados en el tiempo de los ensayos a ejecutar, luego se pudo comprobar que alguno han durado hasta nueve meses, se optó desde el principio por desarrollar una metodología que permitiese acometer todas las tareas con un orden lógico y posible, y que permitiese sistematizar el trabajo. En primer lugar se diseñó y realizó un ensayo en laboratorio a menor escala para comprobar la metodología y calibrar las posibles cuestiones susceptibles de ser mejoradas para posteriormente construir la cámara con garantías. Por otro lado, se programaron los ensayos de tal forma que se han podido solapar en el tiempo, tanto los ensayos de laboratorio como la campaña de ensayos “in situ” (los cuales solo se pueden llevar a cabo en épocas concretas del año, donde conseguimos un gradiente térmico suficiente).

3.1. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS. ENSAYO A LOS MATERIALES

Establecidos los objetivos y las hipótesis tras el análisis del estado del arte se iniciaron los trabajos dedicados a la selección de los materiales que más tarde conformarían las probetas sobre los que llevarían a cabo los ensayos de flujo. Estos ensayos se desarrollarían sobre ladrillos y probetas de argamasa.

Como es sabido, las fábricas de ladrillo se componen por dos elementos, los propios ladrillos, y la argamasa. Como el objetivo de este trabajo es principalmente comparar el comportamiento térmico de diferentes tipos de ladrillos, tal y como se ha expuesto, se considera la argamasa como una invariante, por lo que esta siempre se fabrica con las mismas características, de tal forma, que si únicamente variamos el ladrillo, las variaciones en el comportamiento estudiado tan solo se deberán al ladrillo.

Los ladrillos utilizados en la construcción de los edificios del Patrimonio Cultural se han obtenido en la mayoría de los casos de demoliciones de edificaciones de una zona geográfica concreta. Para seleccionar las piezas con las que ensayar se plantearon dos premisas:

1. Los ladrillos con los que se fueran a construir cada una de las probetas deberían pertenecer al mismo edificio (demolición), para intentar que fuesen lo más homogéneos posible y
2. Todos los ladrillos de la misma procedencia fueron caracterizados, midiendo su peso seco, peso saturado, pesada hidrostática, densidad, porosidad aparente, etc, eligiendo para la construcción de las probetas, los ladrillos con características más homogéneas.

Respecto de la argamasa, tal y como se ha expuesto, en todas las probetas se utilizó la misma mezcla, siendo el principal requisito reproducir con la mayor fidelidad posible las características y proporciones de la usada en la ejecución de las fábricas antiguas de ladrillo tejar, que son el objeto de estudio, con proporciones similares a las empleadas en las fábricas con ladrillo de tejar. De la revisión de los tratados (Villanueva, 1866), se concluyó que la argamasa más habitual era la que tenía una dosificación de una parte de cal por tres de arena, empleando siempre cal aérea.

Se expone a continuación la metodología utilizada para la elección y selección de los materiales.

3.1.1. ARGAMASA

Para la elección sobre 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 (Llorente-Álvarez, 2018).

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-90S y arena lavada de río de granulometría controlada, que fue tamizada con la malla ASTM Nº 4 (<4,75 mm).

Para su caracterización se fabricaron de 12 probetas de cal aérea y arena en la proporción 1/3 siguiendo las recomendaciones de tratados antiguos de albañilería (Villanueva, 1866), de dimensiones 40 x 40 x 160 mm. Estas probetas se ensayaron siguiendo las mismas normas que las especificadas para los ladrillos, a excepción del ensayo de densidad que se realizó según el proceso de la norma EN 1015-10.

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. (Llorente-Álvarez, 2018)

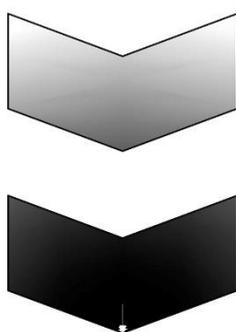
3.1.2. LADRILLOS

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 expuesto, por la enorme variedad de piezas en lo que se refiere a su tipología y forma de fabricación (tejar, extrusionados, prensados, etc.) dimensiones, porosidad, densidad etc, sumada a la experiencia de otras investigaciones (Camino et al., 2014; Camino Olea, 2001; Camino-Olea et al., 2019; Llorente-Álvarez, 2018; Ramos Gavilán et al., 2018; Rodríguez-Esteban et al., 2014). 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.



Figura 5. Cinco tipos de ladrillo en el laboratorio. Después de su proceso de limpieza tras su recuperación en demoliciones.

El material necesario fue obtenido de edificios, que es ese momento estaban siendo reformados o demolidos, a excepción de los ensayos sobre ladrillos de tejar modernos, datados en los siglos XIX y principios y mediados del XX obtenidos directamente de las cerámicas.



LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS (LADRILLOS)

Localización y obtención de muestras de ladrillos de diferentes tipos y procedencias de edificios del patrimonio construido, fruto de demoliciones. Todas las muestras se obtienen de un radio de unos 200km de Valladolid.

CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS

Se lleva a cabo un proceso de limpieza, desecho de piezas rotas o en mal estado. Con las resultantes, se lleva a cabo un proceso de caracterización de las piezas, desechando las disonantes de forma previa a la construcción de las probetas.

Figura 6. Esquema de proceso de ensayos a los materiales.

Los ladrillos obtenidos se clasificaron por su proceso de fabricación en tres grupos, (hechos a mano, extrusionados y prensados), con el fin de poder relacionar las características de los mismos con la conductividad de las muestras de fábrica estudiadas (Dondi et al., 2004). Dentro de cada uno de estos grupos se clasificaron según su procedencia y dimensiones, siendo seleccionados los de formas similares y desechando los valores disonantes en los ensayos a las piezas individuales, que posteriormente fueron utilizados para la fabricación de las distintas probetas. En total se recopilaron entre 18 y 25 ladrillos para cada probeta, siendo realizadas para este estudio un total de 14, según se expone más adelante.

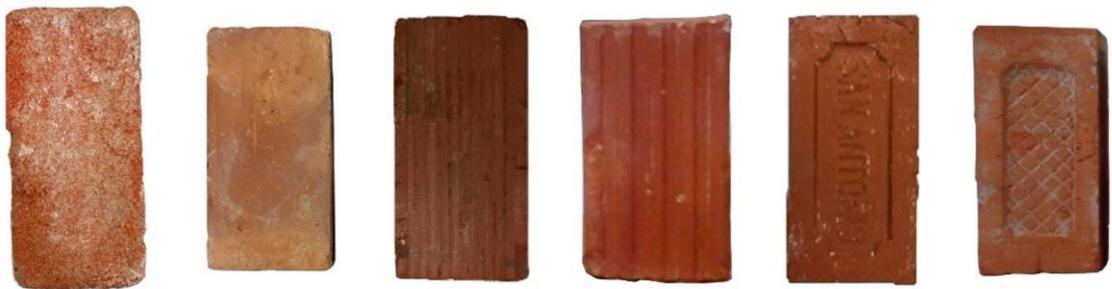


Figura 7. Ladrillos de diferentes formas de fabricación, de tejar, extrusionados y prensados.

En lo que se refiere a los ladrillos obtenidos de demoliciones, en un primer momento se procedió a ensayar la totalidad de ellos, con el fin de conocer cuál era la dispersión de los valores característicos de los ladrillos (por grupos de origen) en lo relativo a densidad y porosidad, así como una muestra representativa de ellos para conocer tasas de absorción de agua. Tras esta primera fase de ensayo se obtuvieron datos suficientes como para eliminar piezas disonantes, así como para diseñar las probetas con las piezas más representativas. Esto es imprescindible para poder evaluar el comportamiento de la fábrica, y evitar que un elemento disonante altere los resultados finales.



Figura 8. Ladrillos de recuperación tras los ensayos a los materiales, preparados para la construcción de la probeta.

Tal y como se ha expuesto, se recopilaron 14 tipos de ladrillos de las zonas de Astorga, (León), Arévalo (Ávila), Valladolid, Serrada, Peñafiel y Villavellid (Valladolid).

Tabla 1. Tipos de ladrillo ensayados

Muestra	FABRICACIÓN	ÉPOCA	PROCEDENCIA	DENSIDAD EN 772-13 (kg/m3)	Absorción de agua EN 772-21 (l/m3)
01	tejar	Antiguo	Arévalo (Ávila)	1.573	268
02	tejar	Moderno	Arévalo (Ávila)	1.671	252
03	tejar	Antiguo	Astorga (León)	1.735	243
04	tejar	Antiguo	La Seca (Valladolid)	1.738	266
05	tejar	Antiguo	Serrada (Valladolid)	1.772	236
06	tejar	Antiguo	Villavellid (Valladolid)	1.826	229
07	extrusionado	Antiguo	Eloy Silió (Valladolid)	1.872	248
08	extrusionado	Antiguo	San Antonio (Zamora)	1.877	243
09	extrusionado	Antiguo	Eloy Silió (Valladolid)	1.922	221
10	prensado	Antiguo	San Antonio (Zamora)	1.934	204
11	tejar	Moderno	Jerusalén (LP) (Segovia)	2.028	125
12	prensado	Antiguo	Eloy Silió (Valladolid)	2.044	167
13	tejar	Moderno	La Paloma (Segovia)	2.052	112
14	extrusionado	Moderno	Nava de la Asunción (Seg)	2.054	167



Figura 9. Localizaciones de donde se han obtenido los ladrillos para los ensayos.

Sobre las piezas cerámicas seleccionadas, 14 tipos, se llevaron a cabo los siguientes ensayos sobre los materiales que se incluyen en la siguiente tabla, junto con la norma de ensayo y la aclaración de si se ejecutó sobre todas las piezas o sobre una representativa (en los casos en los que el ensayo es destructivo).

Tabla 2. Ensayos realizados sobre los ladrillos

ENSAYO	NORMALIZADO	PIEZAS ENSAYADAS
Dimensiones	UNE-EN 772-16	todas
Tasa inicial de absorción de agua	UNE-EN 772-11	todas
Absorción de agua	UNE-EN 772-21	todas
Densidad aparente seca	UNE-EN 772-13	todas
Porosidad aparente	EN 772-3	todas
Porosimetría de mercurio	ASTM D4404-18	muestreo
Caracterización FRX de composición mineralógica.		muestreo

Se dividen en dos grandes grupos, los realizados en el laboratorio de la ETSAVa, por los miembros del equipo, y los que, por falta de medios y cualificación se han externalizado y han sido llevados a cabo por laboratorios externos, los de porosimetría de mercurio y composición mineralógica.

3.1.3. Ensayos realizados en el laboratorio de la ETSAVa

Se realizan una serie de ensayos a los ladrillos antes de ser seleccionados para formar parte de las probetas a estudiar, dentro del laboratorio de construcciones arquitectónicas de la ETSAVa. Estos ensayos se le han realizado a la totalidad de las muestras que han llegado al laboratorio.

Cabe destacar, que el primer proceso al que se someten antes de cualquier ensayo, es a una limpieza total de las piezas, especialmente las llegadas procedentes de demoliciones o edificios que se estaban rehabilitando.



Figura 10. Ladrillo recuperado de Arévalo (Ávila)



Figura 11. Ladrillos recuperados.

Se realizan por tanto los siguientes ensayos:

Tasa inicial de absorción de agua

Este ensayo permite conocer la cantidad de agua que absorben los ladrillos durante 1 minuto. El procedimiento está normalizado según norma UNE-EN 772-11. Permite conocer la velocidad con la que el agua accede por capilaridad en las muestras ensayadas.

Se recoge un ejemplo de los resultados en la ficha tipo de ensayo a los materiales (Figura 15).

Absorción de agua

Este ensayo permite conocer la cantidad máxima de agua que es capaz de absorber un material. El procedimiento está igualmente normalizado según la norma UNE-EN 772-21. El procedimiento es realizado por inmersión en agua fría hasta que la diferencia de peso entre dos tomas de datos es menor del 0,1%. Aporta datos interesantes, sobre todo al comparar los valores entre los distintos materiales y entre piezas de distinta procedencia.

Se recoge un ejemplo de los resultados en la ficha tipo de ensayo a los materiales (Figura 15).

Densidad aparente y Porosidad abierta

Este ensayo permite conocer la densidad aparente y la porosidad accesible. Se encuentra también normalizado en las normas UNE 772-13 y UNE 772-3. Tiene mucha importancia, ya que la porosidad abierta es la cantidad de poros que es “accesible al agua” y, por lo tanto, los poros que varían de estar secos a saturados, con la influencia que ello tiene, tal y como se ha visto, en la transmisión de calor.

Se recoge un ejemplo de los resultados en la ficha tipo de ensayo a los materiales (Figura 15).

3.1.4. Ensayos realizados en laboratorios externos de la ETSaVa

Ensayo externo. Ensayo de composición mineralógica

Se realizaron ensayos de composición mineralógica de las muestras de ladrillo con el objeto de poder relacionar estos valores con los valores obtenidos en los ensayos.

Tabla 3. Ensayo mineralógico de todos los tipos de ladrillo estudiados en esta tesis.

UGR	SiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na2O %	K2O %	TiO2 %	P2O5 %	Zr (ppm)	LOI %
1 Arévalo (Ávila)	68,04	16,01	3,34	0,06	1,52	2,15	2,39	4,39	0,60	0,22	430,10	1,16
2 Arévalo (Ávila)	75,69	12,63	2,65	0,04	0,60	0,50	1,28	3,99	0,31	0,06	113,80	2,23
3 Astorga (León)	77,88	12,76	4,19	0,04	0,88	0,27	0,22	2,32	0,94	0,05	442,60	0,34
4 La Seca (Valladolid)	72,33	13,22	5,10	0,05	1,45	2,93	0,47	2,74	0,75	0,13	299,20	0,77
5 Serrada (Valladolid)	72,35	14,14	3,85	0,04	1,59	1,11	1,45	3,76	0,63	0,10	214,80	0,94
6 Villavellid (Valladolid)	61,68	20,75	7,94	0,06	1,61	1,59	0,46	3,72	0,94	0,17	194,60	1,06
7 Valladolid (Valladolid)	72,77	14,44	5,57	0,04	1,33	0,55	0,50	2,90	0,84	0,12	310,20	0,71
8 San Antonio (Zamora)	76,79	13,03	3,85	0,09	1,14	0,54	0,15	2,81	0,94	0,07	260,50	0,56
9 Valladolid (Valladolid)	72,77	14,44	5,57	0,04	1,33	0,55	0,50	2,90	0,84	0,12	310,20	0,71
10 San Antonio (Zamora)	73,50	14,65	4,51	0,09	1,29	0,93	0,17	3,03	0,82	0,07	245,30	0,67
11 J. La Paloma (Segovia)	73,23	18,18	4,44	0,01	0,48	0,44	0,11	1,90	0,78	0,07	266,00	0,35
12 Eloy Silió (Valladolid)	67,55	17,52	6,08	0,04	1,68	1,10	0,42	3,82	0,86	0,14	255,50	0,69
13 La Paloma (Segovia)	72,35	19,28	3,72	0,02	0,49	0,48	0,11	2,00	0,70	0,08	251,60	0,74
14 Nava Asunción (Seg.)	72,35	14,14	3,85	0,04	1,59	1,11	1,45	3,76	0,63	0,10	214,80	0,94

* Universidad de Granada

EL CAMPILLO

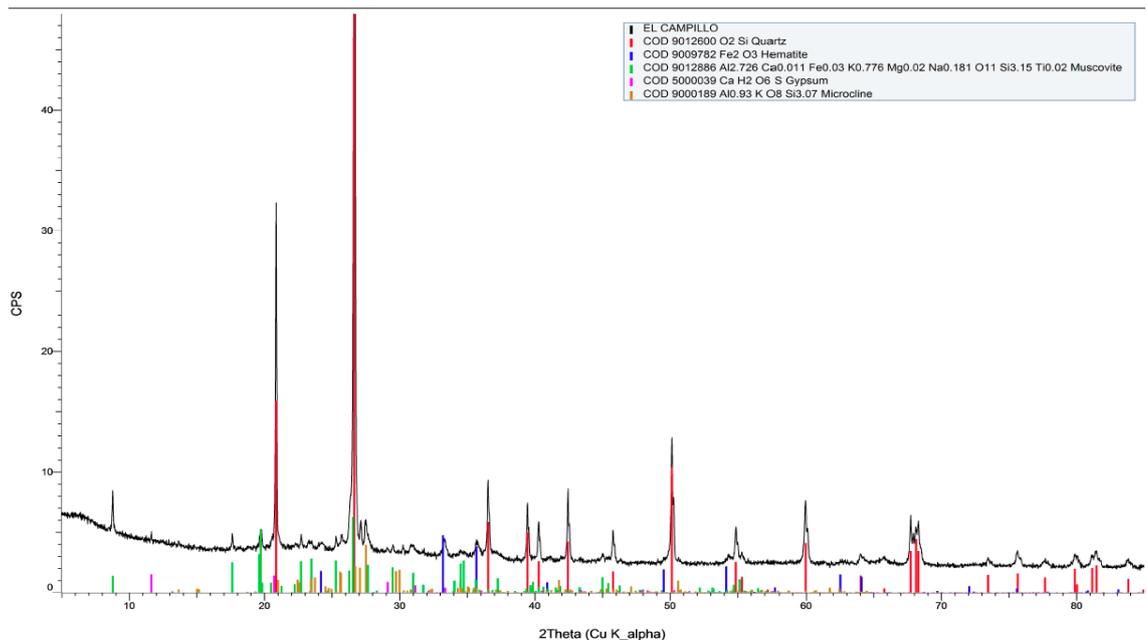


Figura 12. Ejemplo resultado del análisis mineralógico del ladrillo 7 realizado por la Universidad de Granada.

Ensayo externo. Porosimetría de mercurio

Para la realización de este ensayo se prepararon probetas con porciones de ladrillo y probetas de argamasa en cubos de 30 x 30 x 20 mm. que fueron enviadas al Instituto de Ciencias de Construcción "Eduardo Torroja" (IETcc-CSIC) para el análisis de la distribución de poros.

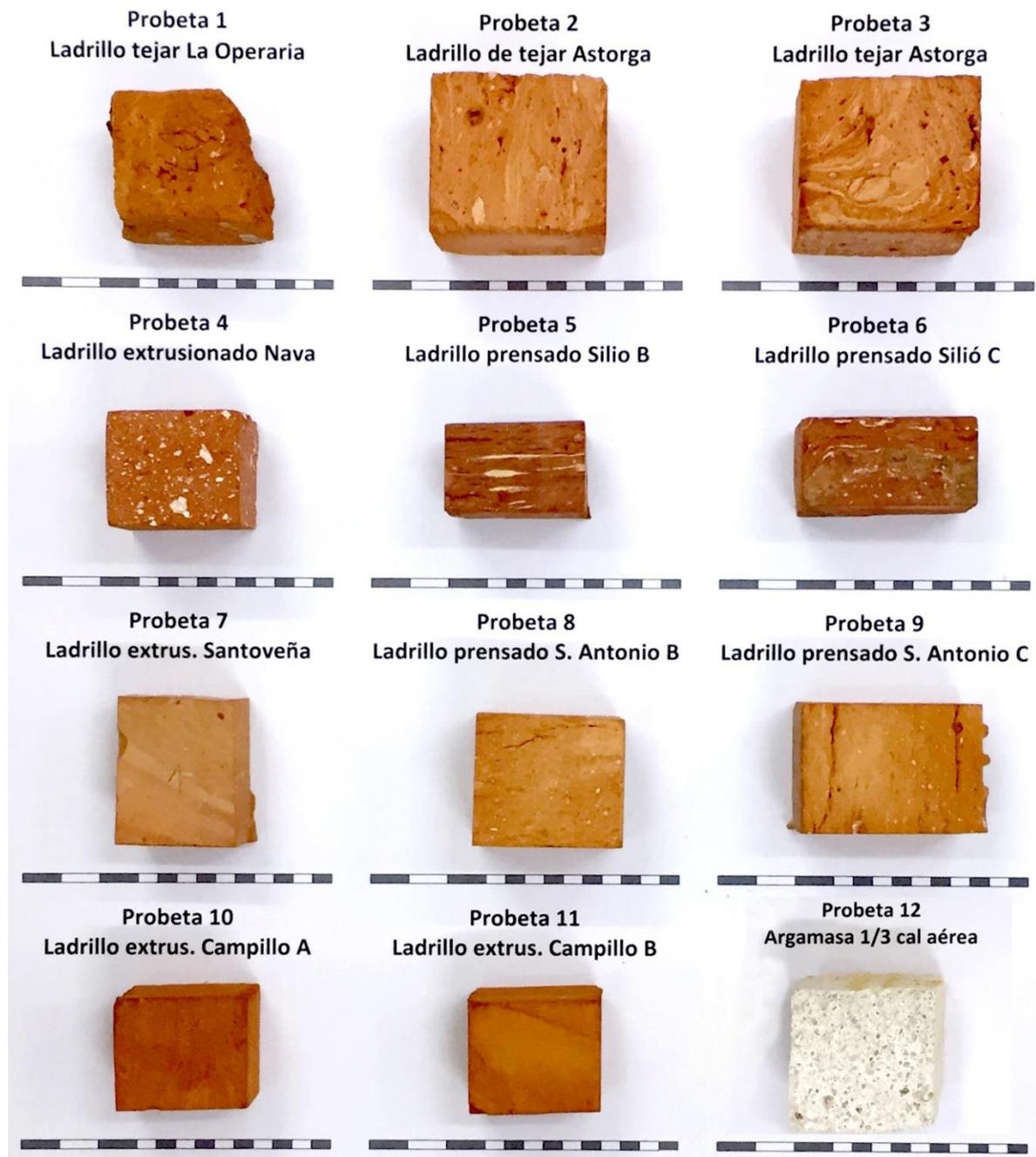


Figura 13. Algunas de las muestras enviadas a ensayo de porosimetría de mercurio

La Metodología del ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio es la siguiente según lo descrito en el informe del ensayo recibido:

Se corta un cubo de aproximadamente 1 cm³ de cada una de las muestras recibidas con el fin de realizar el ensayo de porosimetría de mercurio. Los ensayos se realizan con un equipo Micromeritics AutoPore IV 9500, con una presión máxima de 33.000 psi. Se determinó el diámetro medio de poro, la densidad aparente y la porosidad total en las trece muestras recibidas.

Tabla 4. Ensayos de porosimetría de mercurio.

Muestra	ÉPOCA	PROCEDENCIA	TIPO de Fabricación	ORIGEN	Diámetro medio del poro (nm)	Densidad Aparente (g/ml)	Porosidad (%)
1	Antiguo	Arévalo (Ávila)	TEJAR	RECUPERACION	1,59	1,54	26,94
2	Moderno	Arévalo (Ávila)	TEJAR	MODERNO	0,17	1,79	25,57
3	Antiguo	Astorga (León)	TEJAR	RECUPERACION	1,0582	1,6658	35,331
		Astorga (León)	TEJAR	RECUPERACION	2,6271	1,7147	27,5134
4	Antiguo	La Seca (Valladolid)	TEJAR	RECUPERACION	0,6297	1,8255	30,074
5	Antiguo	Serrada (Valladolid)	TEJAR	RECUPERACION	2,45	1,75	22,56
6	Antiguo	Villavellid (Valladolid)	TEJAR	RECUPERACION	0,93	1,97	16,26
7	Antiguo	Valladolid (Valladolid)	EXTRUSIONADO	RECUPERACION	0,7079	1,8727	29,1805
8	Antiguo	San Antonio (Zamora)	EXTRUSIONADO	RECUPERACION	5,64	1,8	21,29
9	Antiguo	Valladolid (Valladolid)	EXTRUSIONADO	RECUPERACION	0,5903	1,9289	29,4999
10	Antiguo	San Antonio (Zamora)	PRENSADO	RECUPERACION	0,4439	1,9302	25,6219
		San Antonio (Zamora)	PRENSADO	RECUPERACION	0,4436	1,888	26,1947
11	Moderno	J. La Paloma (Segovia)	TEJAR	MODERNO	0,83	2,03	21,81
12	Antiguo	Eloy Silió (Valladolid)	PRENSADO	RECUPERACION	0,496	2,0729	19,4834
		Eloy Silió (Valladolid)	PRENSADO	RECUPERACION	0,6416	2,0294	20,909
13	Moderno	La Paloma (Segovia)	TEJAR	MODERNO	0,78	2,09	18,52
14	Moderno	Nava Asunción (Seg.)	EXTRUSIONADO	MODERNO	0,7944	2,0425	20,1362
a1		Argamasa	PROBETA	--	1,0422	1,8247	28,0381

Además de los datos de diámetro medio del poro, densidad aparente y porosidad, de estos ensayos resultan la distribución de poros de cada una de las muestras. Se exponen los resultados para las muestras (Tabla 4). Cabe destacar, que también, se ensayaron igualmente una muestra de argamasa idéntica a la utilizada en la fabricación de las probetas. Las gráficas de la distribución de poros son los de la Figura 14.

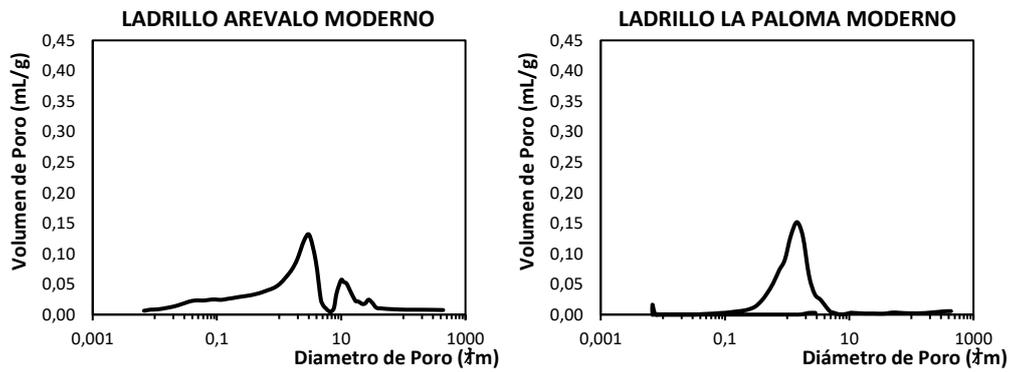


Figura 14. Resultado ensayos de porosimetría de mercurio de varias muestras de ladrillos

A continuación, se muestra una de las 14 fichas que se realizaron para cada tipo de ladrillo ensayado en la presente tesis doctoral. En esta ficha se pretende mostrar los resultados realizados a todos los ladrillos, además de los ensayos realizados por muestreo fuera del laboratorio de la ETSAVa.

Nº de ensayo	1
Ladrillo	Tadrillo de tejar recuperado de Arévalo
Tipo	Tejar
Localización	Arévalo
Origen	Recuperación



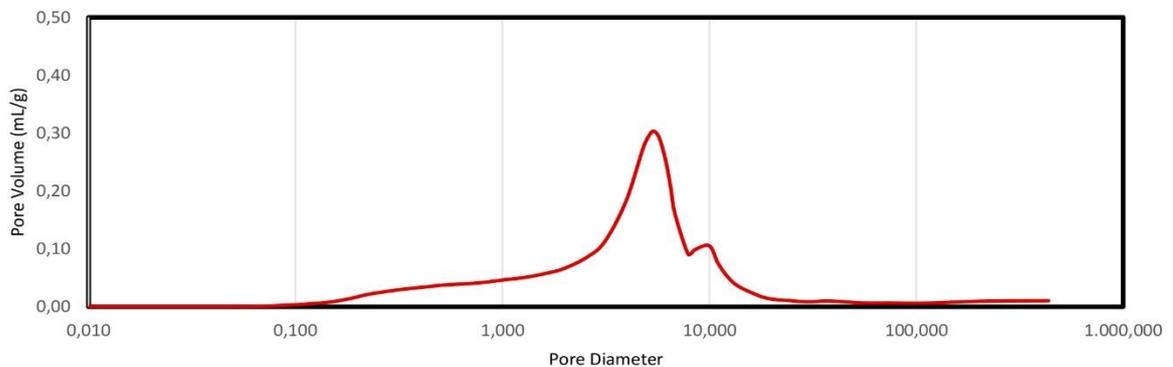
	Dimensiones			Peso ambiente	Peso seco	Peso 1 minuto	Peso saturado	Pesada hidrost.	tasa inicial	abs. agua fría	abs. agua fría saturado	Densidad p	por. aparente	volumen p.seco/p
	soga	tizon	grioso											
	mm	mm	mm											
1	300	146	42	2.857,2	2.850,1	2.942,0	3.293,3	1.574,6	2,10	15,55%	257,9	1.658	25,79%	0,00172
2	305	147	42	2.867,9	2.859,4	2.926,4	3.288,1	1.558,5	1,49	14,99%	247,9	1.653	24,79%	0,00173
3	304	147	34	2.668,6	2.659,5	2.735,4	3.044,3	1.474,7	1,70	14,47%	245,2	1.694	24,52%	0,00157
4	300	146	43	2.821,6	2.812,2	2.850,9	3.214,8	1.539,5	0,88	14,32%	240,3	1.679	24,03%	0,00168
5	300	152	42	2.958,2	2.946,6	3.011,6	3.384,8	1.635,6	1,43	14,87%	250,5	1.685	25,05%	0,00175
6	304	145	39	2.815,5	2.805,0	2.887,6	3.225,1	1.526,9	1,87	14,98%	247,4	1.652	24,74%	0,00170
7	307	149	44	3.190,1	3.178,1	3.247,1	3.643,6	1.763,8	1,51	14,65%	247,6	1.691	24,76%	0,00188
8	301	153	41	2.938,9	2.925,6	3.000,1	3.348,9	1.603,4	1,62	14,47%	242,5	1.676	24,25%	0,00175
9	301	148	40	2.793,4	2.793,2	2.978,5	3.180,6	1.513,0	4,16	13,87%	232,3	1.675	23,23%	0,00167
10	300	147	37	2.631,8	2.627,5	2.698,0	3.007,9	1.446,7	1,60	14,48%	243,7	1.683	24,37%	0,00156
11	300	148	40	2.741,8	2.729,8	2.799,3	3.127,2	1.514,2	1,57	14,56%	246,4	1.692	24,64%	0,00161
12	310	152	38	2.878,7	2.876,0	2.930,7	3.342,9	1.703,4	1,16	16,23%	284,8	1.754	28,48%	0,00164
13	310	152	38	2.760,4	2.750,1	2.816,6	3.262,7	1.467,9	1,41	18,64%	285,6	1.532	28,56%	0,00179
media	303	149	40	2.840,3	2.831,8	2.909,6	3.258,8	1.563,2	1,73	15,08%	251,7	1.671	25,17%	0,00170
desviación	3,8	2,7	2,8	141,6	140,3	141,1	162,4	93,2	0,79	1,22%	16,0	49	1,60%	0,00009

ladrillos empleados para la probeta														
media	302,1	148,0	40,4	2.849,2	2.839,4	2.909,8	3.257,8	1.563,8	1,58	14,73%	246,9	1.676	24,69%	0,00169
desviación	2,6	2,6	3,0	159,8	158,2	158,1	183,6	90,0	0,31	0,37%	4,8	16	0,48%	0,00010

Ensayo Mineralógico

UGR	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	Zr	LOI	SUMA
20 a 25 de nov de	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	(ppm)	%	%
19/15490	68,04	16,01	3,34	0,06	1,52	2,15	2,39	4,39	0,6	0,22	430,1	1,16	99,98

Porosimetría de mercurio



NOTA: los sombreados en gris han sido excluidos para la construcción de la probeta

Figura 15. Ficha tipo sobre un total de 14, de toma de datos de los materiales.

3.2. ENSAYOS A LAS PROBETAS

3.2.1. ENSAYOS PREVIOS

Tal y como se ha expuesto, de forma previa a la realización de los ensayos generales, se han realizado ensayos a pequeña escala, construyéndose para ello una cámara a pequeña escala, conectada a una cámara climática la cual nos permitía modificar las condiciones de temperatura y humedad del ambiente interior siguiendo la metodología de la bibliografía consultada (Lucchi et al., 2018) así como las Normas UNE expuestas.

La cámara climática es marca WEISS modelo WK3-340/40, del laboratorio, de tal forma que se consiguiese rebajar la temperatura del interior de la caja respecto de la del ambiente del local, para lo cual se hizo recircular el aire interior de la cámara climática mediante unos conductos hacia la caja fría. Los elementos utilizados, para el sistema de recirculación de aire son los siguientes:

- Tubo tipo compacto gris flexible de aluminio de 110 mm de diámetro.
- Tubo PVC de 50 mm de diámetro y coquilla aislante de 10 mm de espesor.
- Extractor Soler & Palau modelo Silent 100 CZ de 100 mm. de diámetro, de 8W. de potencia, velocidad de 2400 r.p.m. y caudal en descarga libre de 95 m³/h.
- Material aislante para forrar exteriormente los tubos.

Para conseguir una circulación de aire forzada, se situó en la embocadura del tubo de aluminio con la cámara climática el extractor. El tubo de aluminio se conectó con el interior de la caja y el otro tubo se conectó a la caja a la cámara climática para completar el circuito 'Figura 16'.

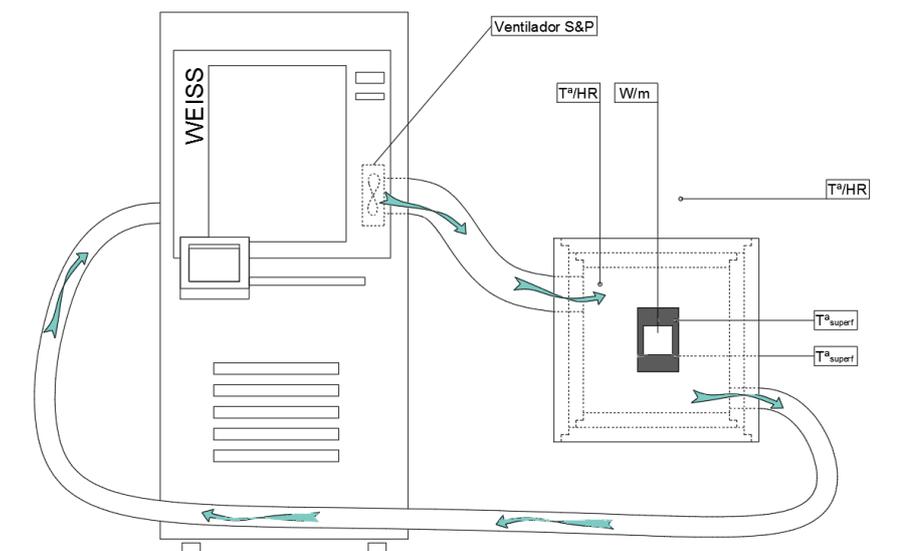


Figura 16. Cámara climática, caja fría y sistema de re-circulación del aire.

La probeta que se ensayó en este primer momento estaba formada por cuatro hiladas de medios ladrillos, con ladrillos elaborados manualmente procedentes de demoliciones, con tres juntas de argamasa de cal y arena de dosificación 1/3 y es irregular ya que los ladrillos hechos a mano presentaban alabeos y tenían dimensiones diferentes. La altura media de la probeta es de 224 mm, la base media 138x140 mm, la cara superior 135x141 mm. Los ladrillos tenían un grosor medio de 44 a 40 mm y las hiladas un espesor medio de 21 mm. La placa para medir el flujo térmico se situó en el centro de una de sus caras verticales.

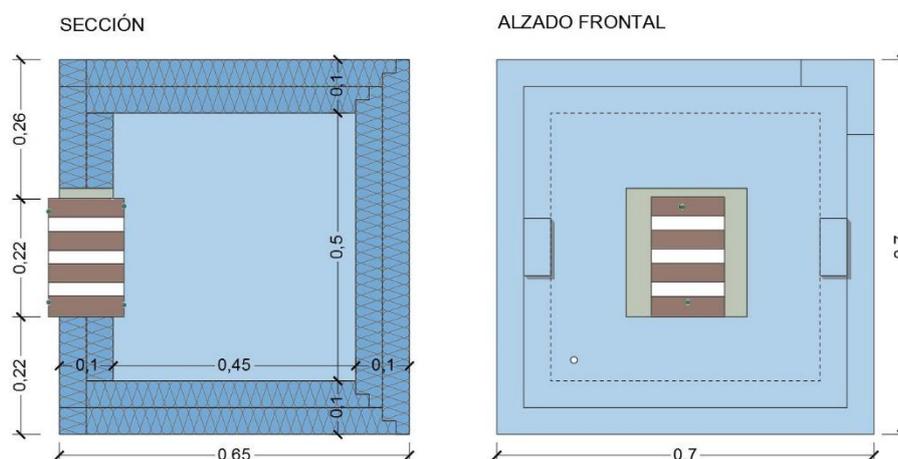


Figura 17. Caja fría y probeta de fábrica.

Como paso previo a fabricar la probeta se realizaron ensayos, en la línea de lo que se hizo después luego en los ensayos generales, a los medios ladrillos para conocer los pesos en seco y saturados por inmersión en agua fría, el volumen de agua absorbido según la norma EN 772-21, la densidad aparente seca según el proceso de la norma EN 772-13, la porosidad según la norma EN 772-3 y el volumen. Estos valores se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5. Ensayos previos. Resultados de los ensayos sobre los materiales y probeta

Ladrillo	tipo	Peso Seco (kg)	Peso Saturado (kg)	Volumen (dm ³)	V. total de agua abs. (dm ³)	V. total absorbido (m ³ /m ³)	Densidad Aparente Seca (kg/m ³)
Probeta	--	6,992	8,054	4,085	1,062	0,26	1.712
Ladrillo 1	tejar	1,14	1,362	0,713	0,222	0,311	1.599
Ladrillo 2	tejar	1,26	1,515	0,787	0,255	0,324	1.601
Ladrillo 3	tejar	1,18	1,418	0,744	0,238	0,32	1.586
Ladrillo 4	tejar	1,56	1,78	0,878	0,22	0,251	1.777
Mortero	Arg. cal	1,852	--	1,003	--	0,211	1.847

Una vez ejecutada y fraguada la probeta se realizaron ensayos sobre la misma para conocer las mismas características, según los procedimientos seguidos para los ladrillos. Los valores del mortero de cal se han estimado en función de los de la probeta y los de los ladrillos y mediante

ensayos realizados a trozos de junta procedentes de la demolición de la probeta una vez finalizado el ensayo. Los datos obtenidos son los que figuran en la Tabla 5.

Para realizar el ensayo se colocó la probeta saturada de agua dentro del bastidor, o puerta lateral de la caja, y se situaron las sondas de temperatura y la placa.

Para dar comienzo al ensayo, se puso en funcionamiento la cámara climática haciendo descender su temperatura interior y poniendo en funcionamiento el ventilador de recirculación de aire, consiguiendo de esta forma que la temperatura interior de la caja fría estuviese entre 6°C a 7,50°C. La probeta se colocó en la posición señalada saturada de agua y se procedió a tomar valores de flujo de calor, de temperaturas superficiales y de temperatura y humedad en el laboratorio y en el interior de la caja. La probeta iba perdiendo el agua absorbida por evaporación al ambiente y se iba pesando a intervalos de tres días hasta que el peso se igualó con el medido previamente de la probeta en el ambiente del laboratorio. El equipo utilizado para tomar las mediciones se describe en el siguiente apartado de “ensayos generales”.

El ensayo se inició con la probeta saturada y duró cinco semanas, tiempo que tardó la probeta en perder el agua por evaporación. El flujo de calor iba disminuyendo al tiempo que la probeta iba perdiendo agua, tal y como se había supuesto antes de realizar el ensayo. Los valores de flujo de calor y temperaturas se medían cada 15 minutos. La temperatura del ambiente interior del laboratorio tenía variaciones según el día y la noche y los fines de semana por la forma de acondicionar el local, mientras que en el ambiente interior de la caja prácticamente no había variación. Estas variaciones tenían como consecuencia que en la medición del flujo de calor se pudieran observar claramente las variaciones diarias y semanales. Por este motivo para la realización de una gráfica que permita analizar la relación entre el flujo de calor y el volumen de agua de la probeta se ha optado por representar los valores de flujo de calor medidos a la misma hora a las 10:00 h, de lunes a viernes, en las que la temperatura y humedad se pueden considerar comparables.

La principal conclusión, muy inmediata y clara, es que el procedimiento es válido para pasar a la construcción de la caja guardada de mayor tamaño ya que se aprecia de forma inequívoca que existe una relación entre el contenido de humedad de la probeta y el flujo de calor que la atraviesa, y que en el ensayo realizado existe una relación entre flujo de calor y contenido de humedad.

El presente ensayo se encuentra publicado con resultados, dentro del congreso REHABEND 2018, con el título “Ensayo para evaluar la relación entre el flujo de calor y el volumen de agua en probetas de ladrillo antiguo y argamasa”.

Tras la experiencia de este caso, se diseña y se construye una caja guardada de mayor tamaño para la realización de los ensayos generales, los cuales se describen a continuación:

3.2.2. ENSAYOS GENERALES

Al poder contar con ladrillos originales de edificios antiguos o con otros análogos en densidad y porosidad, el método de ensayo consiste en construir probetas utilizando estas piezas y argamasa similar a la que existe en las fábricas antiguas, sobre las que realizar ensayos de flujo térmico, aplicándoles diferentes contenidos de agua. De esta manera se puede establecer el comportamiento de los diferentes tipos de ladrillo entre sí, además de comparar los resultados de laboratorio con los resultados teóricos de la norma EN1745 expuesta en el apartado anterior.



Figura 18. Esquema de proceso de ensayos en laboratorio.

CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA

Para la realización de los ensayos generales de flujo térmico, los cuales forman parte del grueso de la presente investigación en laboratorio, se diseñó y construyó una cámara refrigerada, altamente aislada con planchas de poliestireno extrusionado de 10 cm de espesor y conductividad térmica $\lambda=0,033$ (W/m·K), ubicada en el mismo laboratorio donde se hicieron las probetas. A continuación se describe la caja guardada con su geometría y características.

En el exterior de la cámara se colocó un equipo de producción de frío Zanotti, modelo MGM10328F compacto, con evaporador en el interior, que mantuviera el ambiente a una temperatura controlada, entre 0 y 5 °C.

Geometria de la cámara:

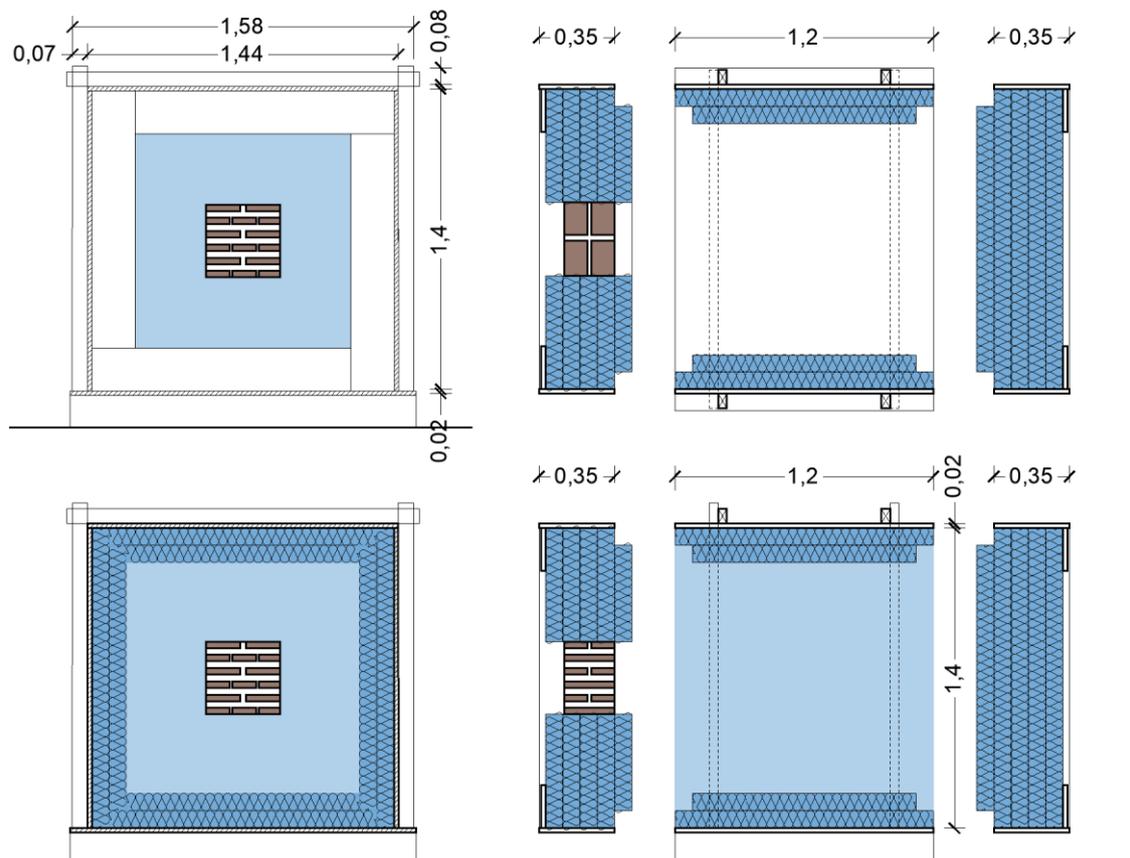


Figura 19. Levantamiento de la caja guardada diseñada para los ensayos.

Para evitar transmisiones de calor perimetrales en las probetas, estas se colocaron en dos paredes que se construyeron con un espesor superior al de las probetas, utilizando cuatro paneles de aislamiento, mientras que las otras dos paredes, el techo y el suelo, se ejecutaron únicamente con dos paneles, Figura 19. La cámara se diseñó de forma que tuviera dos puertas enfrentadas que se pudiesen desplazar para colocar las probetas, en la Figura 31 se puede apreciar la puerta desplazada para poder acceder al interior y a la parte posterior de la probeta.

Despiece de paneles de XPS para la construcción de la cámara:

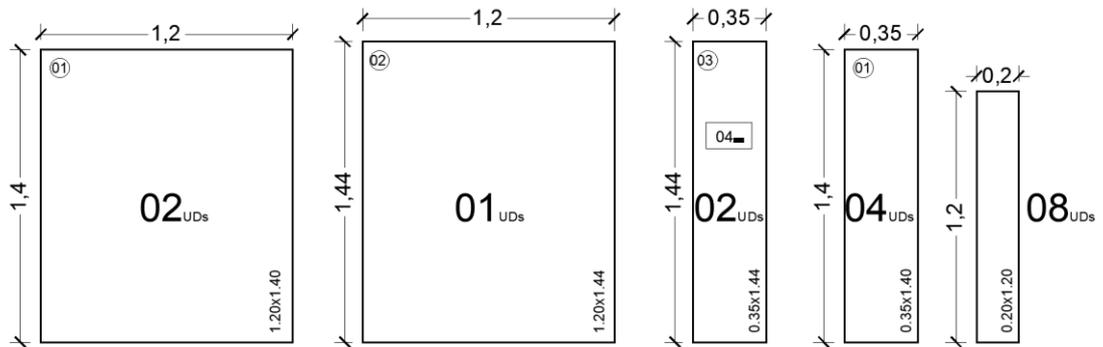


Figura 20. Despiece de placas de XPS de espesor 50mm.



Figura 21. Construcción de la cámara.



Figura 22. Construcción de la cámara

Figura 24. Levantamiento de una de las probetas.

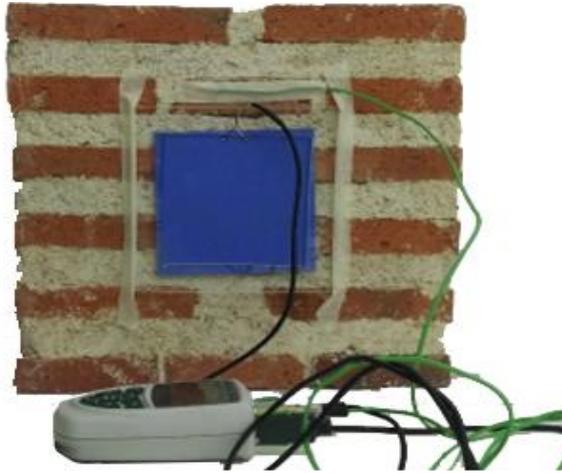


Figura 25. Fotografía de alzado de una de las probetas con ubicación de la placa de flujo.



Figura 26. Probeta en laboratorio saturada. Preparada para el inicio del ensayo.



Figura 27. Probeta en recipiente de polietileno para inicial el proceso de saturación.

Se adjunta a continuación, una ficha tipo de toma de datos, de una de las probetas ensayadas:

Nº de ensayo	1
Ladrillo	Tadrillo de tejar recuperado de Arévalo
Tipo	Tejar
Localización	Arévalo
Origen	Recuperación



DATOS DE LA PROBETA

Dimensiones	300 x305 x255 mm.	
volumen ladrillos	m3	0,01694
volumen probeta	m3	0,02333
volumen argamasa	m4	0,00639
peso seco argamasa (d y v)	peso (kg)	11,05
peso saturado argamasa	peso (kg)	12,53
peso saturado ladrillos	peso (kg)	32,58
peso seco ladrillos	peso (kg)	28,39
peso seco horno	peso (kg)	39,24
peso ambiente laboratorio	peso (kg)	39,50
peso saturada	peso (kg)	44,88
peso final ensayo	peso (kg)	40,68
contenido de agua	l/m3	242,52
puerta	1	

UBICACIÓN DE LOS LADRILLOS EN LA PROBETA

7/1	
5	10
2/4	
6	8
3/11	

ENSAYO PROBETA saturada a seca

Fecha	contenido de		conductancia	conductividad	
	peso probeta	agua			agua
	kg	l	l/m3	W/m2°K	W/m°K
24/07/2019	45,14	5,90	252,87		
29/07/2019	44,54	5,30	227,15	3,24	1,23
31/07/2019	44,34	5,10	218,58	3,23	1,28
19/08/2019	42,94	3,70	158,58	3,05	1,07
20/08/2019	42,74	3,50	150,01	2,99	1,05
26/08/2019	42,14	2,90	124,29	2,90	0,97
02/09/2019	41,94	2,70	115,72	2,61	0,86
06/09/2019	41,54	2,30	98,57	2,69	0,88
11/09/2019	41,34	2,10	90,00	2,65	
17/09/2019	41,14	1,90	81,43	2,38	0,82
23/09/2019	41,09	1,85	79,29	2,25	0,76
30/09/2019	41,04	1,80	77,15	2,24	0,75
03/10/2019	40,99	1,75	77,00	2,28	0,77

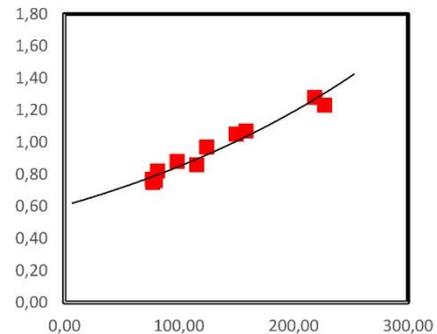


Figura 28. Ficha toma de datos de ensayo en laboratorio. Ladrillo de tejar antiguo de Arévalo.

INSTRUMENTAL PARA LOS ENSAYOS EN LABORATORIO

El equipo utilizado en la realización del ensayo es el que se relaciona a continuación:

- Medidor de flujo térmico AMR modelo FQAD18TSI de Ahlborn de 120 mm x120 mm x 3 mm de silicona, que se adapta bien a la superficie más irregular (precisión 0,02% del valor medido).
- Termopares para medir la temperatura superficial: interior y exterior, y la temperatura: exterior e interior, (precisión $\pm 0,05^{\circ}\text{C} \pm 0,05\%$ del valor medido).

- Para el almacenamiento de datos de flujos de calor y de temperaturas superficiales, se han utilizado equipos Data Logger modelo Almemo 710, de la marca comercial Ahlborn (precisión 0,03%).
- Cámara termográfica marca FLIR ThermoCAM B29, con una sensibilidad térmica de 0,1 °C, rango de medida de temperaturas de -20°C a +100°C, rango del espectro 7,5 a 13µm y con un valor de emisividad de 0,9, el del ladrillo.



Figura 29. Placa de flujo térmico, termopares y base de laboratorio para toma de datos.

EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS. OBTENCIÓN DE DATOS

Como se ha expuesto, el ensayo de flujo térmico se realizó siguiendo el procedimiento de la norma ISO 9869-1, iniciándolo el mismo una vez situadas las probetas saturadas de agua en dos paredes opuestas de la cámara, habilitada al efecto, dejando que las probetas se secan y pesando las mismas a intervalos semanales, de forma que se tuviesen datos para relacionar el valor del flujo térmico y las temperaturas superficiales con su contenido de agua para cada probeta.

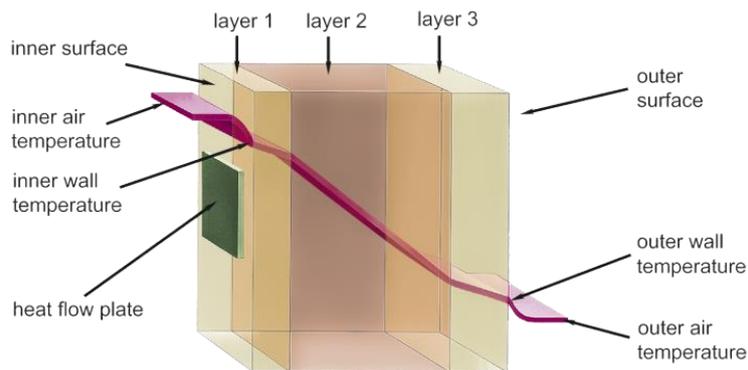


Figura 30. Documentación del fabricante de la placa de flujo. ALMEMO®

Las probetas de fábrica de ladrillo, tenían una cara en contacto con el ambiente del laboratorio y por la otra en contacto con el ambiente refrigerado del interior de la cámara, consiguiendo el efecto de exposición térmica real de un muro de una fachada.



Figura 31. Cámara abierta, pesando la probeta.



Figura 32. Cámara abierta, pesando la probeta

Durante el ensayo, además de la toma de datos de contenido de agua de la probeta por el método gravimétrico en un periodo aproximado de siete días (se dilata en el tiempo a medida que avanza el ensayo y con mayor frecuencia en los primeros días del ensayo), se toman datos de flujo térmico, temperaturas superficiales interiores y exteriores, así como temperaturas del aire, obteniendo las siguientes gráficas tipo (Figura 33. Toma de datos durante el ensayo. Flujo térmico y t^a superficiales)

En la siguiente gráfica se aprecian grafados estrictamente la obtención de datos de flujo térmico (gris) y temperaturas superficiales (exterior a la cámara en rojo e interior a la cámara en azul) durante el tiempo que duró el ensayo, que en el ejemplo siguiente comenzó el 25 de julio y finalizó el 03 octubre de 2019.

Las pequeñas distorsiones que se aprecian en la Figura 33 especialmente en las temperaturas superficiales interiores, son debidas a los procesos de apertura y cierre de la cámara para realizar las pesadas de las probetas por el método gravimétrico. Se consideran despreciables.

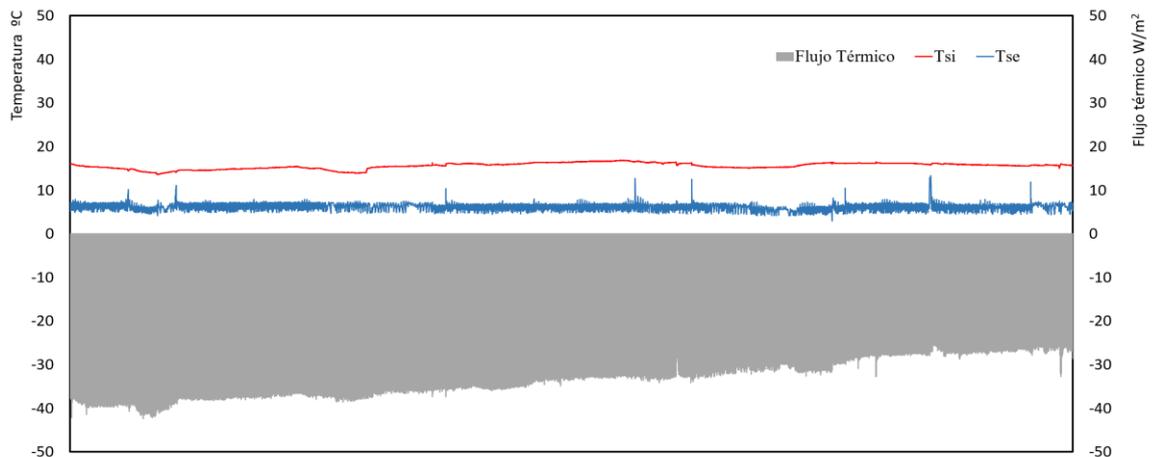


Figura 33. Toma de datos durante el ensayo. Flujo térmico y t^a superficiales. (Artículo 2)

A continuación, se realiza la gráfica de cálculo de la conductividad térmica (λ), tal y como se ha descrito en apartados anteriores, con toma de datos de 4 días, al no tratarse de un régimen “estacionario puro”, sino, que realmente si existen ligeras variaciones en cuanto a las temperaturas superficiales (ver Figura 34. Contenido de agua de la probeta y variación de la conductividad térmica.)

$$\lambda = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})} \quad (01)$$

Donde:

λ	Conductancia térmica, en W/ (m ² ·K)
q	Flujo térmico = Φ/A , en W/m ²
Tsi	temperatura superficial interior, en °C
Tse	temperatura superficial exterior, en °C

A partir del valor de la conductancia (Λ), obtenemos el dato de conductividad térmica (λ), mediante la fórmula:

$$\lambda = \Lambda \times d \quad (02)$$

Donde:

λ	Conductividad térmica (W/m·K)
d	espesor de la probeta (m)

Grafándolo en la misma gráfica con el contenido de humedad de la fábrica:

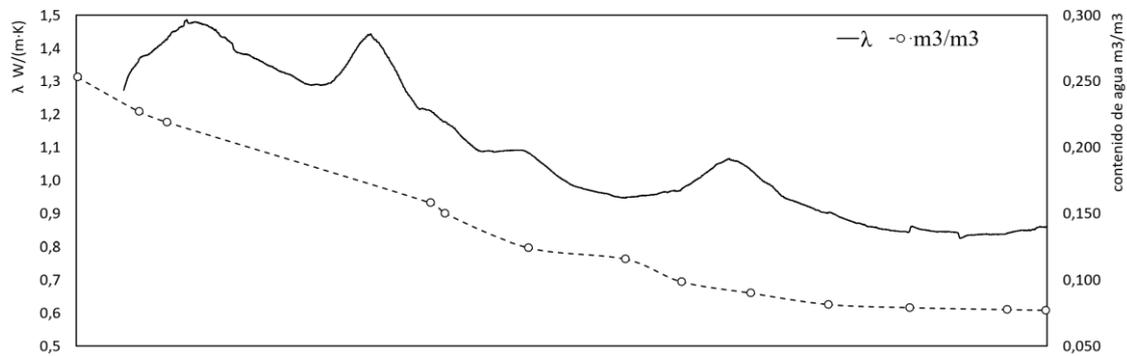


Figura 34. Contenido de agua de la probeta y variación de la conductividad térmica. Artículo 2

Y, si se colocan los valores de la conductividad térmica en función del contenido de agua de la fábrica, obtenemos la siguiente gráfica:

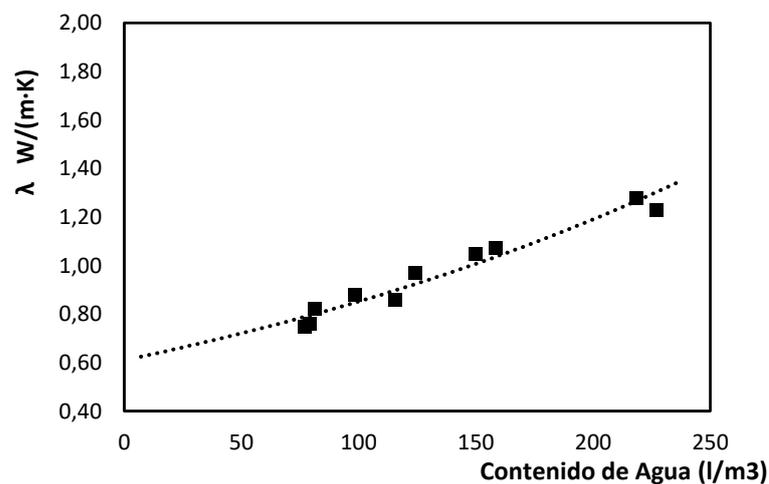


Figura 35. Variación de la conductividad térmica en función del contenido de agua (artículo 3).

3.3. ENSAYOS “IN SITU”

El segundo tipo de ensayos son los realizados “in situ”, es decir, sobre edificios actualmente en régimen (calefactados y/o refrigerados), en los que existe un gradiente de temperaturas a través de la envolvente. Estos ensayos “in situ” se deben llevar a cabo sobre muro de fachadas que no hayan sido objeto de intervenciones y en buen estado de conservación.

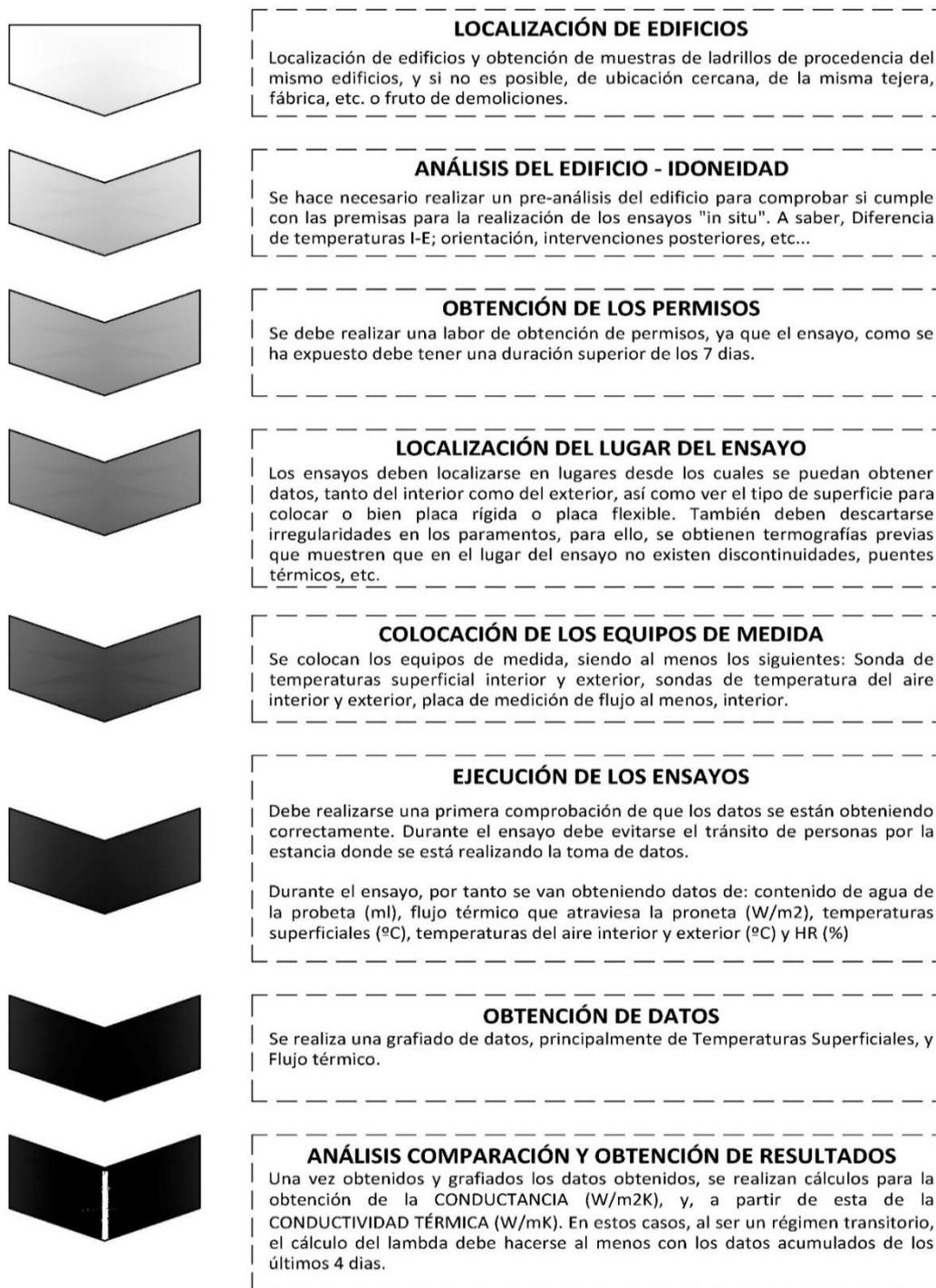


Figura 36. Esquema de proceso de ensayos “in situ”.

La principal característica que diferencia este tipo de ensayos de los ensayos de laboratorio es que **se realizan en un régimen “transitorio”**, es decir, las temperaturas del aire, y por consecuencia las superficiales, en ambas caras del muro no son constantes a lo largo del tiempo, sino que por el contrario pueden tener grandes oscilaciones.



Figura 37. Casa Luelmo, Valladolid, Donde se realizó uno de los ensayos “in situ”.

Este tipo de muros tienen una inercia térmica muy alta, y, por lo tanto, existe un gran desfase onda térmica, así como acumulación de calor en el interior del muro. Por esta razón estos ensayos deben tener una duración de al menos 10 días. Por otro lado, la diferencia de temperaturas media entre el interior y el exterior debe ser de al menos 15 °C, para que exista un salto térmico importante y el flujo sea significativo para ser medido. En el siguiente gráfico, perteneciente al artículo 01, se aprecia forma inequívoca el fenómeno de acumulación y desfase de onda térmica entre las temperaturas exteriores y el flujo detectado por la placa de flujo exterior, y la placa de flujo interior.

En todo momento se ha procurado que las fachadas objeto de estudio estén orientadas al norte, o que estén protegidas de la radiación solar, ya que el fenómeno de calentamiento de la superficie por efecto de la radiación solar (temperatura sol-aire) puede distorsionar los resultados haciendo que el flujo sea muy pequeño en régimen de invierno.

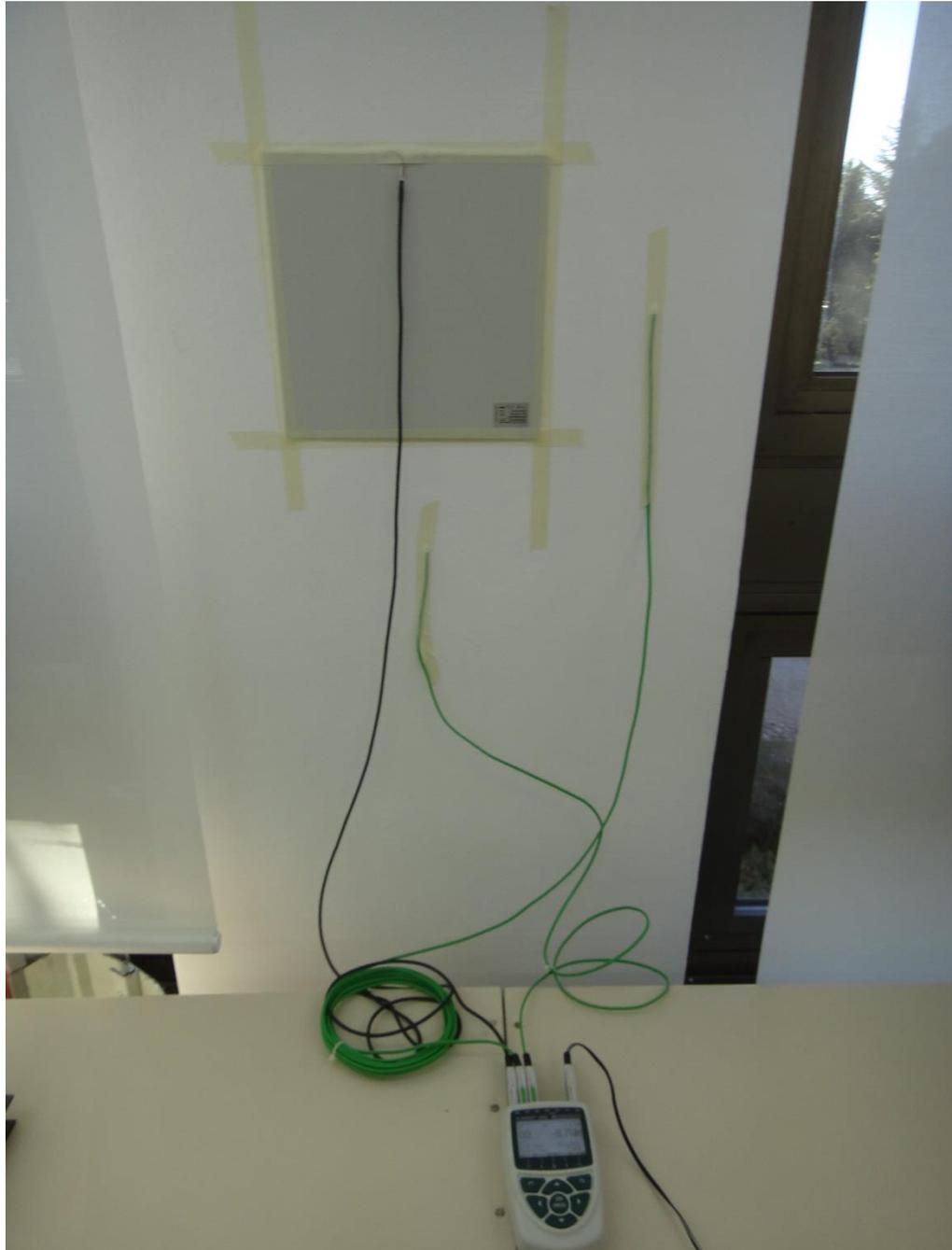


Figura 38. Escuela de Arquitectura, Valladolid, Donde se realizó uno de los ensayos “in situ”.

De los al menos diez días de ensayo, se deben seleccionar al menos uno menos desechando el primero (y en ocasiones el último), ya que habitualmente no son días completos y, además de las pequeñas interferencias que podrían existir durante el montaje y desmontaje de los equipos de medida y la entrada en régimen y el desfase de onda térmica.

EQUIPO UTILIZADO PARA ENSAYOS "IN SITU"

El equipo utilizado en la realización del ensayo es el que se relaciona a continuación (Figura 39):

- Heat flow meter AMR modelo FQAD19T de Ahlborn de 250 mm x 250 mm x 1,5 mm de epoxy resin (figura 2-a) (precisión 0,02% del valor medido) adecuada para acabado plano de yeso.
- Heat flow meter AMR modelo FQAD18TSI de Ahlborn de 120 mm x 120 mm x 3 mm de silicona (figura 2-b), que se adapta bien a la superficie más irregular (precisión 0,02% del valor medido).
- Termopares AMR FTA3902 para medir la temperatura superficial: interior y exterior, y la temperatura: exterior e interior, (precisión $\pm 0,05^{\circ}\text{C} \pm 0,05\%$ del valor medido).
- Para el almacenamiento de datos de flujos de calor y de temperaturas superficiales, se han utilizado equipos Data Logger modelo Almemo 2590, de la marca comercial Ahlborn (figura 2-d) (precisión 0,03%) y Data Logger modelo ALMEMO® 2690-8A 5 entradas, cargador y conexión USB
- Cámara termográfica marca FLIR ThermoCAM B29, con una sensibilidad térmica de 0,1 °C, rango de medida de temperaturas de -20°C a +100°C, rango del espectro 7,5 a 13µm y con un valor de emisividad de 0,9, el del ladrillo.
- - Ordenador portátil con con software ALMEMO 6.0.

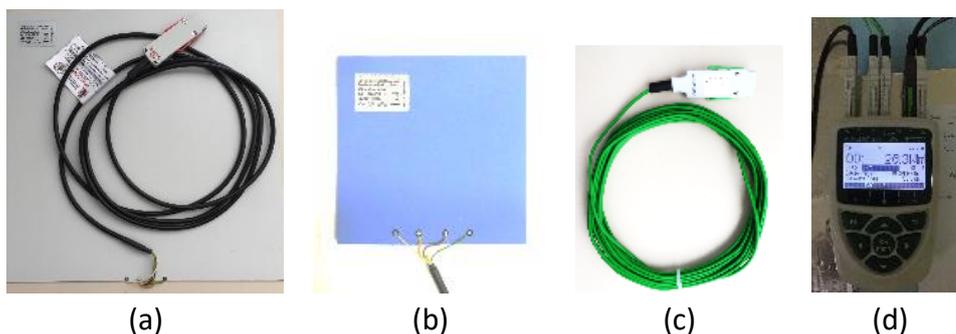


Figura 39. (a) placa de flujo térmico rígida (b) placa de flujo térmico flexible; (c) sonda de temperatura; (d) Data logger.

Nota: Se coloca la placa rígida o la flexible en función del material sobre el que hacer la medición

Tal y como se ha expuesto en apartados anteriores, los ensayos "in situ" se ejecutan según lo normalizado en la norma UNE ISO 9869-1 "Thermal insulation - Building elements - In situ

measurement of thermal resistance and thermal transmittance 2014 part1: Heat flow meter method”.

La placa de flujo debe colocarse en el interior, ya que es el flujo real que “pierde” o “gana” el edificio, fijando su contorno con cinta, las salidas de cable en la zona inferior. En algunos de los ensayos “in situ” realizados, como el del ejemplo y artículo 1 (Figura 40) se colocaron dos placas de flujo térmico, una el interior, para medir el flujo que atraviesa la fachada desde el interior, y otra en el exterior, para conocer el que se produce desde el exterior. Colocar placas a ambos lados de muro, en vez de poner solo la del interior, mejora la calibración de la simulación. Con ellas se captan valores a diferentes horas del día, que son muy distintos, ya que se producen importantes cambios de temperaturas en el exterior.

Además de las placas, y de la misma forma que en los ensayos en laboratorio, se deben colocar sondas de temperatura (termopares), al menos dos al interior y dos al exterior del muro, para medir las temperaturas del aire y las temperaturas superficiales fijados con al menos 10 cm de cinta de pintor. Cabe destacar que algunos modelos de placas de flujo, también tienen medición de temperatura superficial.

Para la correcta ubicación de las placas de flujo térmico en el muro se deben tener especialmente en cuenta dos condicionantes, por un lado, permitir que los cables puedan conectar ambas placas y las sondas a ambos lados de la fachada con el data logger, que recoge los datos (habitualmente cerca de una ventana para poder sacar los termopares exteriores). Por otro, alejarse de los puentes térmicos, que, como se puede apreciar, fueron captados mediante imágenes realizadas con una cámara termográfica, deben evitarse igualmente fuentes de calor o de frío

El ensayo se debe realizar en una fachada norte o sin soleamiento directo y en dos zonas del mismo muro, una seca y otra húmeda. Para detectar las zonas húmeda y seca se utilizará la cámara termográfica. Al exterior se deben colocar resguardados del agua de lluvia.

Se dibujan los alzados y secciones acotadas respecto de la ventana, o elemento fijo y la situación de la ventana en la fachada. Se realizan fotografías del exterior y del interior e imágenes termográficas. Los instrumentos de medida se mantendrán durante una semana existiendo temperaturas exteriores bajas (al menos 5°C en horas nocturnas), y el interior esté calefactado.

Si es posible, se obtendrán muestras del mortero y del ladrillo del muro.

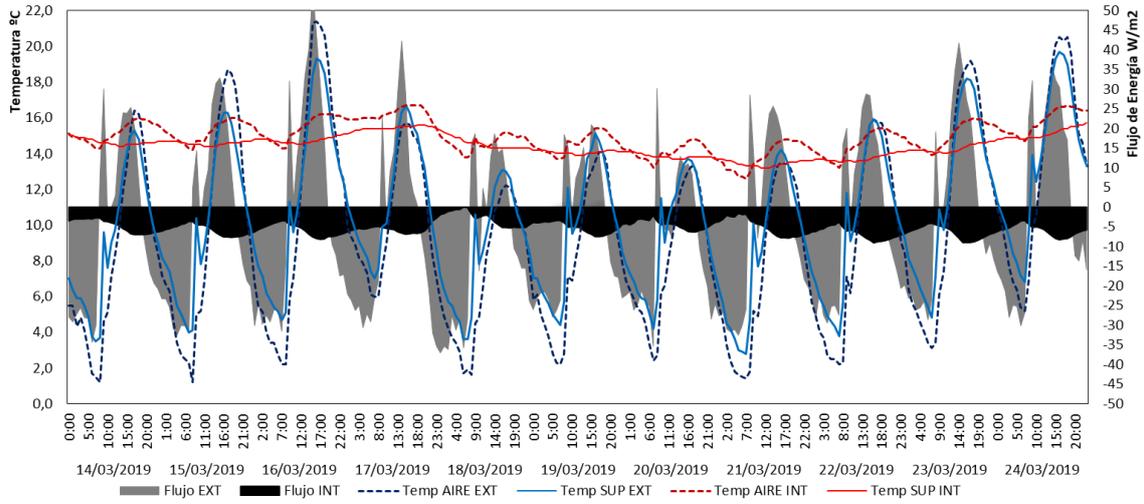


Figura 40. Toma de datos de ensayo "in situ". Temperatura superficial, aire, flujo int. y ext.

Siguiendo el procedimiento de la norma, se realiza el cálculo de la conductancia y conductividad térmica con datos acumulados durante los días que ha durado el ensayo, de tal forma que el valor tiene que estabilizarse, tal y como se aprecia en el siguiente gráfico:

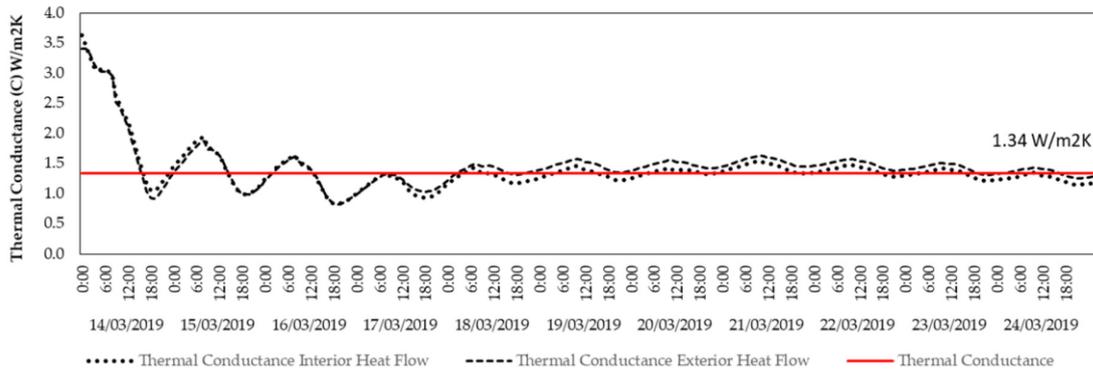


Figura 41. Cálculo del valor de conductancia térmica con valores acumulados durante el ensayo.

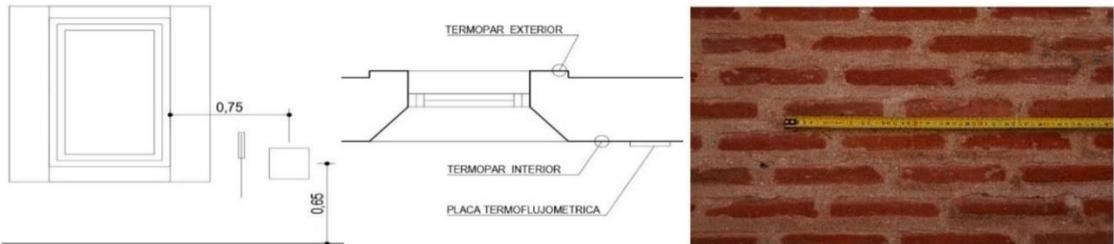
Se muestra a continuación una de las fichas realizadas en los ensayos "in situ" por el equipo de trabajo del proyecto de investigación.

Ensayo IN SITU EP18IN_13

Localización	C/ San Antonio Medina, nº 4, Serrada, Valladolid		
Ladrillo	tejar	155 a 160 mm	38 mm
Aparejo	tizones	Espesor del muro 55cm	
Argamasa	cal y arena		
Tendel	30mm	Llaga	25mm.
Alzado Argamasa/ladrillo			



UBICACIÓN DE LAS SONDAS EN EL ENSAYO



FOTOGRAFÍAS DEL ENSAYO Y EDIFICIO



TERMOGRAFIA



RESULTADOS

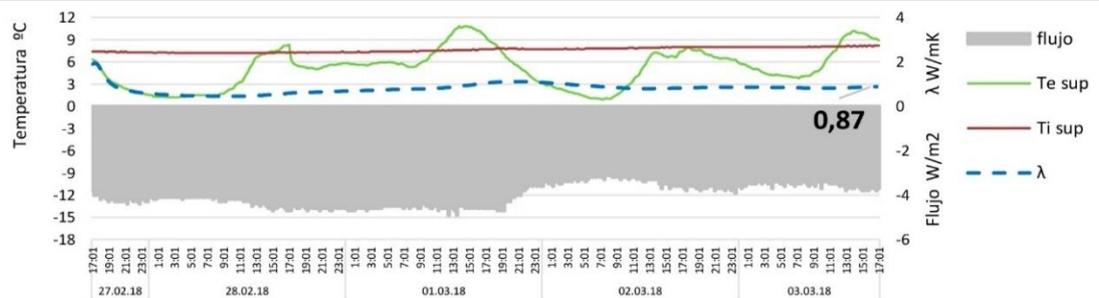


Figura 42. Ficha tipo de ensayos “in situ”. Ensayo de vivienda en Serrada, Valladolid.

3.4. SIMULACIÓN ENERGÉTICA

La simulación energética es una herramienta muy versátil para realizar cálculos térmicos en situaciones no reales, pero es importante que los datos de entrada y salida del **software de simulación estén calibrados con datos reales** para tener una seguridad de la validez de los datos de salida en la simulación final. Es por esto que, con los datos obtenidos en los ensayos “in situ” se va a validar la herramienta de simulación energética para posteriormente analizar, mediante estas simulaciones, situaciones en las que la fachada presente contenidos de agua diferentes o en las que no se pueda llevar a cabo el ensayo de flujo térmico.

Las simulaciones se realizan con el programa Energy plus versión 8.3, que permite que con los resultados obtenidos en comparación con los arrojados “in situ” sea posible conocer el grado de fiabilidad de la simulación. La simulación energética por el método utilizado, se trata de un cálculo en régimen transitorio. Cabe destacar, que este software NO utiliza el valor de la transmitancia de los cerramientos obtenidos de las pestañas del programa sino, que por el contrario utiliza los parámetros característicos de los materiales, es decir, calcula flujos de energía a través de las diferentes capas de los cerramientos. Por esa razón es muy importante definir correctamente los valores de los siguientes parámetros:

- Conductividad (W/mK)
- Emisividad (adimensional)
- Calor específico
- Resistencia al vapor

Para realizar esta validación, se deben establecer unas condiciones de contorno lo más parecidas posible a las del ensayo real del que se han obtenido los datos, es decir, del funcionamiento térmico del muro del ensayo realizado “in situ”. Para la simulación, se genera un archivo climático a partir de los datos recogidos por las sondas de temperatura del aire exterior. Para establecer la temperatura interior, se simula un sistema HVAC (Heat Ventilation Air Conditioned) interior que mantenga una temperatura superficial del cerramiento simulado lo más similar posible a la temperatura superficial obtenida por la sonda durante el ensayo “in situ”. Esto se puede conseguir condicionando la temperatura operativa del interior del espacio en la simulación en una proporción 0,70 radiante, de tal forma que el perfil de funcionamiento del sistema HVAC se ve más condicionado por la temperatura radiante que por la temperatura del aire.

En cuanto al modelo, se genera un muro de dimensiones similares al del ensayo “in situ”, que es el cerramiento de un edificio que tiene forma cúbica, donde el resto de elementos de la envolvente son adiabáticos. Los materiales de los que se compone ese muro que se va a simular poseen las mismas características que los que se emplearon en el laboratorio e “in situ”.

Una vez obtenidos los ensayos “in situ” se realiza una simulación energética del modelo estudiado. Para ello, lo primero que hay que hacer es generar un archivo climático con los datos

obtenidos de las condiciones de contorno durante el ensayo in situ. En segundo lugar, se realiza un proceso de calibración con el objeto de que los resultados de la simulación sean muy parejos a los resultados obtenidos de los ensayos. A partir de los datos obtenidos del comportamiento de las probetas de laboratorio, se realizan varias simulaciones con diferentes grados de humedad, obteniendo el ábaco final de comportamiento. De esta forma se conoce cómo se comportará ese muro si se moja por el medio que sea.

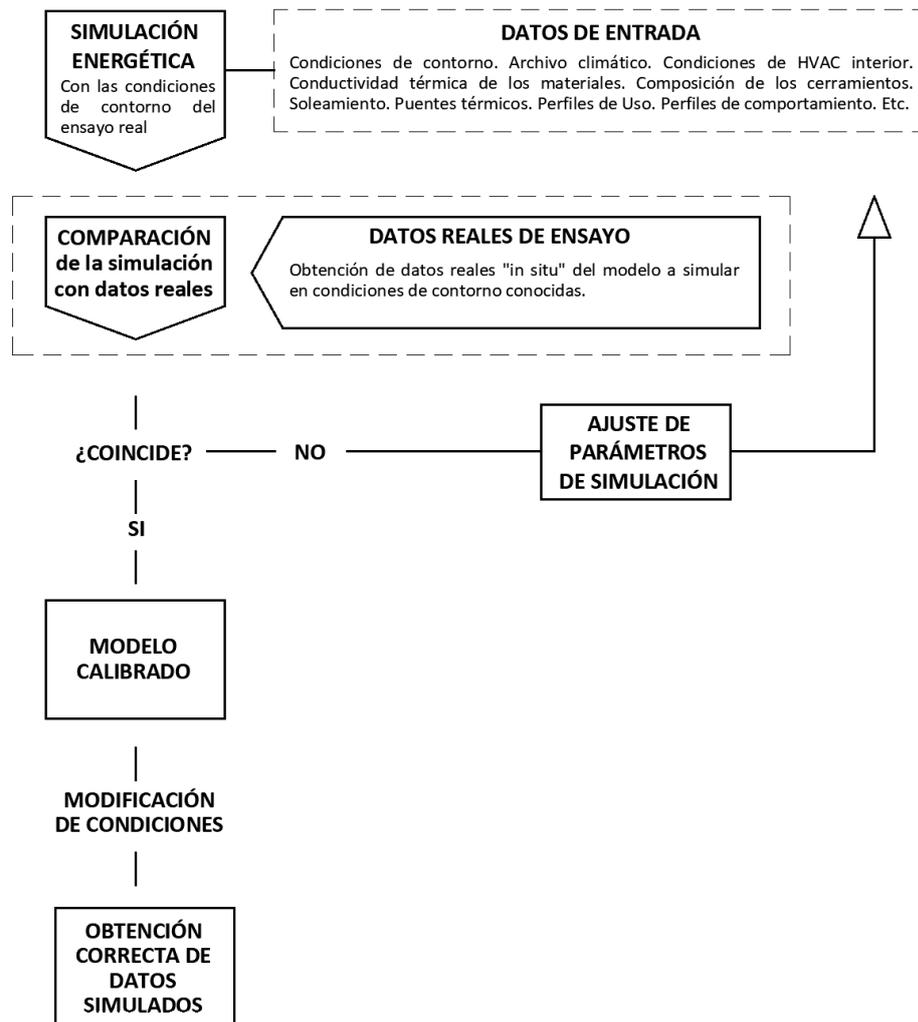


Figura 43. Esquema de calibración de modelo energético

Para llegar a obtener los resultados que se exponen ampliamente en el artículo 1, como se ha expuesto en los párrafos anteriores, el primer paso es tener el modelo calibrado, es decir, existe la certeza que el modelo energético informático se está comportando de forma prácticamente idéntica al modelo real. Esto nos aseguramos tras comparar hora a hora los resultados obtenidos de la simulación, con los resultados obtenidos del modelo energético, tal y como se aprecia en la figura 42.

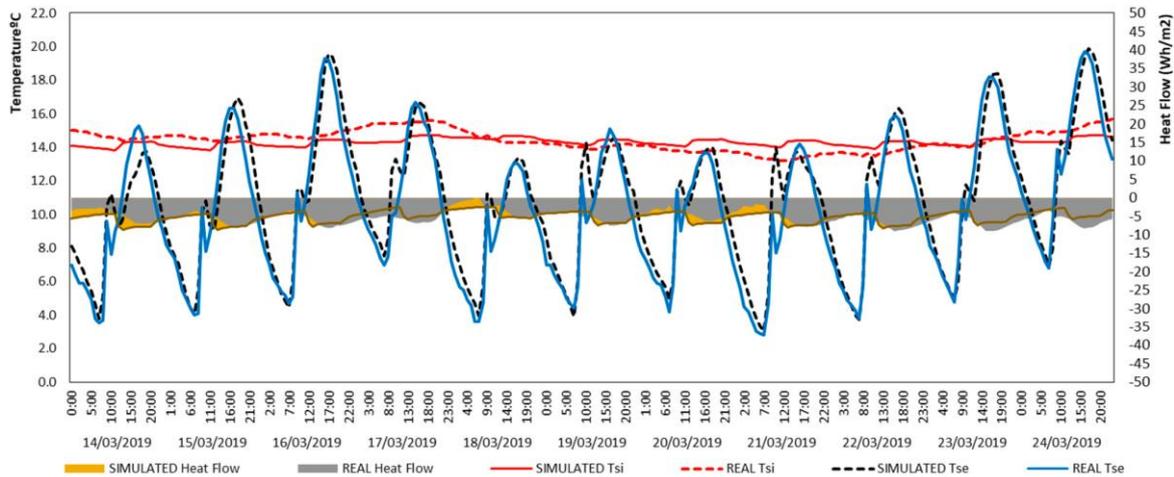


Figura 44. Calibración del modelo energético. (Artículo 1)

Nota de la figura: (flujo simulado en naranja y flujo real en gris. Temperaturas simuladas en discontinuo y temperaturas reales en línea continua).

Una vez calibrado el modelo, a partir de los datos de conductividad térmica obtenidos en laboratorio para una probeta ejecutada con ladrillos muy similares, se realizan diferentes simulaciones con diferentes grados de humedad. A modo de ejemplo, se exponen dos simulaciones una por una posible entrada de agua de lluvia, de tal forma que las capas exteriores (ladrillo prensado) se encuentran con un mayor contenido de agua que las exteriores (ladrillo extrusionado).

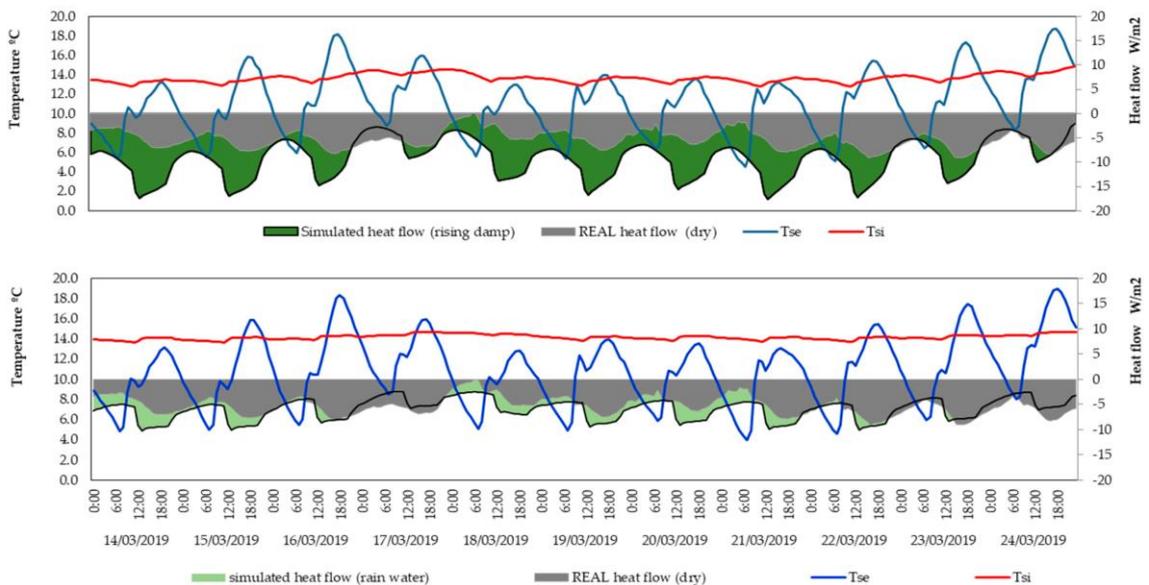


Figura 45. Simulaciones con diferente grado de humedad en las fábricas de ladrillo. (Artículo 1)

Una segunda simulación, asimilada a una ascensión capilar, donde todas las capas tienen un alto contenido de agua. Estos resultados se pueden consultar en el artículo 1 del presente documento, no obstante, se trasponen en la Figura 45.

Realizando estas simulaciones para diferentes grados de humedad de la fábrica compuesta, se puede llegar a definir un ábaco como el de la Figura 46, en el que se puede relacionar, para el caso de estudio cuatro variables: flujo de calor acumulado durante el periodo de simulación, conductancia térmica, contenido de agua de la fábrica, y espesor equivalente de material aislante, es decir, material aislante que habría que adosar al cerramiento, para que su comportamiento fuese igual a si estuviese seca.

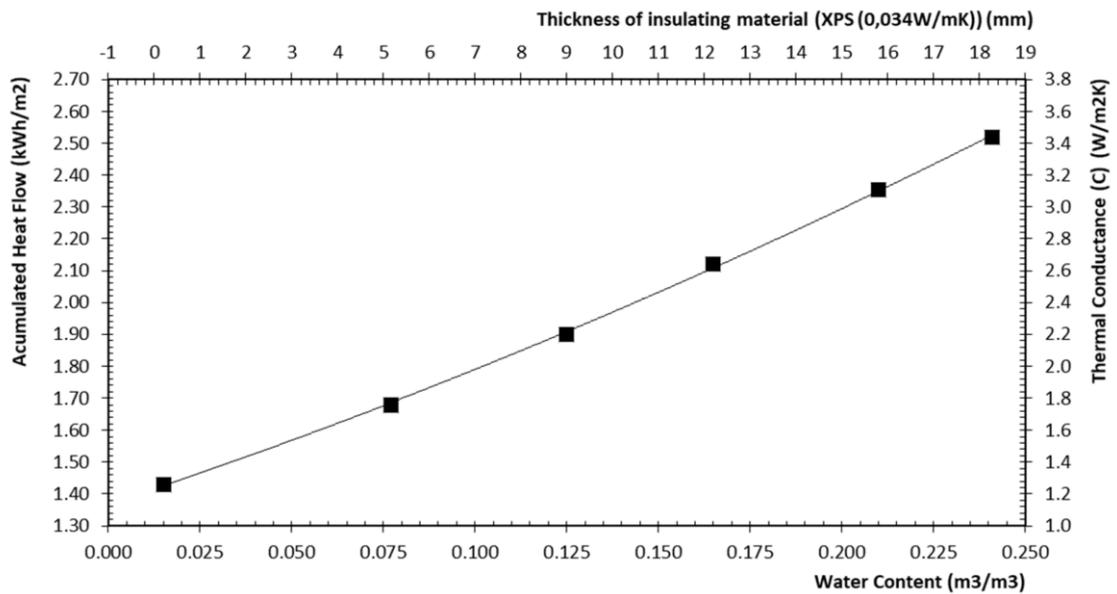


Figura 46. Ábaco conductividad – contenido de agua flujo térmico y espesor de aislamiento equivalente. (Artículo 1)

4. ARTÍCULOS QUE RESPALDAN EL TRABAJO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente tesis y en especial parte de la investigación que se ha llevado a cabo, se ha publicado en tres artículos científicos. Cabe destacar que el cronograma de publicación no corresponde exactamente con el cronograma de la investigación por la extensión en el tiempo de algunos de los ensayos de laboratorio realizados siendo algunos de estos superior a los 6 meses.

El conjunto de los trabajos publicados muestra la investigación que tenía como objetivo proponer un método de ensayo no destructivo para conocer el contenido de humedad de fábricas de ladrillo del Patrimonio Cultural. Para ello, dos de los artículos se centran especialmente en ensayo de laboratorio y otro en ensayos realizados “in situ”. A continuación, se describe un breve resumen de cada aportación, con el fin de mostrar su relación y relevancia conjunta.

ARTÍCULO 01:

MOISTURE INFLUENCE ON THE THERMAL OPERATION OF THE LATE 19TH CENTURY BRICK FACADE, IN A HISTORIC BUILDING IN THE CITY OF ZAMORA.

Se expone un método para estimar el contenido de agua de una fachada de ladrillo macizo mediante el ensayo de flujo térmico, después de analizar con las imágenes térmicas la zona más homogénea de la fachada. Esta toma de datos "in situ" se contrasta con ensayos realizados en laboratorio a probetas de ladrillo de características muy similares con diferente grado de humedad. Se realiza un modelado energético del caso de estudio, simulando posteriormente diferentes grados de humedad. A partir de estos datos, se obtiene un ábaco que relaciona cuatro variables de forma que se pueda hacer una propuesta de rehabilitación térmica del Patrimonio Cultural con el menor consumo energético.

ARTÍCULO 02

THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THE MASONRY OF HANDMADE BRICK CULTURAL HERITAGE WITH RESPECT TO DENSITY AND HUMIDITY

El segundo trabajo se centró en el estudio, en condiciones de laboratorio, de probetas a partir de ladrillos de tejar y argamasa de cal con diferentes densidades. Se lleva a cabo una caracterización de los ladrillos, especialmente en cuanto a su densidad. A continuación, se llevaron a cabo ensayos de flujo a las probetas variando el contenido de agua, de tal forma que se han podido relacionar estos dos parámetros. A partir de los datos obtenidos, se genera un ábaco que pone en relación el contenido de agua, la conductividad térmica, y la densidad de los ladrillos de tejar.

ARTÍCULO 03

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF HANDMADE AND MECHANICAL BRICKS USED IN THE CULTURAL HERITAGE

El tercer trabajo se centró en el estudio de ladrillos realizados mediante técnicas industrializadas o mecanizadas y su comparación con ladrillos de tejar. En este caso, además de una caracterización de la densidad y porosidad aparente, se realizan ensayos de composición mineralógica y de posorimetría de mercurio. Se observa que la forma de fabricación de los ladrillos tiene influencia en su comportamiento térmico, de forma que dos probetas de ladrillo con similar densidad aparente, pero diferente forma de fabricación, tienen comportamientos diferentes.

4.1. MOISTURE INFLUENCE ON THE THERMAL OPERATION OF THE LATE 19TH CENTURY BRICK FACADE, IN A HISTORIC BUILDING IN THE CITY OF ZAMORA.

Alejandro Cabeza-Prieto, María Soledad Camino-Olea, María Ascensión Rodríguez-Esteban, Alfredo Llorente-Álvarez and María Paz Sáez Pérez.

4.1.1. Abstract

To improve the energy performance of restored cultural heritage buildings, it is necessary to know the real values of thermal conductivity of its envelope, mainly of the facades, and to study an intervention strategy that does not interfere with the preservation of their cultural and architectural values. The brick walls with which a large number of these buildings were constructed, usually absorb water, leading to their deterioration, whereas the heat transmission through them is much higher (than when they are dry). This aspect is often not taken into account when making interventions to improve the energy efficiency of these buildings, which makes them ineffective. This article presents the results of an investigation that analyzes thermal behavior buildings of the early 20th century in the city of Zamora, Spain. It has been concluded that avoiding moisture in brick walls not only prevents its deterioration but represents a significant energy saving, especially in buildings that have porous brick masonry walls and with significant thicknesses.

Keywords:

Brick; Moisture; Heat flow; Energetic rehabilitation; Non-destructive test

4.1.2. Reference

Cabeza-Prieto A, Camino-Olea M.S., Rodríguez-Esteban M.A., Llorente-Álvarez A., Saez-Pérez M.P. Moisture Influence on the Thermal Operation of the Late 19th Century Brick Facade, in a Historic Building in the City of Zamora. *Energies*. 2020; 13(6):1307. <https://doi.org/10.3390/en13061307>.

4.1.3. Contribución del Doctorando

Realización de los ensayos in situ y laboratorio, diseño de la metodología, simulación energética calibración y obtención del ábaco.

4.2. THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THE MASONRY OF HANDMADE BRICK CULTURAL HERITAGE WITH RESPECT TO DENSITY AND HUMIDITY.

Alfredo Llorente-Alvarez, Maria Soledad Camino-Olea, Alejandro Cabeza-Prieto, Maria Paz Saez-Perez, Maria Ascensión Rodríguez-Esteban

4.2.1. Abstract

It is very common that the energy refurbishment of buildings of Cultural Heritage is undertaken without considering that their materials and the methods of construction are different from those of modern buildings. Therefore, when seeking the most efficient and effective solutions from an energy point of view, the first step is to understand the thermal characteristics of the materials with which these buildings were constructed. Likewise, as part of this heritage, the fact that many such buildings were constructed using uncoated bricks and with rich voluminous ornamentation or murals must be taken into consideration. This prevents the use of normal construction solutions which consist of attaching a layer of insulating material to the interior or exterior. In addition, the rich surface ornamentation of the walls is not conducive to carrying out tests in situ, so other procedures are needed to determine the thermal behaviour of the facade and thus be able to determine the most appropriate processes for their conservation. To this end, various heat flow tests have been carried out on brick masonry specimens that have characteristics similar to those of the walls of such buildings. This allows an abacus of the approximate thermal conductivity of such brick masonry to be produced with respect to the density of the brick and the moisture content of the wall. The values of this abacus will serve as a reference to guide the energy refurbishment work to be performed on these buildings.

Keywords:

Brick Masonry; Cultural Heritage; Energy rehabilitation; Moisture; Thermal conductivity

4.2.2. Reference

Alfredo Llorente-Alvarez, Maria Soledad Camino-Olea, Alejandro Cabeza-Prieto, Maria Paz Saez-Perez, Maria Ascensión Rodríguez-Esteban, The thermal conductivity of the masonry of handmade brick Cultural Heritage with respect to density and humidity, Journal of Cultural Heritage, Volume 53, 2022, Pages 212-219, ISSN 1296-2074, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.12.004>

4.2.3. Contribución del doctorando

Realización de los ensayos monitorización de los ensayos, relación de las simulaciones, redacción del texto, contribución en las conclusiones.

4.3. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF HANDMADE AND MECHANICAL BRICKS USED IN THE CULTURAL HERITAGE.

Alejandro Cabeza-Prieto, María Soledad Camino-Olea, María Paz Sáez-Pérez, Alfredo Llorente-Álvarez, Ana Belén Ramos Gavilán, and María Ascensión Rodríguez-Esteban.

4.3.1. Abstract

During interventions to improve the energy efficiency of cultural heritage, it is common to use methodologies that are used for current buildings with different thermal behaviour. For this reason, research has been carried out on the thermal behaviour of old brick walls by carrying out thermal flow tests in the laboratory on brickwork specimens, in order to compare the behaviour of handmade bricks and mechanical bricks from more than a century ago, and to analyse the relationship between the values of thermal conductivity, humidity, density and porosity, as well as to compare these results with those obtained by applying the procedure of the EN-1745 standard. It was concluded that bricks behave thermally differently, depending on the manufacturing process: handmade or mechanical, in both types of brick it was found that the higher the moisture content and density were, the higher the brick's thermal conductivity value. It has also been concluded that old bricks have thermal conductivity values different from those indicated in EN-1745 as a function of density, and that the ratio detected in these specimens in the dry state and in the wet state does not conform to the processes indicated in the standard. With regard to porosity, it is important to note that the greater the closed porosity, the lower the conductivity. It has been concluded that in order to intervene in cultural heritage buildings, it is necessary to carry out a specific study of the behaviour of the systems with which they were constructed.

Keywords:

Thermal conductivity; Heat flow tests; Bricks; Brick masonry; Energy efficiency; Cultural heritage

4.3.2. Reference

Cabeza-Prieto, Alejandro, María S. Camino-Olea, María P. Sáez-Pérez, Alfredo Llorente-Álvarez, Ana B.R. Gavilán, and María A. Rodríguez-Esteban. 2022. "Comparative Analysis of the Thermal Conductivity of Handmade and Mechanical Bricks Used in the Cultural Heritage" *Materials* 15, no. 11: 4001. <https://doi.org/10.3390/ma15114001>

4.3.3. Contribución del doctorando

Realización de los ensayos, monitorización de los ensayos, realización de gráficos para el análisis de los resultados, refacción del texto, elaboración de las conclusiones, corresponding author.

5. RESULTADOS

Los principales resultados de esta Tesis se recogen en los artículos publicados que son los que constituyen el núcleo de este trabajo.

En el Artículo 1 se presentó la Metodología para la caracterización previa a los ensayos de los ladrillos y la argamasa de cal utilizada. Se realizó un ensayo “in situ”, en el que se introdujo la novedad de situar una placa por el exterior y otra por el interior, con una propuesta de estudio de los mismos tipos de ladrillo en laboratorio. A partir de los datos obtenidos en “in situ” y teniendo en cuenta los datos de laboratorio, se realizaron simulaciones energéticas para obtener el comportamiento estimado de la fábrica ensayada con diferentes grados de humedad. El principal resultado obtenido fue comprobar, que era posible encontrar la relación entre los datos obtenidos de las mediciones “in situ”, con los datos obtenidos de ladrillos del mismo tipo en laboratorio. Se consigue un primer ábaco para el caso de estudio que relaciona cuatro variables: conductancia térmica (W/m^2K), flujo de calor acumulado (W/m^2K), cantidad de agua en el muro (m^3/m^3), y espesor de aislamiento equivalente a si el muro si se encontrara en estado seco.

En línea con el artículo 2, se estudian diferentes ladrillos hechos, pero todos hechos a mano, observándose que, en el estado seco, la conductividad térmica de los ladrillos es inversamente proporcional a su densidad, corroborando la hipótesis inicial. Por otro lado, se demuestra que existe una clara progresión en los valores de la conductividad térmica en relación con las densidades.

Además, se comprueba que el mortero ejerce una importante influencia en los valores de conductividad térmica de las fábricas de ladrillo, a veces de forma positiva, bajando el coeficiente de absorción de agua, y otras, subiéndolo, como muestran las probetas P1 y P2.

A partir de los resultados de las muestras, se ha realizado un ábaco que permita relacionar los valores de conductividad térmica, densidad y contenido en agua, desde el estado húmedo hasta el saturado, en muros de mampostería de ladrillo con características similares a las probetas muestreadas, con densidades entre 1.700 kg/m^3 a 1.850 kg/m^3 .

El artículo 03 se centra en el estudio comparativo de la conductividad térmica de diferentes tipos de ladrillos utilizados en el Patrimonio Cultural. Al mismo tiempo, se comparan las propiedades físicas que caracterizan al material a través de los ensayos realizados, lo que permite establecer las especificaciones necesarias para la reparación y sustitución de los ladrillos en las fachadas que se puedan utilizar en el proceso de restauración

Los resultados complementarios se recogen en otros trabajos publicados, ponencias y pósteres de conferencias, congreso, capítulos de libros y otros formatos de difusión que se enumeran en el punto 8 de difusión científica.

6. CONCLUSIONES

Las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en este trabajo están estrechamente relacionadas con los objetivos propuestos. Las conclusiones específicas y los detalles adicionales están disponibles en cada uno de los trabajos que componen esta Tesis, los cuales se exponen brevemente a continuación:

En el **artículo 1**, se concluye, dando respuesta al primer objetivo, que la conductancia térmica de los muros de las fachadas de ladrillo y argamasa de cal, varía con el contenido de agua. Cuanto mayor sea el contenido de agua, mayor será el valor de la conductancia térmica. En el caso de paredes de ladrillo similares a las estudiadas, la conductancia térmica puede ser de dos a tres veces mayor en una pared saturada que en una pared seca.

En relación con la idoneidad del ensayo de flujo térmico para conocer el contenido de humedad de un muro de mampostería, se ha comprobado con los ensayos realizados “in situ”; complementados con los ensayos en laboratorio y las simulaciones energéticas es posible estimar el contenido de agua de un cerramiento.

Por otro lado, cabe destacar que cuando se realizan cálculos en proyectos de rehabilitación de edificios del Patrimonio Cultural, las estimaciones de la pérdida de energía a través de los cerramientos de las fachadas se realizan asumiendo que los materiales están secos. Este hecho puede llevar a errores importantes a la hora de estimar el consumo energético durante las intervenciones en edificios con cerramientos similares a los estudiados en este trabajo, ya que en este caso de una fachada de este tipo completamente húmeda para tener el mismo valor de conductancia que una seca, habría que adosarle casi 20mm de material aislante (XPS 0,0034).

Por último, es importante destacar el valor de las simulaciones, al ofrecer con su aplicación amplias posibilidades para analizar energéticamente los edificios con fachadas de espesores importantes y constituidas por materiales porosos antes de proponer una intervención.

En el **artículo 2**, La caracterización térmica realizada en diferentes muestras de ladrillos de tejar, ha revelado que existe una variabilidad de comportamiento de sus propiedades de densidad y de las condiciones de humedad, por lo que se reconocen resultados claramente diferenciados

para los estados seco y saturado. En general, se confirma que la conductividad térmica está relacionada con la densidad y la humedad, de manera que cuanto mayor es la densidad de una mampostería de ladrillo (en este caso concreto, todos los ladrillos son de tejar), mayor es el valor de la conductividad térmica. Asimismo, se comprueba de nuevo, que cuanto mayor es el contenido de agua en una mampostería, mayor es el valor de la conductividad térmica en todos los casos.

Los resultados de los ensayos demuestran que es posible definir un ábaco que permita relacionar los valores de conductividad térmica, densidad y contenido en agua de una fachada de ladrillo ejecutada con ladrillos de tejar y argamasa de cal con propiedades y proporciones como las de las muestras ensayadas, con una relación volumétrica de aproximadamente 70/30% ladrillo/mortero, de tal forma que, conociendo dos valores, se puede estimar el tercero. Por lo tanto, el trabajo experimental realizado para determinar la conductividad térmica de la mampostería estudiada permite tener una mejor predicción del comportamiento de las fachadas de ladrillo y poder dar una mejor respuesta de eficiencia energética a este tipo de mampostería sometida a diferentes estados de humedad. Su realización permite determinar el comportamiento de la envolvente de los edificios existentes para recomendar soluciones tecnológicas adecuadas que mejoren el confort higrotérmico humano y reduzcan el consumo energético.

Con los ensayos y resultados obtenidos y expuestos en el **artículo 3**, se concluye de nuevo, que la conductividad térmica de la mampostería de ladrillo presenta valores más elevados con un mayor contenido de humedad, aunque los resultados de los ensayos realizados no dan valores tan elevados como cuando se realiza el cálculo según la norma EN 1745. Posiblemente, el factor de conversión de la humedad dado en la norma no es el adecuado para ladrillos viejos recuperados de edificios antiguos, por lo que entendemos que sería necesario evaluar la posibilidad de introducir un factor de envejecimiento.

Se vuelve a observar en línea con lo expuesto en el artículo 02, que el valor de la conductividad térmica también depende de la densidad. Si se comparan ladrillos hechos o fabricados por el mismo proceso, cuanto mayor sea la densidad, mayor será el valor de conductividad. Sin embargo, no se puede hacer la misma afirmación cuando se comparan ladrillos hechos a mano con ladrillos mecánicos (extruidos y prensados).

Otra característica observada que influye en la conductividad es la porosidad. En los ensayos realizados, se observó que existe una diferencia significativa en la relación entre la porosidad real y la porosidad aparente entre los ladrillos hechos a mano y los ladrillos mecánicos. En los ladrillos hechos a mano, no hay tanta diferencia entre las dos porosidades como en los ladrillos mecánicos, y parece que este valor puede indicar la diferencia entre los gráficos de conductividad al contenido de agua de las muestras hechas con diferentes ladrillos. En el estado seco, la diferencia de conductividad de las muestras de ladrillos mecánicos es menor en proporción a su densidad que la de los ladrillos hechos a mano. En estado seco, la diferencia de

conductividad de las muestras de ladrillos mecánicos es menor en proporción a su densidad que la de los ladrillos hechos a mano.

Si se comparan los resultados de los ensayos de laboratorio con los estimados por el procedimiento EN 1745 en base a las densidades de los ladrillos, se puede concluir que, en estado seco, los valores de conductividad, resultantes de los ensayos, son mayores; sin embargo, estos valores, en estado saturado, son mucho menores.

Los resultados obtenidos son importantes para la rehabilitación energética de edificios antiguos construidos con ladrillos, ya que permiten conocer los valores reales de conductividad de este tipo de mampostería, y evaluar la importancia de controlar el contenido de agua en las intervenciones, no sólo por las lesiones que pueden producirse, sino porque la diferencia de conductancia entre muros secos y saturados puede ser de 1,82 a 2,21 según el tipo de ladrillo; estas diferencias pueden provocar errores importantes en el estudio del comportamiento térmico de estos edificios si no se tiene en cuenta este factor

Como **conclusión final**, cabe destacar que la adecuación y compatibilidad, así como el conocimiento exhaustivo del comportamiento de los materiales tradicionales, permite prolongar su vida útil y su ciclo de vida. De esta forma se reduce el consumo de nuevos materiales, contribuyendo así a reducir las emisiones de CO₂, muy elevadas en el sector de la construcción.

6.1. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Como futuras líneas de investigación, se propone continuar con los ensayos de los ladrillos, estudiando en laboratorio más tipologías, con diferentes formas de fabricación, y relacionando su comportamiento con la caracterización del material, con diferentes tipos de argamasas y diferente proporción ladrillo-argamasa en las probetas, para crear una base de datos más grande que pudiera servir para la rehabilitación eficiente del Patrimonio Cultural construido con ladrillo.

Tras la realización de los ensayos de flujo “in situ”, en especial los recogido en el primer artículo de la presente tesis, en el que se situaron placas de flujo por el interior y por el exterior, entendemos que se debería iniciar una nueva línea de investigación basada en este ensayo que permita evaluar el comportamiento real de los muros basado en el flujo térmico y no en la transmitancia térmica. Esto permitiría valorar mejor el efecto de la inercia térmica y del contenido de agua y de la no homogeneidad de los muros del Patrimonio Cultural.

Complementarios a estos ensayos de flujo, serían las simulaciones que se han realizado en el artículo 1, y que permitirían hacer un estudio completo del comportamiento térmico de las fachadas del Patrimonio Cultural.

7. BIBLIOGRAFIA

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS, TESIS DCTORALES Y LIBROS

- Andreotti, M., Calzolari, M., Davoli, P., Pereira, L. D., Lucchi, E., & Malaguti, R. (n.d.). Design and Construction of a New Metering Hot Box for the In Situ Hygrothermal Measurement in Dynamic Conditions of Historic Masonries. *Mdpi.Com*. <https://doi.org/10.3390/en13112950>
- Azizi, S., Moyne, C., & Degiovanni, A. (1988). Approche expérimentale et théorique de la conductivité thermique des milieux poreux humides-I. Expérimentation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31(11), 2305–2317. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(88\)90162-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(88)90162-7)
- Bal, H., Jannot, Y., Gaye, S., & Demeurie, F. (2013). Measurement and modelisation of the thermal conductivity of a wet composite porous medium: Laterite based bricks with millet waste additive. *Construction and Building Materials*, 41, 586–593. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.032>
- Barbero Barrera, M. (2011). *Mejora del comportamiento térmico de los morteros de cal aditivados y su empleo en la rehabilitación de inmuebles*. <http://oa.upm.es/10612>
- Barbero-Barrera, M. M., Flores-Medina, N., & Moreno-Fernández, E. (2019). Thermal, physical and mechanical characterization of volcanic tuff masonries for the restoration of historic buildings. *Materiales de Construcción*, 69(333), e179–e179. <https://doi.org/10.3989/mc.2019.12917>
- Barbero-Barrera, M. M., García-Santos, A., & Neila-González, F. J. (2014). Thermal conductivity of lime mortars and calcined diatoms. Parameters influencing their performance and comparison with the traditional lime and mortars containing crushed marble used as renders. *Energy and Buildings*, 76, 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.065>

- Barrero, R., ... A. A.-... Sevilla. 26 a 28 de octubre, & 2000, undefined. (n.d.). El proceso de fabricación de productos cerámicos a principios de siglo en Tierra de Campos: La producción de cerámica cocida preindustrial y el paso a la. *Dialnet.Unirioja.Es*. Retrieved July 15, 2022, from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=606464>
- Belpoliti, V., Bizzarri, G., Boarin, P., Calzolari, M., & Davoli, P. (2018). A parametric method to assess the energy performance of historical urban settlements. Evaluation of the current energy performance and simulation of retrofit strategies for an Italian case study. *Journal of Cultural Heritage, 30*, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.08.009>
- Bondi, P., & Stefanizzi, P. (2001). Hygro-thermal performance of hollow bricks and current standards. *Energy and Buildings, 33*(7), 731–736. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00060-3)
- Calzolari, Marta. (2016). *Prestazione energetica delle architetture storiche : sfide e soluzioni : analisi dei metodi di calcolo per la definizione del comportamento energetico*. F. Angeli.
- 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. *Materiales de Construcción, 64*(314), e020. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.02513>
- Camino Olea, M. S. (2001). *Construcción y ornamentación de las fachadas de ladrillo prensado, al descubierto, en la ciudad de Valladolid*.
- Camino-Olea, M. S., Llorente-Alvarez, A., Cabeza-Prieto, A., & Olivar-Parra, J. M. (2019). Test evaluating the effectiveness of hydrofugation in the protection of handmade brick walls against rainwater. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 603*(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/3/032040>
- Campanale, M., & Moro, L. (2016). Thermal Conductivity of Moist Autoclaved Aerated Concrete: Experimental Comparison Between Heat Flow Method (HFM) and Transient Plane Source Technique (TPS). *Transport in Porous Media, 113*(2), 345–355. <https://doi.org/10.1007/s11242-016-0697-8>
- Cesaratto, P. G., & de Carli, M. (2013). A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings. *Energy and Buildings, 59*, 29–36. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.08.036>
- Chin, W. Q., Lee, Y. H., Amran, M., Fediuk, R., Vatin, N., Kueh, A. B. H., & Lee, Y. Y. (2022). A Sustainable Reuse of Agro-Industrial Wastes into Green Cement Bricks. *Materials, 15*(5), 1713. <https://doi.org/10.3390/ma15051713>
- Choi, D. S., & Ko, M. J. (2017). Comparison of Various Analysis Methods Based on Heat Flowmeters and Infrared Thermography Measurements for the Evaluation of the In Situ Thermal Transmittance of Opaque Exterior Walls. *Energies 2017, Vol. 10, Page 1019, 10*(7), 1019. <https://doi.org/10.3390/EN10071019>
- Cuerda Barcaiztegui, E., & Neila González, F. J. (2012). Procedimiento de análisis y evaluación para la rehabilitación térmica de cerramientos de fachada en edificios residenciales. Caso de estudio en el barrio Pinar del Rey, Madrid. *CONAMA 2012. Congreso Nacional de Medio*

Ambiente | CONAMA 2012. Congreso Nacional de Medio Ambiente | 26-30/11/2012 | Madrid, España.

- de Berardinis, P., Rotilio, M., Marchionni, C., & Friedman, A. (2014). Improving the energy-efficiency of historic masonry buildings. A case study: A minor centre in the Abruzzo region, Italy. *Energy and Buildings*, 80, 415–423. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.05.047>
- de Freitas, V. P., Abrantes, V., & Crausse, P. (1996). Moisture migration in building walls— Analysis of the interface phenomena. *Building and Environment*, 31(2), 99–108. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00027-5](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00027-5)
- de Santoli, L. (2015). Guidelines on energy efficiency of cultural heritage. *Energy and Buildings*, 86, 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.050>
- Degiovanni, A., & Moyne, C. (1987). Conductivité thermique de matériaux poreux humides: évaluation théorique et possibilité de mesure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(11), 2225–2245. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90217-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90217-1)
- Dell’Isola, M., D’Ambrosio Alfano, F. R., Giovinco, G., & Ianniello, E. (2012). Experimental analysis of thermal conductivity for building materials depending on moisture content. *International Journal of Thermophysics*, 33(8–9), 1674–1685. <https://doi.org/10.1007/s10765-012-1215-z>
- Demirbilek, F. N., & Yener, C. (1996). A proposal for “correction values” for winter outdoor design temperatures. *Solar Energy*, 57(2), 111–116. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00045-X)
- Dondi, M., Mazzanti, F., Principi, P., Raimondo, M., & Zanarini, G. (2004). Thermal Conductivity of Clay Bricks. In *Published on the Journal of Materials in Civil Engineering* (Issue 1). <https://core.ac.uk/download/pdf/37835971.pdf>
- England, H. (2011). Energy Efficiency and Historic Buildings: Application of Part L of the Building Regulations to Historic and Traditionally Constructed Buildings. *English Heritage: Swindon, UK*.
- Fernández, M. V., & Ristori, J. A. (1984). *Arquitectura mudéjar en León y Castilla*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/46938>
- Ficco, G., Iannetta, F., Ianniello, E., D’Ambrosio Alfano, F. R., & Dell’Isola, M. (2015). U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings. *Energy and Buildings*, 104, 108–121. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.06.071>
- García Ten, J., Orts, M. J., Saburit, A., & Silva, G. (2010a). Thermal conductivity of traditional ceramics. Part I: Influence of bulk density and firing temperature. *Ceramics International*, 36(6), 1951–1959. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2010.05.012>
- García Ten, J., Orts, M. J., Saburit, A., & Silva, G. (2010b). Thermal conductivity of traditional ceramics. Part I: Influence of bulk density and firing temperature. *Ceramics International*, 36(6), 1951–1959. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.012>

- Gawin, D., Kosny, J., & Desjarlais, A. (n.d.). *Effect of Moisture on Thermal Performance and Energy Efficiency of Buildings with Lightweight Concrete Walls*.
- Grubeša, I. N., Teni, M., Krstić, H., Energies, M. V.-, & 2019, undefined. (n.d.). Influence of freeze/thaw cycles on mechanical and thermal properties of masonry wall and masonry wall materials. *Mdpi.Com*. Retrieved July 15, 2022, from <https://www.mdpi.com/447612>
- Haffen, S., Géraud, Y., Rosener, M., & Diraison, M. (2017). Thermal conductivity and porosity maps for different materials: A combined case study of granite and sandstone. *Geothermics*, 66, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.12.005>
- Künzel, H. M., & Kiessl, K. (1996). Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(1), 159–167. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(96\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(96)00084-1)
- Li, R., Zhou, Y., Li, C., Li, S., & Huang, Z. (2019). Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 213, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.040>
- Lidelöw, S., Örn, T., Luciani, A., & Rizzo, A. (2019a). Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 45, 231–242. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.09.029>
- Lidelöw, S., Örn, T., Luciani, A., & Rizzo, A. (2019b). Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 45, 231–242. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.09.029>
- Lidelöw, S., Örn, T., Luciani, A., & Rizzo, A. (2019c). Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 45, pp. 231–242). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.029>
- Litti, G., Khoshdel, S., Audenaert, A., & Braet, J. (2015a). Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings. *Energy and Buildings*, 105, 393–411. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.049>
- Litti, G., Khoshdel, S., Audenaert, A., & Braet, J. (2015b). Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings. *Energy and Buildings*, 105, 393–411. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.07.049>
- Llorente-Álvarez. (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*. Universidad de Valladolid.
- Lucas Bonilla, M., Muriel Delgado, B., & Montalbán Pozas, B. (2021). Propuesta de implementación de sistema de sensorización y monitorización para la mejora de edificios públicos = Implementing a monitoring system's proposal for the improvement of public buildings. *Anales de Edificación*, 6(3), 35. <https://doi.org/10.20868/ade.2020.4613>
- Lucchi E. (2017). Thermal transmittance of historical stone masonries: A comparison among standard, calculated and measured data. *Energy and Buildings*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816318011?casa_token=ZMmMXbGycJUAAAAA:vRlwM2Zh0s5pJlBpRx9TIORQP2t7uGZ_phRterMzOqOqU-zgoqVdrdzLQBLmSllBwXyvsApg

- Lucchi, E. (2017). Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter measurements. *Energy and Buildings*, 134, 171–184. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.10.045>
- Lucchi, E., Pereira, L. D., Andreotti, M., Malaguti, R., Cennamo, D., Calzolari, M., & Frighi, V. (2019). Development of a Compatible, Low Cost and High Accurate Conservation Remote Sensing Technology for the Hygrothermal Assessment of Historic Walls. *Electronics* 2019, Vol. 8, Page 643, 8(6), 643. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS8060643>
- Lucchi, E., & Pracchi, V. (2013). *Efficienza energetica e patrimonio costruito: La sfida del miglioramento delle prestazioni nell'edilizia storica*. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=GncFAGAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Lucchi,+E.,+%26+Pracchi,+V.+\(2013\).+Efficienza+energetica+e+patrimonio+costruito:+La+sfi+da+del+miglioramento+delle+prestazioni+nell%E2%80%99edilizia+storica+\(Vol.+662\).+Mag+gioli+Editore&ots=xl93QeTV9m&sig=zZWFTWSkLcsCbS6t_6SLZnrkXTg](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=GncFAGAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Lucchi,+E.,+%26+Pracchi,+V.+(2013).+Efficienza+energetica+e+patrimonio+costruito:+La+sfi+da+del+miglioramento+delle+prestazioni+nell%E2%80%99edilizia+storica+(Vol.+662).+Mag+gioli+Editore&ots=xl93QeTV9m&sig=zZWFTWSkLcsCbS6t_6SLZnrkXTg)
- Lucchi, E., Roberti, F., & Alexandra, T. (2018). Definition of an experimental procedure with the hot box method for the thermal performance evaluation of inhomogeneous walls. *Energy and Buildings*, 179, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.049>
- Martínez, C., Cotes, T., & Corpas, F. A. (2012). Recovering wastes from the paper industry: Development of ceramic materials. *Fuel Processing Technology*, 103, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.10.017>
- Millán García. (2010). *Influencia de la humedad en la transmitancia térmica de los cerramientos y en la demanda energética de los edificios*. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea.
- Montalban Pozas, M. B. (2015). *Rehabilitación sostenible de la arquitectura tradicional del valle del Jerte*.
- Monteiro, C. R. A. M., Pérez, G. Q., & Zancajo, V. C. (2014). Desempeño acústico de vivienda tradicional en tierra. *XI CIATTI 2014. Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra*, 287–296. <https://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2015/027coca.pdf>
- Moyne, C., Batsale, J. C., & Degiovanni, A. (1988). Approche expérimentale et théorique de la conductivité thermique des milieux poreux humides-II. Théorie. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31(11), 2319–2330. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(88\)90163-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(88)90163-9)
- Muriel Holgado, B., Lucas Bonilla, M., Montalban Pozas, M. B., Amigo Gamero, I., & Barroso Ramírez, S. (2021). Indicadores de consumo energético obtenidos a través del análisis de datos en edificios. *Greencities, 11º Foro de Inteligencia y Sostenibilidad Urbana: Actas Del XI International Greencities Congress, 2021, ISBN 978-84-09-19596-1, Págs. 125-137*, 125–137.
- Nardi, I., Lucchi, E., de Rubeis, T., & Ambrosini, D. (2018). Quantification of heat energy losses through the building envelope: A state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography. In *Building and Environment* (Vol. 146, pp. 190–205). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.050>

- Ojanen, T., & Kumaran, K. (2016). Effect of Exfiltration on the Hygrothermal Behaviour of a Residential Wall Assembly: [Http://Dx.Doi.Org/10.1177/109719639601900303](http://Dx.Doi.Org/10.1177/109719639601900303), 19, 215–227. <https://doi.org/10.1177/109719639601900303>
- Olea, M. S. C., & Montoro, R. B. (2014). La terminología de los títulos de los proyectos para conservar el patrimonio cultural = The Terminology of Titles of Projects to Conserve the Cultural Heritage. In *Revista electrónica ReCoPar* (Vol. 0, Issue 9, pp. 29–42). <http://polired.upm.es/index.php/recopar/article/view/2225>
- Olivieri, F. (2013). *Caracterización experimental y modelo predictivo del comportamiento térmico de una fachada vegetal* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.22384>
- Olivieri, F., Neila, F. J., & Bedoya, C. (2009). Energy saving and environmental benefits of metal box vegetal facades. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 127, 325–335. <https://doi.org/10.2495/RAV090291>
- Olivieri, F., Olivieri, L., & Neila, J. (2014). Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental mediterranean climate. *Building and Environment*, 77, 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.019>
- P Baker. (2011). U-values and traditional buildings: in situ measurements and their comparisons to calculated values. *Historic Scotland Technical*.
- Pavlík, Z., Fiala, L., Vejmelková, E., & Černý, R. (2013a). Application of effective media theory for determination of thermal properties of hollow bricks as a function of moisture content. *International Journal of Thermophysics*, 34(5), 894–908. <https://doi.org/10.1007/s10765-012-1183-3>
- Pavlík, Z., Fiala, L., Vejmelková, E., & Černý, R. (2013b). Application of Effective Media Theory for Determination of Thermal Properties of Hollow Bricks as a Function of Moisture Content. *International Journal of Thermophysics*, 34(5), 894–908. <https://doi.org/10.1007/s10765-012-1183-3>
- Pérez-Bella, J. M., Domínguez-Hernández, J., Cano-Suñén, E., Alonso-Martínez, M., & del Coz-Díaz, J. J. (2015). Detailed territorial estimation of design thermal conductivity for façade materials in North-Eastern Spain. *Energy and Buildings*, 102, 266–276. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.025>
- Pérez-Bella, J. M., Domínguez-Hernández, J., Cano-Suñén, E., del Coz-Díaz, J. J., & Álvarez Rabanal, F. P. (2015). A correction factor to approximate the design thermal conductivity of building materials. Application to Spanish façades. *Energy and Buildings*, 88, 153–164. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.12.005>
- Pérez-Bella, J. M., Domínguez-Hernández, J., Rodríguez-Soria, B., del Coz-Díaz, J. J., & Cano-Suñén, E. (2012). Estimation of the exposure of buildings to driving rain in Spain from daily wind and rain data. *Building and Environment*, 57, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.05.010>
- Perier, P. (1853). *Tesoro de albañiles, ó, Guía teórico-práctico-legislativa de albañilería*.

- Pozas, B. M., & Espada, M. J. (2016). Getting Results in an Historical Dwelling Stock in a Thermal Simulation with EnergyPlus. *Procedia Engineering*, 161, 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.560>
- Ramos Gavilán, A., Rodríguez Esteban, M., Antón Iglesias, M., Sáez Perez, M., Camino Olea, M., & Caballero Valdizán, J. (2018). Experimental Study of the Mechanical Behaviour of Bricks from 19th and 20th Century Buildings in the Province of Zamora (Spain). *Infrastructures*, 3(3), 38. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030038>
- Rivera, Y., Espejo, L. A., Méndez, J. M., & Narciso, M. (2017). Sistema de monitoreo de ganado bovino. *Pistas Educativas*, 39(112), 452–461. <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>
- Roders, A. P., & van Oers, R. (2014). Wedding cultural heritage and sustainable development: Three years after. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 4(1), 2–15. <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-04-2014-0015/FULL/XML>
- Rodríguez Esteban, M. A. (2012). La arquitectura de ladrillo y su construcción en la ciudad de Zamora (1888-1931). In *La arquitectura de ladrillo y su construcción en la ciudad de Zamora (1888-1931)*. Instituto de Estudios Zamoranos “Florián de Ocampo.”
- Rodríguez-Esteban, M. A., Camino-Olea, M. S., & Sáez-Pérez, M. P. (2014). El ladrillo en la arquitectura ecléctica y modernista de la ciudad de Zamora: Análisis de los tipos, los aparejos y la ejecución de los muros. *Informes de La Construcción*, 66(535). <https://doi.org/10.3989/ic.13.053>
- Rotilio, M., Cucchiella, F., de Berardinis, P., & Stornelli, V. (2018). Thermal Transmittance Measurements of the Historical Masonries: Some Case Studies. *Energies*, 11(11), 2987. <https://doi.org/10.3390/en11112987>
- Ruiz, L., Delgado, E., Neila, F. J., & Vega, S. (2012). Comparativa del comportamiento acústico entre fachadas multicapas ligeras y fachadas tradicionales. *Materiales de Construcción*, 62(307), 397–409. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.03211>
- Selvarajah, S., & Johnston, A. J. (1995). Water permeation through cracked single skin masonry. *Building and Environment*, 30(1), 19–28. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)E0033-N](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)E0033-N)
- Sumirat, I., Ando, Y., & Shimamura, S. (2006). Theoretical consideration of the effect of porosity on thermal conductivity of porous materials. *Journal of Porous Materials*, 13(3), 439–443. <https://doi.org/10.1007/s10934-006-8043-0>
- Trechsel, H. R. (1994). *Moisture control in buildings*. ASTM International.
- Tunkiewicz, M., Misiewicz, J., Sikora, P., & Chung, S.-Y. (2021). Hygric Properties of Machine-Made, Historic Clay Bricks from North-Eastern Poland (Former East Prussia): Characterization and Specification for Replacement Materials. *Materials*, 14(21), 6706. <https://doi.org/10.3390/ma14216706>
- Vasile, C., Lorente, S., & Perrin, B. (1998). Study of convective phenomena inside cavities coupled with heat and mass transfers through porous media—application to vertical hollow bricks—a first approach. *Energy and Buildings*, 28(3), 229–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00058-3)

- Villanueva, J. (1866). *Arte de albañilería, ó Instrucciones para los jóvenes que se dediquen a él.../por Juan de Villanueva; y para perpetuar su memoria lo da á luz... Pedro Zengotita*. <https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/7694/a-041-260.pdf?sequence=1>
- Villegas, L., Lombillo Vozmediano, I., Blanco, H., Boffill, Y., Congreso Latinoamericano sobre Patología de la Construcción, T. de la R. y G. del P. 7o 2018 C., & by Círculo Rojo. (2018). *REHABEND 2018: Conctruction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management (7th REHABED Congress): Cáceres (Spain), May 15th-18th, 2018*. Universidad de Cantabria.
- Vololonirina, O., Coutand, M., & Perrin, B. (2014). Characterization of hygrothermal properties of wood-based products - Impact of moisture content and temperature. *Construction and Building Materials*, 63, 223–233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.014>
- Yu, S., Cui, Y., Shao, Y., & Han, F. (2019). Simulation Research on the Effect of Coupled Heat and Moisture Transfer on the Energy Consumption and Indoor Environment of Public Buildings. *Energies*, 12(1), 141. <https://doi.org/10.3390/en12010141>

NORMAS

ASTM D4404-18; Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. Swedish Institute for Standards: Stockholm, Swedish, 2018

ASTM D4404-18. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2018.

EN 772-3; Methods of Test for Masonry Units. Part 3: Determination of Net Volume and Percentage of Voids of Clay Masonry by Hydrostatic Weighing Aenor. AENOR: Madrid, Spain, 1998.

EN 772-13 Methods of sample masonry units. Parts 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone).

EN 772-11. Methods of test for masonry units - Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units.

EN 772-16 Methods of sample masonry units. Parts 16: Determination of dimensions.

EN 772-21. Methods of test for masonry units - Part 21: Determination of water absorption of clay and calcium silicate masonry units by cold water absorption

EN 1015-10 Methods of sample for mortar for masonry. Parts 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar.

EN 1745; Masonry and Masonry Products. Methods for Masonry Determination Thermal Properties.

EN 10456. Building Materials and Products—Hygrothermal Properties—Tabulated Design Values and Procedures for Determining Declared and Design Thermal Values. 2012.

EN 13788. Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods (ISO 13788:2012).

EN 16883; Conservation of Cultural Heritage—Guidelines for Improving the Energy Performance of Historic Buildings.

ISO 9869-1. Thermal Insulation—Building Elements –In-Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance. Part 1. Heat Flow Meter Method. 2014.

ISO 9869-1; Thermal Insulation—Building Elements—In Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance. Part: 1 Heat Flow Meter Method. ISO (International Organization for Standardization): Geneva, Switzerland, 2014.

ISO - ISO 9869-1:2014 - Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method. (n.d.). Retrieved July 11, 2022.

SOFTWARE Y OTROS RECURSOS

EnergyPlus. U.S. Department of Energy (DOE). Available online: <https://energyplus.net/> (accessed on 28 March 2019).

Chazarra, A.; Flórez García, E.; Peraza, B.; Tohá Rebull, T.; Lorenzo Mariño, B.; Criado, E.; Moreno García, J.V.; Romero Fresneda, R.; Botey, M.R. Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996–2016). 2018. Available online:

http://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/MapasclimaticosdeEspana19812010 (accessed on 15 March 2022).

THERM Finite Element Simulator. Copyright 1994-2015. Regents of the University of California. Versión 7.4.3.0 21/09/2015. <https://windows.lbl.gov/software/therm/> (Consultada el 01 de Julio de 2021).

NORMATIVA

CTE DB-HS1. Technical Building Code Basic Document-Basic Requirements Energy Saving; Ministry of Development: Madrid, Spain, 2013; Available online: <http://www.codigotecnico.org/index.php/menuahorro-energia> (accessed on 15 October 2019).

España. CTE (Código Técnico de la Edificación) Documento básico. Ahorro de energía HE1.

España. CTE (Código Técnico de la Edificación) Documento básico. Salubridad HS3.

España. RITE. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, 29 agosto 2007

PROYECTOS INTERNACIONALES

Co2olBricks—Climate Change, Cultural Heritage and Energy-Efficient Monuments Is a Project in the Framework of the Baltic Sea Region Programme 2007–2013. Available online: <http://www.co2olbricks.de/index.php?id=175> (accessed on 8 October 2021).

HeLLO - Architettura Energia Research Centre. HeLLO-Heritage Energy Living Lab Onsite. Available online: <https://hellomscaproject.eu/> (accessed on 8 October 2021).

Historic England. Energy Efficiency and Historic Buildings: Application of Part I of the Buildings Regulations to Historic and Traditionally Constructed Buildings; English Heritage: London, UK, 2011.

3encult-Project - Bastian, Z.; Troi, A. Energy Efficiency Solutions for Historic Buildings; 3encult-Project-Welcome–Home; De Gruyter Open: Berlin, Germany, 2015.

PROYECTO SHERIFF - FJ Neila González. E4R “Casos Prácticos de Rehabilitación Energética de Edificios” UNA NUEVA FORMAS DE VER LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA.

8. DIFUSIÓN CIENTÍFICA

8.1. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS DE LA TESIS

Cabeza-Prieto A, Camino-Olea MS, Rodríguez-Esteban MA, Llorente-Álvarez A, Pérez MPS. **Moisture Influence on the Thermal Operation of the Late 19th Century Brick Facade, in a Historic Building in the City of Zamora.** *Energies*. 2020; 13(6):1307. <https://doi.org/10.3390/en13061307>

Energies				
JCR Year	Impact Factor	JIF Rank	JIF Quartile	Category
2020	3,004	70/114	Q3	ENERGY & FUELS

Alfredo Llorente-Alvarez, Maria Soledad Camino-Olea, Alejandro Cabeza-Prieto, Maria Paz Saez-Perez, Maria Ascensión Rodríguez-Esteban, **The thermal conductivity of the masonry of handmade brick Cultural Heritage with respect to density and humidity**, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 53, 2022, Pages 212-219, ISSN 1296-2074, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.12.004>

Journal of Cultural Heritage				
JCR Year	Impact Factor	JIF Rank	JIF Quartile	Category
2020	2,955	43/87	Q2	CHEMISTRY, ANALYTICAL
		87/200	Q2	GEOSCIENCES, MULTIDISCIPLINARY
		190/334	Q3	MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY
		12/43	Q2	SPECTROSCOPY

Cabeza-Prieto, Alejandro, María S. Camino-Olea, María P. Sáez-Pérez, Alfredo Llorente-Álvarez, Ana B.R. Gavilán, and María A. Rodríguez-Esteban. 2022. "**Comparative Analysis of the Thermal Conductivity of Handmade and Mechanical Bricks Used in the Cultural Heritage**" *Materials* 15, no. 11: 4001. <https://doi.org/10.3390/ma15114001>

Materials				
JCR Year	Impact Factor	JIF Rank	JIF Quartile	Category
2020	3,623	79/162	Q2	CHEMISTRY, PHYSICAL
		152/334	Q2	MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY
		17/80	Q1	METALLURGY & METALLURGICAL ENGINEERING
		51/160	Q2	PHYSICS, APPLIED
		23/77	Q2	PHYSICS, CONDENSED MATTER

8.2. ARTÍCULOS COMPLEMENTARIOS

- Brick Walls of Buildings of the Historical Heritage. Comparative Analysis of the Thermal Conductivity in Dry and Saturated State Camino-Olea, MS; Cabeza-Prieto, A; (...); Rodriguez-Esteban, MA 3rd World Multidisciplinary Civil Engineering, Architecture, Urban Planning Symposium (WMCAUS). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/8/082059>
- Test evaluating the effectiveness of hydrofugation in the protection of handmade brick walls against rainwater María Soledad Camino-Olea¹, Alfredo Llorente-Alvarez¹, Alejandro Cabeza-Prieto¹ and Jose María Olivar-Parra¹ <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/3/032040>
- Camino Olea, María, Sáez Pérez, María, Llorente Álvarez, Alfredo, Cabeza Prieto, Alejandro, Y Rodríguez Esteban, María. "Propuesta de ensayo no destructivo para conocer el contenido de agua en fachadas de ladrillo del Patrimonio Cultural = Non-destructive testing proposal to know the water content in brick facades of the Cultural Heritage" *Revista electrónica ReCoPar* [En línea], Número 14 (21 diciembre 2021). <http://polired.upm.es/index.php/recopar/article/view/4747>

8.3. CONFERENCE PAPERS

REHABEND

- Ensayo para evaluar la relación entre el flujo de calor y el volumen de agua en probetas de ladrillo antiguo y argamasa. Camino-Olea, M.S., Llorente, A., Cabeza, A., (...), Sáez-Pérez, M.P., Olivar José, M. 2018 REHABEND (221479), pp. 1922-1929. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/40289>
- Evaluation of thermal behavior in an early 20th century Valladolid brick facade, according to its water content Camino-Olea, M.S., Llorente-Alvarez, A., Cabeza-Prieto, A., Rodriguez-Esteban, M.A., Saez-Perez, M.P. 2020 REHABEND pp. 1735-1742

PATOREB

- Llorente-Álvarez, A., Camino-Olea, M. S., Cabeza-Prieto, A., Sáez-Pérez, M. P., Rodríguez-Esteban, M. A., & Olivar-Parra, J. M. DOSAGEM DAS ARGAMASSAS DE CAL VERSUS ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE. <https://www.nppg.org.br/patorreb/files/artigos/80551.pdf>

