

CODE 3.2

ENSAYO PARA EVALUAR LA RELACIÓN ENTRE EL FLUJO DE CALOR Y EL VOLUMEN DE AGUA EN PROBETAS DE LADRILLO ANTIGUO Y ARGAMASA

Camino-Olea, María Soledad¹; Llorente, Alfredo²; Cabeza, Alejandro³; Rodríguez-Esteban, María Ascensión⁴; Sáez-Pérez, María Paz⁵; Olivar José M^{a6}

1: Departamento de Construcciones Arquitectónicas IT y MMC y TE
Universidad de Valladolid
mcamino@arq.uva.es

2: Departamento de Construcciones Arquitectónicas IT y MMC y TE
Universidad de Valladolid
llorente@arq.uva.es

3: Departamento de Construcciones Arquitectónicas IT y MMC y TE
Universidad de Valladolid
alejandro.cabeza.prieto@uva.es

4: Departamento de Construcción y Agronomía
Universidad de Salamanca
mare@usal.es

5: Departamento de Construcciones Arquitectónicas
Universidad de Granada
mpsaez@ugr.es

6: Departamento de Construcciones Arquitectónicas IT y MMC y TE
Universidad de Valladolid
jmo@arq.uva.es

PALABRAS CLAVE: ladrillo, humedad, flujo de calor, restauración, ensayo no destructivo

RESUMEN

Muchos de los edificios históricos españoles han sido construidos con fábrica de ladrillo y argamasa de cal y arena. Estos materiales, con el paso del tiempo, sufren procesos de degradación principalmente por la acción del agua procedente del terreno, de la lluvia y del ambiente. Estos procesos de degradación son muy frecuentes por lo que es interesante diseñar algún procedimiento de ensayo, no destructivo, que permita conocer el volumen de agua que puede contener un muro de ladrillo. Una vez conocido este volumen de agua, se puede definir de forma más precisa las intervenciones apropiadas en la rehabilitación de edificios con lesiones que tienen su origen en los procesos de absorción y desorción de agua. El fundamento de este ensayo está basado en dos principios: 1) el flujo de calor que atraviesa un muro está relacionado con su capacidad aislante; 2) el agua es uno de los mejores transmisores de calor. Cuanto más contenido de agua tenga un muro, mayor será el flujo de calor que atraviesa el mismo, para las mismas condiciones externas. Conocido el flujo de calor se podría llegar a evaluar el contenido de agua de un muro. En este artículo se describe el ensayo que se están llevando a cabo en el laboratorio, con probetas de fábrica de ladrillo y argamasa, conforme a las normativas europeas, para analizar si se podría llegar a definir un ensayo no destructivo que permita evaluar el contenido de agua de un muro de fábrica de ladrillo.

1. INTRODUCCIÓN

Las fábricas antiguas de ladrillos suelen presentar lesiones y daños debido a la presencia del agua de lluvia o de la que asciende del terreno. Cuando se rehabilita un edificio es importante conocer el contenido de agua de los muros, detectar los puntos en los que puede provocar lesiones, y la forma en que varía ese contenido de agua, ya que la mayoría de las intervenciones conviene ejecutarlas cuando la fábrica de ladrillo está seca porque hacerlo cuando está húmeda podría provocar otras lesiones. La investigación que se está llevando a cabo pretende definir un ensayo no destructivo de manera que se pueda conocer este contenido de agua de una forma fácil antes de proyectar y ejecutar las intervenciones de rehabilitación.

El comportamiento de los materiales, desde el punto de vista de sus características térmicas, varía de forma importante en función del contenido de humedad, básicamente, el flujo de calor a través de un mismo muro cuando está húmedo es superior al del muro seco [1]. Cuando el muro está seco en los poros y capilares hay aire seco, pero cuando está húmedo hay agua en forma líquida o en forma de vapor de agua y el agua es un buen conductor del calor. A esta diferencia, en el flujo de calor, se suma el fenómeno de evaporación, el cual, como es sabido, se trata de una reacción endotérmica, es decir, para producirse, absorbe calor de su alrededor, enfriando, tanto el ambiente como el material sobre el que se produce [2].

Tanto el ladrillo de tejar como el mortero son materiales con una porosidad importante que pueden llegar a contener un volumen de agua elevado en poros y capilares [3] por lo que el flujo de calor que atraviesa un muro ejecutado con estos materiales presentará diferencias notables cuando el muro está seco y cuando está saturado. Si con una placa medidora de flujo se comprueba el flujo que atraviesa un muro se podría llegar a conocer el contenido de agua. En este artículo se exponen resultados de la investigación que se está realizando para definir un ensayo no destructivo en función de la medición del flujo de calor que atraviesa un muro.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para estudiar la relación entre el contenido de agua de un muro de fábrica y el flujo de calor que lo atraviesa se ha definido un ensayo en el laboratorio teniendo en cuenta dos normas de ensayo: la norma EN ISO 8990 [4] y la norma ISO 6946 [5]. En el ensayo se mide con termoflujómetro el flujo de calor que atraviesa una probeta con diferentes contenidos de agua, que se estiman por pesado de la probeta, comparando su peso húmedo con el peso en estado seco. Para medir el flujo de calor se ha ejecutado una caja fría y la probeta se ha situado en una de las paredes laterales, con una cara en contacto con el ambiente frío del interior de la caja, que oscila entre 6-7,5°C, y otra en contacto con el ambiente de laboratorio con temperaturas comprendidas entre 21-23°C, de forma que se pueda medir el flujo de calor que atraviesa la probeta. El ensayo comienza con la probeta saturada y continua mientras se va secando, hasta alcanzar la humedad de equilibrio en función de la temperatura y humedad ambiente del laboratorio.

2.1 Probeta de fábrica

La probeta está 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 presentan alabeos y dimensiones diferentes. La altura media de la probeta es de 224 mm, la base mide 138x140 mm², la cara superior 135x141 mm², los ladrillos presentan 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 las caras verticales de la misma, “Figura 1”.

Uno de los condicionantes de la probeta es que fuera manejable, que pudiera pesarse con facilidad a lo largo del ensayo y se estimó que se podía seguir usando el mismo tipo de probeta, que se había empleado

en otras investigaciones ya que los resultados obtenidos anteriormente, en otros ensayos, han sido representativos del comportamiento de un muro.

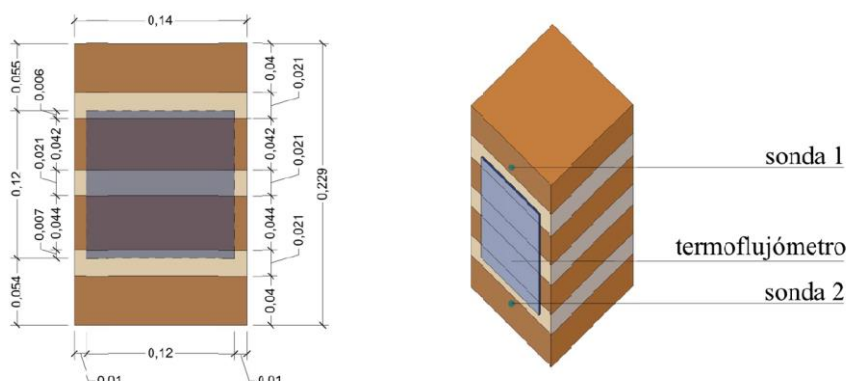


Figura 1: Alzado y axonometría de la probeta de ladrillo y situación del medidor de flujo de calor y de las sondas de temperatura superficial.

Como paso previo a fabricar la probeta se realizaron ensayos 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[6], la densidad aparente seca según el proceso de la norma EN 772-13 [7], la porosidad según la norma EN 772-3 [8] y el volumen. 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 1”.

Tabla 1: Resultados de los ensayos a la probeta y los materiales

	Peso en seco Kg	Peso saturado Kg	Volumen aparente dm ³	Volumen total de agua absorbido dm ³	volumen de agua absorbido por m ³ m ³ /m ³	Densidad aparente seca kg/m ³
Probeta	6,992	8,054	4,085	1,062	0,260	1.712
Ladrillo 1	1,140	1,362	0,713	0,222	0,311	1.599
Ladrillo 2	1,260	1,515	0,787	0,255	0,324	1.601
Ladrillo 3	1,180	1,418	0,744	0,238	0,320	1.586
Ladrillo 4	1,560	1,780	0,878	0,220	0,251	1.777
mortero	1,852	--	1,003	--	0,211	1.847

2.2 Caja aislada

La caja cerrada estanca y aislada térmicamente se montó con unas medidas interiores de 450x500x500 mm³, con unas paredes de 10 cm de poliestireno extrusionado ejecutadas con dos planchas de 5 cm ‘Figura 2’. Una de las caras es una tapa con un hueco del formato de la probeta, también de material aislante. En su construcción se utilizaron los siguientes materiales:

- Planchas de XPS de 5cm (Poliestireno extruido) con una conductividad térmica 0,034 W/mK.
- Lámina de polietileno de 0,2 mm de espesor a modo de barrera de vapor, colocado entre las dos planchas de XPS.
- Silicona neutra para XPS, para pegar las piezas de material aislante y sellar las aberturas que se ha practicado en la caja para la embocadura de los tubos de entrada y salida de aire.
- Espuma de poliuretano para el sellado de la junta entre la probeta y la tapa de la caja.
- Cinta de aluminio adhesiva, para un correcto sellado de las juntas.

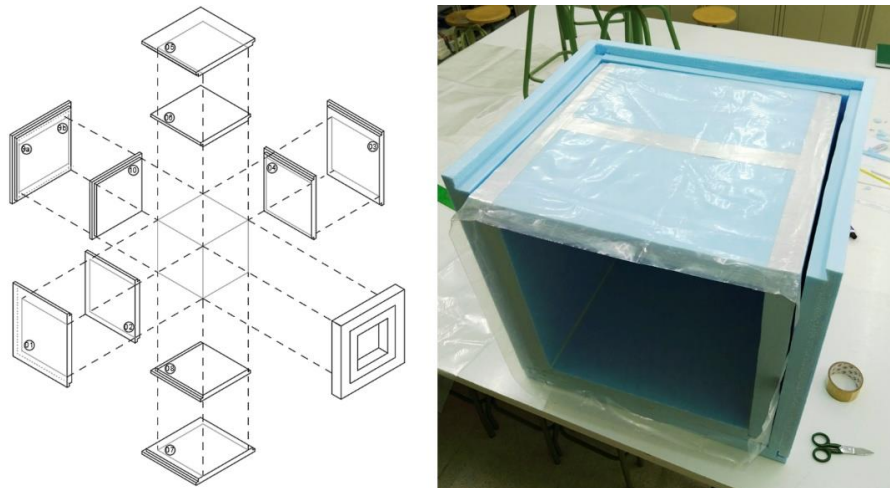


Figura 2: Esquema y proceso de construcción de la caja aislada.

2.3 Acondicionamiento del ambiente interior de la caja

Para conseguir una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la caja, se decidió utilizar una cámara climática modelo 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 3'.

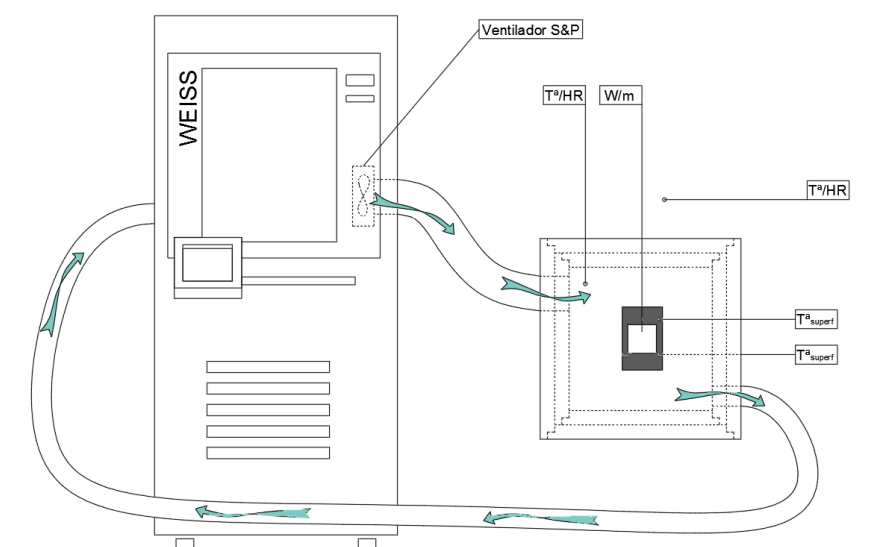


Figura 3: Cámara climática, caja fría y sistema de recirculación del aire.

2.4 Metodología de ensayo

El ensayo se basa en la medición del flujo de calor que atraviesa la probeta mediante una placa medidora de flujo, así como las temperaturas superficiales y del ambiente interior y exterior, mediante sondas, para poder calcular la transmitancia U de la probeta.

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 según se puede ver en las “Figuras 1 y 4”.

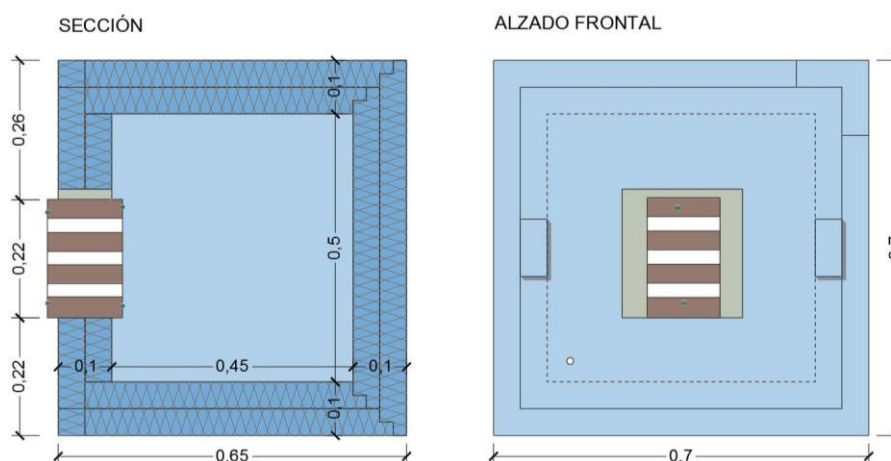


Figura 4: Caja fría y probeta de fábrica.

El equipo utilizado es el siguiente:

- Un placa que mide el flujo térmico digital AMR modelo FQAD18TSI de Ahlborn de 120x120x3 mm de silicona.
- Cuatro termopares (medida de temperatura superficial) dos por el interior y dos por el exterior de la caja
- Para el almacenamiento de datos de flujos de calor, como de temperaturas superficiales de la probeta, el equipo utilizado es una base de medida o data logger del modelo Almemo 2590 de la marca comercial Ahlborn.
- Para la toma de datos de las temperaturas del aire y humedad relativa, tanto interiores a la caja, como del laboratorio, dos sondas tipo Saveris H4D y que transmiten los datos a una base Saveris 868, de la marca Testo.

Para dar comienzo al ensayo, se puso en funcionamiento la cámara climática haciendo descender la temperatura del interior de la misma 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. Los resultados se han trasladado a la tabla de la “Figura 6”.

2.5 Análisis del comportamiento del flujo y temperaturas con THERM.

Como paso previo a la realización del ensayo se hizo una simulación mediante software THERM 7.4 [9], para evaluar el flujo de calor, en régimen estacionario, y de esta forma, comprobar que se podía llegar a resultados significativos. Este programa de simulación permite modelar efectos de transferencia de calor bidimensionales en materiales, especialmente destinados a la construcción. Este análisis de transferencia de calor de conducción bidimensional se basa en el método de elementos finitos, a través del cual es posible modelar geometrías complejas.

En la ‘Figura 5’ están los resultados de variación de temperaturas y de flujo de calor de la simulación realizada, tomando como valores los de la probeta y demás materiales según el apartado 2.1. La temperatura interior de la caja se fijó en 7,0°C y la exterior en 23°C.

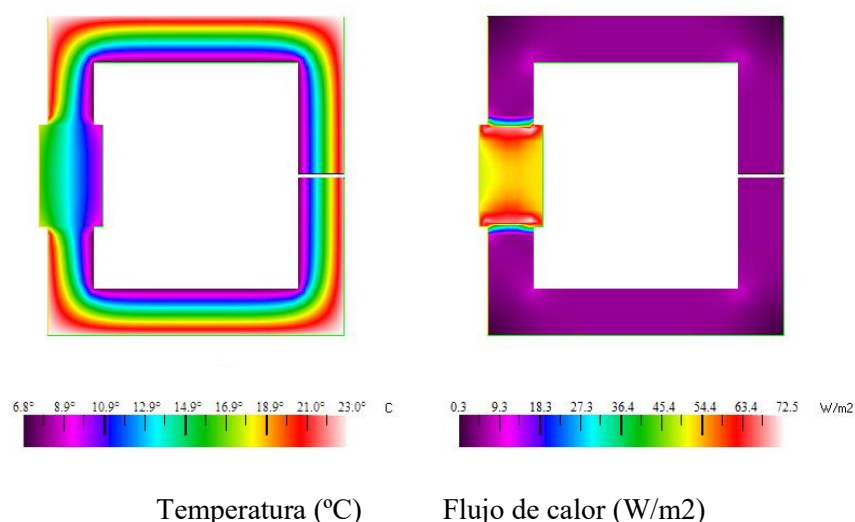


Figura 5. Simulación con THERM.

2.6 Cálculo según la EN-1745.

Para comparar los datos obtenidos en el ensayo se ha realizado el cálculo según los procedimientos establecidos en la norma EN 1745 [10]:

Para determinar los valores térmicos de diseño de una fábrica construida $\lambda_{design,mas}$ en función de los valores de los elementos componentes la conductividad térmica de ladrillo $\lambda_{design,unit}$ y del mortero $\lambda_{design,mor}$ y el porcentaje del área en el alzado, se indica la siguiente fórmula:

$$\lambda_{design,mas} = a_{unit} \times \lambda_{design,unit} + a_{mor} \times \lambda_{design,mor} \quad (1)$$

A partir del valor de la conductividad térmica del material a 10° 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 .

$$\lambda_{design} = \lambda_{10,dry} \times F_m \quad (2)$$

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:

$$F_m = e^{f_\psi \times \psi_{design}} \quad (3)$$

En el anexo A, en la tabla A.1 para piezas macizas de arcilla cocida según la densidad de los ladrillos empleados, $\lambda_{10,dry,mat} = 0,45$ W/(m.K) y el coeficiente de conversión por volumen es $f_\psi = 10$ (m^3/m^3). Para el mortero se han tomado los valores de la tabla A.12, $\lambda_{10,dry,mor} = 0,78$ W/(m.K) y $f_\psi = 4$ (m^3/m^3). Se ha estimado, en función de los datos de la “tabla 1”, que la relación entre el contenido de humedad de la probeta y el ladrillo es de 1,10, mientras que la relación del contenido de humedad entre la probeta y el mortero es de 0,77.

La placa medidora de flujo tiene una superficie de 144 cm² de los que el 72,60% está situada sobre ladrillo y el resto sobre mortero. El valor del coeficiente de conductividad térmica de diseño de la zona de la probeta donde se ha situado la placa medidora de flujo térmico se ha calculado en función de la siguiente fórmula:

$$\lambda_{design,mas} = 0,726 \times \lambda_{10,dry,mat} \times F_{m,mat} + 0,274 \times \lambda_{10,dry,mor} \times F_{m,mor} \quad (4)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ensayo duró cinco semanas, aproximadamente, mientras la probeta iba perdiendo 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 puedan observar claramente las variaciones diarias y semanales. Por este motivo para la realización de una gráfica en la que se pueda 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. Estos datos se han trasladado al gráfico de la ‘figura 6’.

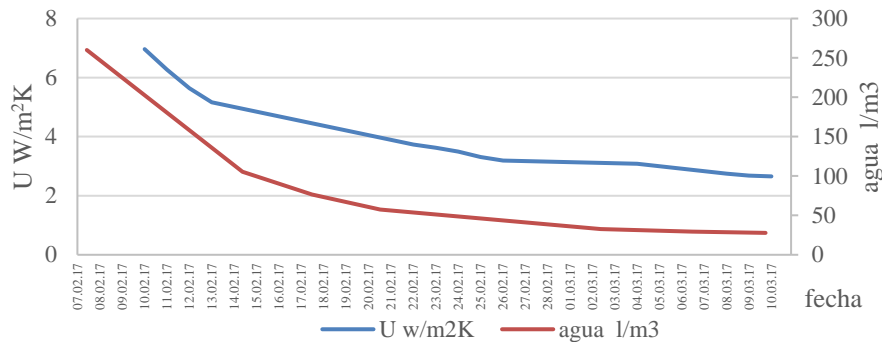


Figura 6. Transmitancia U (W/m²K) y volumen de agua en la probeta l/m³

En la gráfica anterior se aprecia que el flujo de calor disminuye al tiempo que la probeta se va secando. En una segunda gráfica “Figura 7” se han incluido los resultados de la variación del coeficiente de conductividad térmica de diseño λ_{desing} del ensayo respecto de los obtenidos aplicando la fórmula (4).

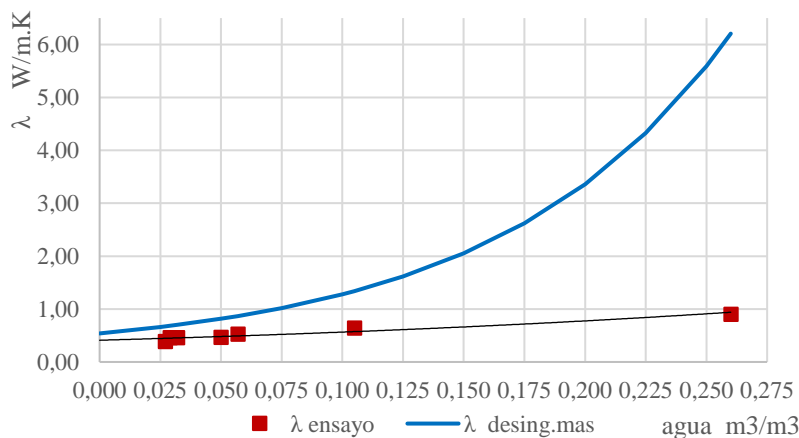


Figura 7. Coeficiente de conductividad térmica de la probeta según el contenido de agua: en color rojo curva que se obtiene según el cálculo de la EN-1745a la fórmula 4 y en color azul los resultados del ensayo.

4. CONCLUSIONES

La principal conclusión, muy inmediata y clara, es 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, diferentes a ambos lados de la probeta y que una vez conocido el flujo de calor y las características higrótérmicas de los materiales que integran un muro, se podría estimar el contenido de agua en los muros de los edificios.

Los muros están ejecutados con dos materiales, diferentes entre sí, pero con características muy variables por tratarse de materiales elaborados manualmente: los ladrillos en alfares y el mortero directamente en las obras, lo que representa una dificultad cuando se trata de comparar las fórmulas de la normativa con los ensayos en laboratorio, ya que como se puede comprobar en la gráfica de la “Figura 7” mientras que el contenido de agua es bajo las dos gráficas dan valores similares, pero cuando el contenido de agua es elevado los valores son muy diferentes. Llegados a este punto y ante la disparidad de los valores obtenidos, se plantean algunas hipótesis que serán parte de la fase experimental a desarrollar. Para ello en la actualidad se están realizando otros ensayos, con diversos tipos de ladrillo y dimensiones en los que se comprueban los datos de flujo de calor que mide el termoflujómetro durante el proceso de desorción de la probeta sin diferencia de temperatura, entre caras paralelas, y de esta forma poder determinar su influencia.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Millán García, J. Antonio. Tesis Doctoral “Influencia de la humedad en la transmitancia térmica de los cerramientos y en la demanda energética de los edificios,” Universidad del País Vasco, Bilbao, 2014.
- [2] H.M. Künzle, “Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components”, Fraunhofer IRB Verlag Suttgart, ISBN 3-8167-4103-7. 1995.
- [3] Camino, M., León, F., Llorente, A., & Olivar, J. (2014). Evaluation of the behavior of brick tile masonry and mortar due to capillary rise of moisture. *Materiales de Construcción*, 64(314), e020. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.02513>
- [4] European Standard EN-ISO 8990 Thermal Insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box.
- [5] International Standard ISO 6946, Building components and building elements, Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method.
- [6] European Standard 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.
- [7] European Standard EN 772-13 Methods of test for masonry units. Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural Stone) 2001
- [8] European Standard 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 (1999)
- [9] THERM Finite Element Simulator. Copyright 1994-2015. Regents of the University of California. Version 7.4.3.0 21/09/2015. <https://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html> (Consultada el 18 de Julio de 2017).
- [10] European Standard EN 1745 Masonry and masonry products. Methods for masonry determination thermal properties (2013).

AGRADECIMIENTOS

Los ensayos han sido realizados con la subvención del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno Español 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-P en el Laboratorio de Construcción de la E.T.S. de Arquitectura de la Universidad de Valladolid.