

# 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

M<sup>º</sup> Soledad Camino-Olea, Universidad de Valladolid; M<sup>º</sup> Paz Sáez-Pérez, Universidad de Granada; Alfredo Llorente-Álvarez, Universidad de Valladolid; Alejandro Cabeza-Prieto, Universidad de Valladolid y M<sup>º</sup> Ascensión Rodríguez-Esteban, Universidad de Salamanca

**RESUMEN:** Una de las lesiones más frecuentes en el arranque de las fachadas de los edificios del Patrimonio Cultural construido en ladrillo es la humedad que asciende por capilaridad. Como paso previo a una intervención para resolver este problema es necesario conocer el contenido de agua. Desde el punto de vista metodológico actualmente se dispone de distintos procedimientos de cálculo de esta humedad que se integran en la norma UNE-EN 16682. En este artículo se expone una propuesta de ensayo “no destructivo”, que no figura en esta norma, basada en la variabilidad de la conductancia térmica de un muro en función del contenido de agua presente en el mismo. Para conocer el valor de la conductancia de un muro de fachada se puede utilizar el método de ensayo de la placa de flujo térmico que contempla la norma ISO 9869-1 y con ese valor y por comparación con los ensayos que se pueden realizar en laboratorio con probetas elaboradas con ladrillos de los edificios y argamasa en proporción similar a la de estos edificios, pero con diferentes contenidos de agua, se puede llegar a estimar el contenido de agua del muro.

**PALABRAS CLAVE:** ladrillo, contenido de agua, flujo térmico, restauración, ensayo no destructivo.

**ABSTRACT:** *One of the most frequent injuries in the lower areas of the brick facades of Cultural Heritage buildings is the humidity that rises by capillarity. In order to solve this problem before an intervention it is necessary to know the water content. From the methodological point of view, there are currently different procedures for calculating this humidity that are integrated in to the UNE-EN 16682 standard. This paper presents a “non-destructive” test proposal based on the variability of the thermal conductance of a wall as a function of the water content present in it.*

*To know the conductance value of a façade wall, the non-destructive test method of the ISO 9869-1 standard thermal flux plate can be used. With this value and by comparison with the tests that can be carried out in the laboratory with test tubes made with building bricks and mortar in a similar proportion to that of buildings, but with different water contents, the water content of the wall can be estimated.*

**KEYWORDS:** *brick, water content, heat flow, restoration, non-destructive test.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La preservación del Patrimonio Cultural cada vez adquiere mayor importancia lo que hace necesario definir métodos de ensayo no destructivos que permitan conocer el estado actual de los inmuebles que lo integran, como actuación previa a posibles intervenciones de restauración o mantenimiento.

Centrados en la problemática de este tipo de inmuebles, corresponde destacar las lesiones que provocan la presencia de agua o de humedad en los elementos constructivos. En el caso específico de edificios de muros de ladrillos de tejar recibidos con argamasa, hay que tener en consideración que la humedad puede llegar a provocar lesiones capaces de alterar su integridad. El ladrillo de tejar antiguo y la argamasa con la que se ejecutaban los muros son materiales porosos, susceptibles de absorber el agua del terreno y de la lluvia con mayor facilidad que otros materiales, por lo que es mucho más importante conocer en ellos el conte-



FIG1. Fachada de la capilla del Cementerio de La Seca, Valladolid, y accesos al mismo (Alfredo Llorente, septiembre 2015).

nido de agua antes de iniciar intervenciones, que en las construcciones con otros materiales. Como se observa en la Figura 1, en la fachada de la capilla del cementerio de La Seca, Valladolid (España), las humedades por ascensión capilar pueden alcanzar el 1,5 m de altura y ocasionar lesiones graves en la fábrica, llegando incluso a conseguir el vaciado de algunas piezas y la pérdida de material de las juntas.

Desde el punto de vista metodológico actualmente se dispone de distintos procedimientos de cálculo que permiten conocer 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.

Sin embargo, existen otros métodos, como los que se describe en este artículo, con los que, de forma indirecta, se puede llegar a estimar el contenido de agua en un muro de ladrillo y argamasa basado en la combinación de ensayos no destructivos “in situ” y de ensayos en laboratorio. El procedimiento, como se expondrá más adelante, se podría hacer extensivo a los muros construidos con otros materiales como la piedra o la tierra.

La propuesta metodológica abordada en el presente estudio 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. En las fábricas de ladrillo antiguo se pueden alcanzar valores de contenido de agua cercanos al 30% <sup>(1)</sup>, lo que supone un elevado porcentaje de absorción de agua, que cuando se produce en muros de espesores importantes, frecuentes en edificios que pertene-

cen al Patrimonio Cultural, provocan graves daños. Como consecuencia, en estos casos la diferencia entre la resistencia térmica de un muro seco y un muro húmedo puede llegar a alcanzar valores elevados.

Para conocer el valor de la conductancia de un muro de fachada se puede utilizar el método de ensayo, no destructivo, de la placa de flujo térmico que contempla la norma<sup>(2)</sup> 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, de manera que con este valor y el de las temperaturas superficiales, exterior e interior, se pueda calcular la conductancia térmica del mismo.

En el caso de 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.

En base a estos dos métodos, el objetivo principal de este estudio pretende estimar la cantidad de agua absorbida por una fábrica, determinando en laboratorio la relación entre la conductividad térmica de la probeta de fábrica de ladrillo y el contenido de agua, para después llevar a cabo la comparación con la conductividad térmica obtenida en el ensayo “in situ”, y de esa forma poder estimar el contenido de agua en la misma.

## 2. ANTECEDENTES

En la norma 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:

$$\lambda_f = \lambda_i F_T F_m F_a \quad (1)$$

donde:  $\lambda$  es el coeficiente de 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. Camino, M. S., León, F. J., Llorente, A., & Olivar, J. M. (2014). Evaluation of the behaviour 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>.

2. UNE EN ISO 9869-1. Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance -- Part 1: Heat flow meter method

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:

$$F_m = e^{f_\psi (\psi_f - \psi_i)} \quad (2)$$

Donde:  $f_\psi$  es el coeficiente de conversión del contenido de humedad por unidad de volumen y  $\psi_i$ ,  $\psi_f$  son los valores del contenido de humedad inicial y final por unidad de volumen en  $m^3/m^3$ . 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. 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 <sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup> <sup>(5)</sup>. En todos ellos los resultados coinciden en tener unos valores en estado húmedo más elevados que en estado seco.

Los ladrillos que se fabrican en la actualidad tienen unas características muy homogéneas, sin dispersiones importantes <sup>(6)</sup>, todo lo contrario de lo que, previsiblemente, puede suceder en los ladrillos elaborados a mano. Esto es debido a que los primeros se fabrican de manera industrial, bajo un riguroso control de fabricación, mientras que en los ladrillos antiguos, aparte de hacerse manualmente, los porcentajes de mezclas de arcillas eran establecidas a sentimiento del ladrillero, la compactación de la masa en los moldes se realizaba de forma manual y la cocción entre las piezas no era homogénea pues dependía de la posición que ocupara en el horno, del material de combustión empleado y de la temperatura de cocción. Todas estas condiciones han tenido como consecuencia una densidad variable en las distintas piezas y y por tanto, también la conductividad térmica, tal y como señalan diversos autores <sup>(7)</sup>. En el caso de la argamasa de cal y arena ocurre de manera similar. Después de lo anteriormente comentado, y tra-

3. Camino-Olea, M. S., Cabeza-Prieto, A., Llorente-Álvarez, A., Saez-Perez, M. P., & Rodríguez-Esteban, M. A. (2019, February). Brick Walls of Buildings of the Historical Heritage. Comparative Analysis of the Thermal Conductivity in Dry and Saturated State. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 471, No. 8, p. 082059). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/471/8/082059>.

4. Pavlík, Z.; Fiala, L.; Vejmelková, E.; Černý, R. Application of effective media theory for determination of thermal properties of hollow bricks as a function of moisture content. *Int. J. Thermophys.* 2013, 34, 894–908.

5. Pérez-Bella, J.M.; Dominguez-Hernandez, J.; Cano-Suñén, E.; del Coz-Diaz, J.J.; Rabanal, F.P. Á. A correction factor to approximate the design thermal conductivity of building materials. *Appl. Span. Facades. Energy Build.* 2015, 88, 153–164.

6. UNE-EN 771-1 Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida. AENOR.

7. Ten, J. G., Orts, M. J., Saburit, A., & Silva, G. (2010). Thermal conductivity of traditional ceramics. Part I: Influence of bulk density and firing temperature. *Ceramics International*, 36(6), 1951-1959.

tando 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 <sup>(2)</sup>.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. ENSAYO “IN SITU” DE EDIFICIO

En este caso para la realización del ensayo “in situ” fue localizado un edificio antiguo cumpliendo con los requisitos necesarios para llevar a cabo el mismo. El edificio estaba situado en el municipio de Serrada, en la provincia de Valladolid.

Concretamente, se trata de una casona de dos plantas cuya fachada está compuesta por un zócalo de sillería de piedra caliza sobre el que se levanta un muro de fábrica ladrillo de tejar visto por el exterior, con entreaños lisos y cornisas, aleros y recercados

de huecos ornamentados por combinación de resaltes y diferentes colocaciones de las piezas de ladrillo. La fábrica del muro está ejecutada con aparejo de tizones, “a la española”, con gruesas juntas de argamasa, cuyos tendeles llegaban a alcanzar los 3 centímetros y las llagas variaban entre 2 y 2,5 centímetros, con un espesor total de 55 centímetros.

Previo al inicio del ensayo fue necesario concretar una localización idónea donde colocar la placa de flujo y los termopares, cumpliendo con las exigencias establecidas por la norma (tiempo mínimo 72 horas a no ser que existiera almacenamiento de energía en el cerramiento, siendo entonces 96 horas, como sucedió en este caso).

En la fachada existían manchas de humedad en la zona situada por encima del zócalo de piedra, lugar que fue elegido para situar la placa por el interior (figura 2).

Con los datos obtenidos en el ensayo se llevó a cabo el análisis estadístico del valor de la conductancia



FIG2. Imagen del exterior de la fachada, zona interior donde se sitúa la placa de flujo térmico e imagen tomada con cámara termográfica.

del elemento. Para ello, la norma define dos tipos de análisis, por un lado, el denominado método de la media y por otro el método dinámico. En este trabajo, el método empleado es el de la media que, por su sencillez, facilita el trabajo, empleando la fórmula siguiente para el cálculo de conductancia:

$$\Lambda = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (\theta_{sij} - \theta_{sej})} \quad (3)$$

Donde:  $\Lambda$  es la conductancia térmica,  $\theta$  es la temperatura,  $q$  la densidad de flujo de calor y los subíndices indican:  $s$  que el valor es relativo a la superficie,  $i$  que es interior y  $e$  que es exterior.

Para el análisis, la norma no limita la diferencia de temperatura necesaria entre los dos ambientes que separa el elemento ensayado, pero la precisión del resultado depende directamente de este valor. Como valor orientativo se estima que es conveniente que haya una diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior de más de 10 grados. Estas condiciones son difíciles de conseguir debido a que, de manera general, los edificios del Patrimonio Cultural no suelen estar calefactados por ser usados de forma esporádica. La orientación del muro debe ser preferentemente norte, o la fachada estar sombreada, para evitar la incidencia directa del sol, que pudiera provocar alteraciones del flujo y de las temperaturas. Para realizar este ensayo "in situ", se han utilizado los siguientes instrumentos:

- Placa de flujo térmico digital AMR modelo FQAD19T de Ahlborn de 250 mm x 250 mm x 1,5 mm (precisión 0,02% del valor medido) adecuada para acabado plano de yeso.
- Bases de medida o data logger del modelo Almemo 2590 (precisión 0,03%), para el almacenamiento de datos de flujos de calor y de tem-

peraturas superficiales, con los que se realiza el tratamiento posterior.

- Dos termopares (precisión  $\pm 0,05^{\circ}\text{C} \pm 0,05\%$  del valor medido) para medir la temperatura superficial, uno por el interior y otro por el exterior.

### 3.2. ENSAYO CON PROBETA EN LABORATORIO

De manera paralela a la localización del edificio y la solicitud de los permisos oportunos a los propietarios del inmueble para realizar los ensayos, se buscaron ladrillos, procedentes de demoliciones, que se hubiesen elaborado en los tejares antiguos de la zona. Además, se localizaron albañiles, que habían trabajado en Serrada, que pudieran ilustrar sobre la composición de la argamasa que era utilizada en las fábricas de ladrillo de la época.

Sobre los ladrillos recogidos que iban a ser utilizados para construir la probeta de ensayo en laboratorio, se llevaron a cabo análisis previos morfológicos y de caracterización, con el fin de conocer sus dimensiones, estado de conservación, densidad, porosidad y absorción de agua. De entre todos ellos, se seleccionaron los quince ladrillos que presentaban mejor estado de conservación y características más homogéneas, para ejecutar una probeta de una soga de espesor. Sobre ella se realizó el ensayo de placa de flujo térmico en laboratorio, recurriendo a la misma metodología que en el ensayo "in situ", para lo cual, se utilizó una cámara refrigerada que se había construido con tal fin, y que permitiera simular el ambiente exterior frío. Previamente a su colocación en la cámara, la probeta se secó en horno para posteriormente sumergirla en agua hasta su saturación, realizando pesadas para conocer el peso seco" en horno" y el peso saturado, siguiendo la metodología de ensayo que se había empleado para los ladrillos. Una vez saturada, la probeta se

situó en la cámara refrigerada, se colocaron la placa de flujo térmico y los termopares y se inició el ensayo mientras la probeta se secaba por desorción. En función del proceso de secado, se fueron realizando pesadas de la probeta para conocer el contenido de agua que había perdido por desorción y poder relacionar la conductancia con el contenido de agua.

Como ya se ha indicado anteriormente, previamente a ejecutar la probeta con los quince ladrillos seleccionados, se llevaron a cabo ensayos en laboratorio que permitieran conocer sus características

fundamentales tales como dimensiones, densidad y la absorción de agua según los procedimientos establecidos en las normas UNE EN 772-3<sup>(8)</sup>, UNE-EN 772-13<sup>(9)</sup>, UNE-EN 772-16<sup>(10)</sup> y UNE-EN 772-21<sup>(11)</sup>. Los resultados obtenidos en los ensayos para esos 15 ladrillos con los que se ha ejecutado la probeta y que se han numerado en función de la hilada, primer dígito, y la posición en la hilada, segundo dígito, y que presentan características similares entre ellos, se han trasladado a la siguiente tabla (Tabla 1), incluyendo las medias de los valores y la desviación estándar:

Ladrillo	Dimensiones probeta			Peso seco	Peso saturado	Pesada hidrostática	Absorción agua fría	Densidad	Volumen
	soga	tizón	grueso						
	(mm)			gr	gr	gr	l/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
1.1	269	134	41	2.453	2.802	1.429	254	1.787	0,00137
1.2	267	132	41	2.318	2.685	1.352	275	1.739	0,00133
1.3	269	133	42	2.472	2.821	1.428	251	1.775	0,00139
2.1	268	132	42	2.435	2.787	1.410	255	1.768	0,00138
2.2	269	133	43	2.540	2.877	1.466	239	1.800	0,00141
2.3	269	133	42	2.409	2.762	1.403	259	1.773	0,00136
3.1	269	133	42	2.466	2.823	1.425	255	1.764	0,00140
3.2	269	133	41	2.395	2.743	1.386	256	1.765	0,00136
3.3	269	133	42	2.494	2.844	1.443	250	1.780	0,00140
4.1	270	133	42	2.436	2.777	1.405	249	1.775	0,00137
4.2	268	133	42	2.398	2.733	1.382	248	1.775	0,00135
4.3	270	132	42	2.436	2.817	1.432	275	1.759	0,00139
5.1	269	134	41	2.365	2.723	1.380	267	1.760	0,00134
5.2	268	132	40	2.390	2.719	1.387	247	1.793	0,00133
5.3	267	133	41	2.410	2.765	1.404	260	1.771	0,00136
<b>media</b>	<b>269</b>	<b>133</b>	<b>42</b>	<b>2.428</b>	<b>2.778</b>	<b>1.409</b>	<b>256</b>	<b>1.772</b>	<b>0,00137</b>
<b>desviación n</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>54</b>	<b>53</b>	<b>29</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>0,00002</b>

TABLA 1. Resultados de los ensayos de los ladrillos.

Aunque los ladrillos fabricados a mano no tienen características similares, se pudieron seleccionar entre todos los ladrillos localizados aquellos con dimensiones, densidad y absorción de agua más homogéneas. Respecto a la cantidad de agua que es capaz de absorber cada ladrillo, se puede considerar que esta era elevada, obteniendo un valor medio de 256 l/m<sup>3</sup> o de 0,256 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> con una densidad de 1.772 kg/m<sup>3</sup>. La utilidad de estos datos radica en la comparativa de comportamiento y resultados que pueden establecerse con muros de fábrica existentes en las que las condiciones sean similares.

La probeta se ejecutó siguiendo aproximadamente el esquema, la proporción y el aparejo de la fábrica de ladrillo de la fachada del edificio analizado "in situ". Para ello, las juntas se realizaron con argamasa de cal y arena en la proporción 1/3, y con unas dimensiones aproximadas de tendeles de 30 milímetros y llagas de 25 milímetros, para que la proporción entre los dos materiales en la cara vista fuera similar. La fachada del edificio debe de ser de dos sogas de espesor, por la dimensión del ladrillo y el espesor de la misma, y se consideró está ejecutada con dos hojas de ladrillo a tizón, con ladrillos enteros y medios, trabadas entre sí por ladrillos, tal y como se ejecutaban las fachadas en esta zona <sup>(12)</sup>. La probeta se realizó con un espesor de una soga para que se pudiera mover y ensayar con los medios

disponibles en el laboratorio (figura 3).



FIG3. Probeta de ladrillo.

El ensayo se realizó en la cámara fría del laboratorio de Construcción de la E.T.S. de Arquitectura de Valladolid, empleando los siguientes instrumentos:

- Placa de flujo térmico digital AMR modelo FQAD18TSI de Ahlborn de 120 mm x 120 mm x 3 mm de silicona en vez de la placa de flujo del ensayo "in situ", ya que se adapta mejor a las superficies irregulares como son las de una fábrica vista de ladrillo de tejar (precisión 0,02% del valor medido).
- Bases de medida o data logger del modelo Alme-

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

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

10. UNE-EN 772-16 Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 16: Determinación de las dimensiones.

11. UNE-EN 772-21 Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 21: Determinación de la absorción de agua de piezas para fábrica de albañilería de arcilla cocida y silicocalcáreas por absorción de agua fría.

12. Camino Olea, M. S. (2014). La construcción de fachadas de ladrillo prensado "al descubierto", en Valladolid. Exposed Pressed Brick Facade Construction in Valladolid, Spain. Revista electrónica ReCoPar, (4), 33-46.

mo 710 (precisión 0,03%), para el almacenamiento de datos de flujos de calor y de temperaturas superficiales.

- Dos termopares (precisión  $\pm 0,05^{\circ}\text{C} \pm 0,05\%$  del valor medido) para medir la temperatura superficial, uno por el interior y otro por el exterior.

Una vez realizada la probeta (figura 3), se secó en horno y se saturó por inmersión en agua siguiendo el mismo procedimiento que se había utilizado para los ladrillos. Cuando llegó a su saturación, se puso en la cámara fría (figura 4) y se colocaron la placa de flujo y los termopares para medir el flujo térmico que atravesaba la probeta así como las temperaturas superficiales, con estos datos se podría relacionar la conductancia con el contenido de agua de la misma para poder así calcular la relación entre éste y la conductividad térmica de la probeta. Para ello, regularmente se iban haciendo pesadas de la probeta, lo que permitía comprobar el agua que había perdido por desorción. Durante la primera parte del ensayo las pesadas se realizaron cada semana, a partir de la cual, se espaciaron a dos. Este ensayo

permitió obtener el valor de la conductividad térmica de la probeta con diferentes contenidos de agua, mediante la fórmula (3) y cuya información se ha trasladado a la gráfica de la figura 5.

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1 ENSAYO "IN SITU". COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD

En la figura 5 se muestra la representación gráfica del ensayo realizado "in situ" de la placa de flujo y los termopares que midieron las temperaturas superficiales del interior y del exterior de la casona en función del tiempo, 96 horas (eje de abscisas). En ella pueden observarse para los distintos parámetros cual ha sido su comportamiento en ese tiempo.

En relación con los resultados de flujo de calor que atraviesa el muro de fachada, se comprueba que estos presentan valores negativos en  $\text{W}/\text{m}^2$ ; en cuanto a las temperaturas superficiales interiores, se observa que estas presentan poca variación a lo largo del tiempo debido a que la casa no estaba habitada

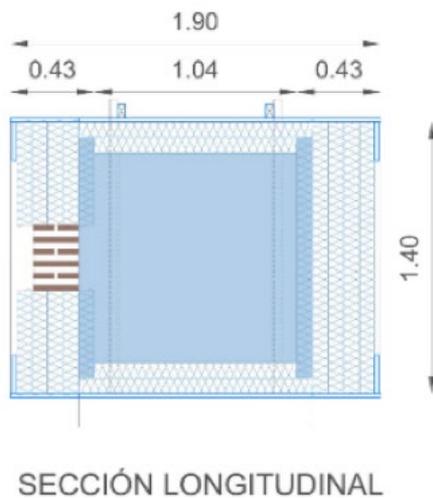


FIG4. A la izquierda, sección de la cámara de ensayo, y a la derecha cámara durante el ensayo.

en invierno cuando se pudo realizar el ensayo y en lo que se refiere a la temperatura superficial exterior se observa que variaba entre 1,1 y 10,7 °C.

Con estos valores y aplicando la fórmula (3) se obtiene el valor de la conductancia térmica, con el que a continuación se determina el valor del coeficiente de conductividad térmica en  $W/(m \cdot K)$ , teniendo en cuenta que el espesor del muro era de 0,55 metros, el valor final es de 0,87  $W/(m \cdot K)$  (representado gráficamente con una línea de trazos discontinua).

#### 4.2 ENSAYO EN LABORATORIO. COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD

En la figura 6 se han representado los valores del flujo térmico y de las temperaturas superficiales

interiores y exteriores. Observando los valores de temperatura superficial interior (correspondiente con el exterior de la cámara) y de flujo, se puede deducir la periodicidad de los valores, siendo estos coincidentes con los días de la semana y el horario de calefacción del laboratorio.

En relación con la temperatura superficial exterior (interior de la cámara) se pueden observar los períodos de encendido y apagado del equipo de refrigeración. Así mismo se puede observar que el valor del flujo térmico va disminuyendo a medida que se va secando la probeta a pesar del aumento de la diferencia de temperaturas superficiales. En la representación de la temperatura superficial interior, también se pueden apreciar cambios coincidentes con los días en que se pesaba la probeta, lo que

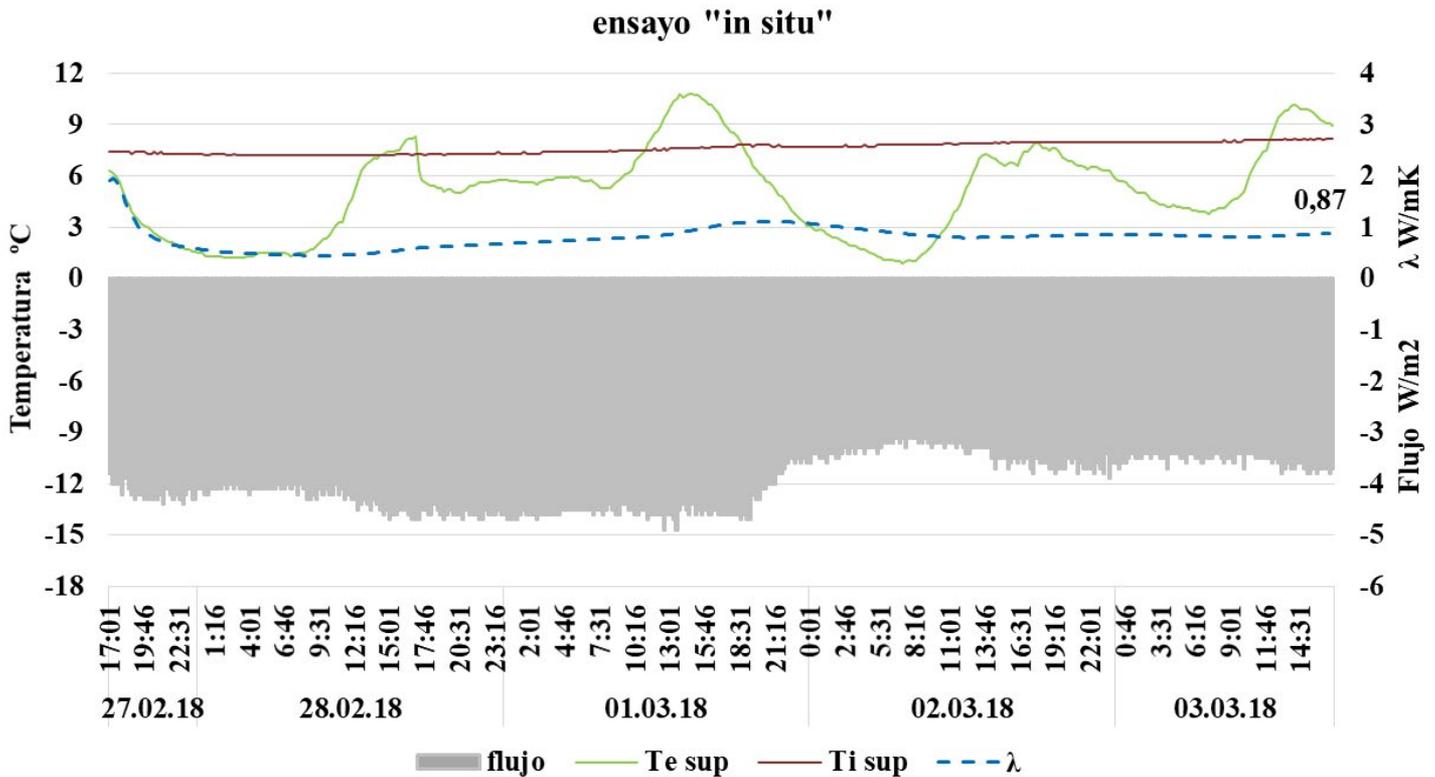


FIG5. Resultados del ensayo "in situ".

obligaba abrir la cámara, lo que generaba la subida brusca de la temperatura.

En este ensayo para calcular los valores del coeficiente de conductividad se ha utilizado la fórmula (3) hallando los valores en el mismo periodo que para el ensayo “in situ”, 96 horas de mediciones (4 días).

Siguiendo el mismo esquema gráfico de la figura 5, en la figura 6 se ha representado, en función del tiempo, el flujo de calor que atraviesa la probeta, que presenta valores negativos en W/m<sup>2</sup>, las temperaturas superficiales interior y exterior a la cámara, y el coeficiente de conductividad  $\lambda$  en W/(m·K) calculado según la fórmula (3). Al término del ensayo el valor de la conductividad es de 0,77 W/(m·K).

#### 4.3. CORRELACIÓN ENSAYO EN LABORATORIO Y ENSAYO IN SITU. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA VS CONTENIDO DE AGUA

Conocido el contenido de agua de la probeta en m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (por diferencia de pesada entre la probeta húmeda y la probeta secada en horno) y el valor de la conductividad térmica ( $\lambda$ ), obtenidos en el ensayo en laboratorio, se representa la relación entre ambos en la figura 7, en la que se ha trazado la línea de tendencia y se ha obtenido la fórmula exponencial resultante (fórmula 4).

$$\lambda = 0,66 e^{3,03 x} \quad \text{W/(m}\cdot\text{K)} \quad (4)$$

Donde,  $\lambda$  es la conductividad térmica de la probeta en W/(m·K) y  $x$  el contenido de humedad m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

Siendo la probeta de laboratorio de similares ca-

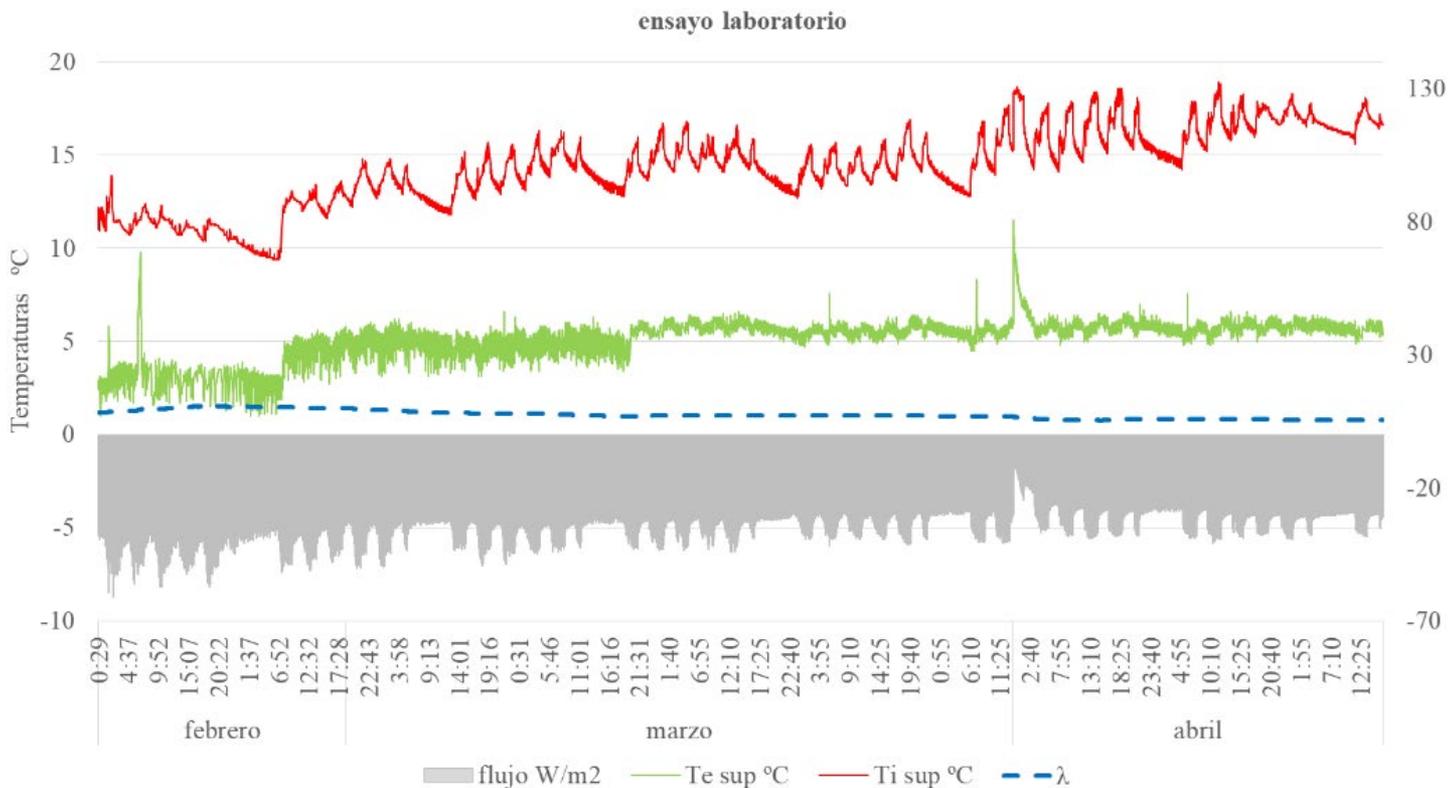


FIG6. Datos obtenidos en el ensayo de laboratorio.

racterísticas al caso de estudio “in situ” es posible comparar los resultados obtenidos entre ellas. De tal manera que, aplicando la fórmula mencionada, deducida del ensayo realizado en laboratorio al caso de estudio realizado “in situ” (muro de fachada de la casona de Serrada), se puede determinar el contenido de agua de esta última.

Comprobando los datos y, partiendo de la fórmula de la línea de tendencia de la figura 7, se determina que

el contenido de agua en el muro de la fachada, cuando se realizó el ensayo “in situ”, era de  $0,095 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

A lo que evidentemente se une, analizados estudios previos (13) (14) (15), la afección de diversos parámetros como la composición mineralógica de los componentes y la distribución y tamaño de poro y huecos en las piezas, formando parte de los condicionantes del comportamiento de los materiales utilizados fundamentalmente ante la presencia de humedad.

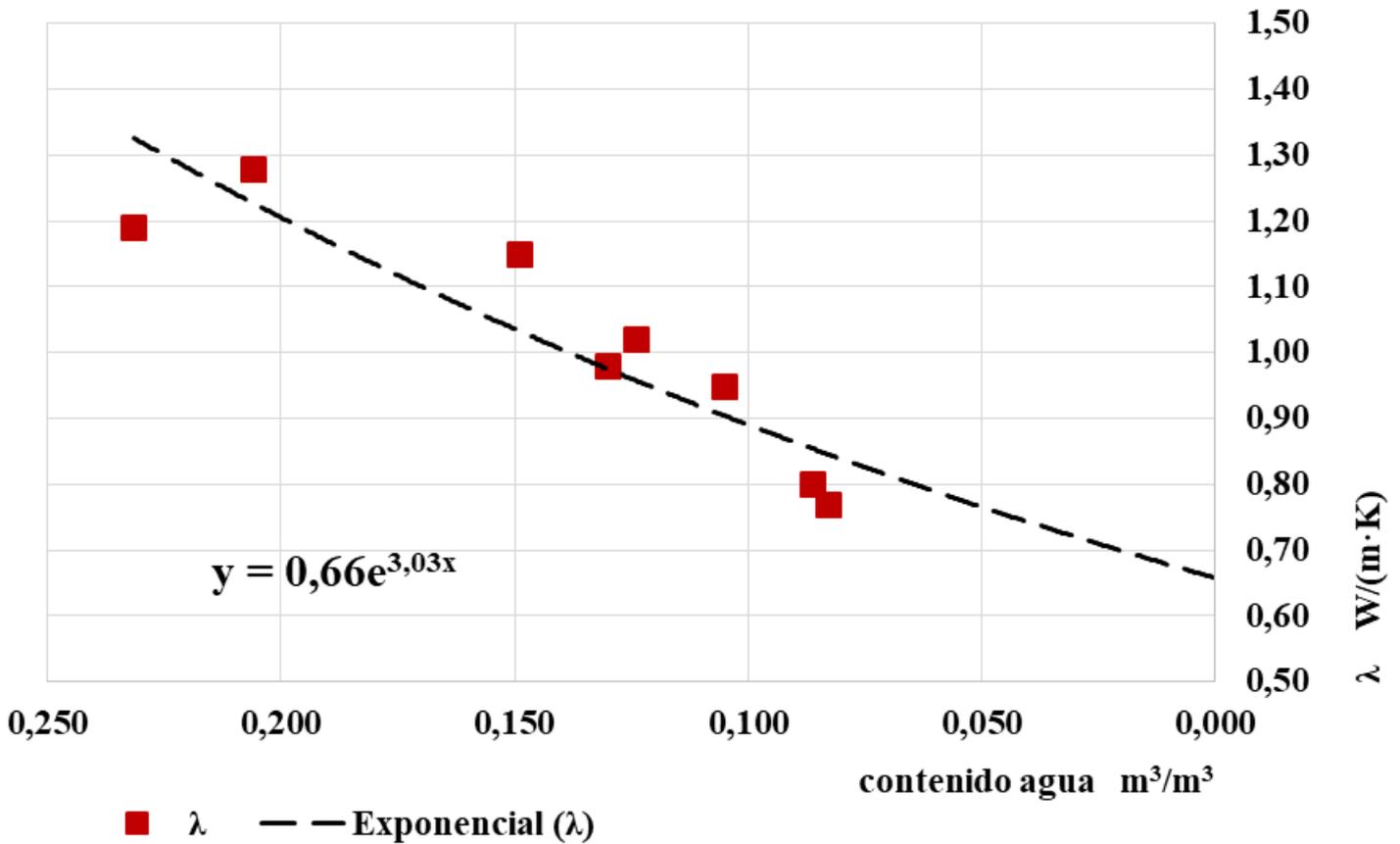


FIG7. Gráfica del valor de la conductividad térmica relacionada con el contenido de agua.

13. UNE-EN 1745-20 Fábrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar las propiedades térmicas.

14. Bassiouny, R., Ali, M.O., NourEldeen, E.S. (2016) Modeling the thermal of Egyptian perforated masonry red brick filled with material of low thermal conductivity. Journal of Building Engineering (5) 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.12.002>

15. Shibib, K.S., Qatta, H.I., Hamza, M.S. (2013). Enhancement in thermal and mechanical properties of bricks. Enhancement in thermal and mechanical properties of bricks. January 2013 Thermal Science 17(4). <https://doi.org/10.2298/TSCI110610043S>.

ISSN 1886-2497 MADRID nº 14. diciembre 2021

Todo ello, a falta de continuar con la realización de más ensayos en diferentes edificios y fábricas y/o en diferentes zonas de la misma fachada, permitiría confirmar la idoneidad del procedimiento de ensayos establecido para determinar el contenido de agua de una fachada y los valores de conductividad térmica en la misma para esas condiciones, cuando se trate de fábricas históricas

## 5. CONCLUSIONES

Con el fin de comprobar la idoneidad metodológica de ensayos no destructivos para conocer el contenido de agua en fachadas de ladrillo históricas, se determinó la conductividad térmica de una probeta en laboratorio y se llevó a cabo un ensayo in situ en una vivienda, partiendo de materiales con unas características composicionales, físicas y dimensionales similares. Entendemos que este es un primer caso de estudio y que es necesario seguir realizando ensayos para validar la metodología.

Diversos autores y las propias normas UNE confirman que la conductividad térmica de una fachada ejecutada con materiales porosos depende del contenido de agua de la misma. En el presente estudio la correlación establecida entre los datos de conductividad térmica tomados del ensayo en laboratorio y los obtenidos con el estudio de caso “in situ” destacó esa misma dependencia entre la conductividad térmica y la cantidad de agua presente en la fábrica, confirmando que según disminuye la cantidad de agua presente, el valor de la conductividad térmica desciende. De tal manera, que si se puede establecer dicha relación para el material en estudio, y se podría estimar el contenido de agua de cada zona de una fachada simplemente con la realización de un ensayo de flujo térmico, que determine la conductividad térmica de esa zona de fachada.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad de España y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) para el proyecto titulado: “Propuesta de evaluación de la humedad que asciende por capilaridad en los muros de fábrica del patrimonio histórico mediante ensayos no destructivos” “BIA2015-68449” en el Laboratorio de Construcción de la E.T.S. de Arquitectura de la Universidad de Valladolid, en el que han participado investigadoras/es de las Universidades de Valladolid, Salamanca y Granada.