

# CARACTERIZACIÓN DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA DE UN MURO DE TIERRA COMPRIMIDA

Àngels Castellarnau Visús

Edra arquitectura km0, España, [angels@edraculturaynaturaynatura.com](mailto:angels@edraculturaynaturaynatura.com)

**Palabras clave:** tapia, comportamiento térmico dinámico, monitorización térmica

## Resumen

La parametrización del comportamiento térmico de las soluciones constructivas de tierra permitirá la reintroducción efectiva de las técnicas en climas cálidos secos. Es precisa la homologación de los sistemas a la normativa vigente y la formulación de nuevos protocolos de cuantificación adaptados a la peculiaridad del comportamiento dinámico de estos sistemas. La falta de estudios relativos a la cuantificación efectiva del comportamiento térmico de los sistemas constructivos de tierra alimenta las dudas sobre su confortabilidad. El objetivo de la investigación es la caracterizar el comportamiento térmico de un muro de tapia calicostrada de la fachada norte de un edificio de vivienda de reciente construcción. La metodología se basa en la monitorización de la temperatura ambiente y superficial y el flujo de calor en unas condiciones determinadas en cumplimiento de los ensayos estandarizados de monitorización in situ del comportamiento térmico de los cerramientos para la obtención de los valores U del cerramiento. Se selecciona el período en que las condiciones climáticas permiten el contraste térmico suficiente para el cumplimiento de las condiciones ambientales preceptivas en los protocolos de ensayo normalizados y en que se aportan datos significativos para la investigación. Se realiza la toma sistemática de datos en el período seleccionado para, a continuación, proceder al procesado de los mismos y a la obtención de conclusiones. Los resultados revelan la variabilidad de la transmitancia consecuencia del comportamiento dinámico del muro. A pesar de ello se pueden determinar valores medios de transmitancia y caracterizar el comportamiento dinámico del muro. Los datos obtenidos mejoran significativamente los valores que se reflejan en la normativa vigente de edificación española y los datos aparecidos en bibliografías de referencia.

## 1 INTRODUCCIÓN

La caracterización del comportamiento térmico de los muros de tierra presenta una complejidad inusual si se compara con los muros convencionales que componen los edificios construidos en Europa a finales del siglo XX y principios del siglo XXI. La composición tradicionalmente monolítica y la inercia térmica de la tierra confieren características diferenciadoras a estos cerramientos siendo la particularidad más significativa su comportamiento higrotérmico dinámico.

Esta tipicidad deriva en la dificultad de cuantificar y comparar, la transmitancia térmica (U) del material con otros materiales de construcción convencionales, dado que los ensayos normalizados para la parametrización de la transmitancia térmica de los materiales de construcción se realiza en estado estacionario y los que introducen las circunstancias dinámicas son muy complejos y se acercan poco a la realidad del comportamiento del material. Precisamente el potencial de la tierra como material de construcción reside en su comportamiento en régimen dinámico dado que aprovecha las condiciones térmica cíclicas interiores y exteriores y del asoleo y regímenes de uso día/noche acumulando el calor en su interior y aportando un retardo térmico en la transmisión del flujo de calor a través del cerramiento.

A pesar de esta dificultad es preceptivo, en el cumplimiento y la justificación de la norma<sup>1</sup> aportar un valor medio de transmitancia térmica para cada cerramiento y así poder evaluar

---

<sup>1</sup> En el caso español es preceptivo el cumplimiento de la norma básica de la edificación, código técnico de la edificación – documento básico de ahorro de energía (NBE CTE DB-HE) respecto a la limitación de la demanda energética en la edificación.

mediante programas informáticos homologados el comportamiento térmico teórico del edificio. La bibliografía conocida cuenta con valores poco fehacientes del comportamiento térmico de los muros de tierra a lo que se suman las posibles desviaciones consecuencia de la heterogeneidad del sistema constructivo en cuanto a revestimientos, densidades, aparición de otros materiales en el caso de estabilizaciones con fibras. Pese a que los métodos de evaluación normativa del comportamiento térmico de los edificios se realizan en régimen estacionario y por ello desprecian el comportamiento dinámico de los cerramientos de tierra, mientras no se desarrolle y regule un protocolo normalizado de evaluación del comportamiento térmico de los muros de gran inercia térmica debemos encontrar la manera de justificar este comportamiento térmico basándonos en la metodología vigente para poder reintroducir estas técnicas en el escenario de la construcción contemporánea.

El presente artículo describe la monitorización de un muro de tapia ubicado en la fachada norte de un edificio de nueva construcción situado en el municipio de Ayerbe, en el Prepirineo de Huesca en el Norte de España.



Figura 1. Imagen de la fachada del edificio estudiado (crédito: A. Castellarnau)

## 2 MARCO TEÓRICO

Según la documentación para la justificación de la evaluación de la eficiencia energética del Código Técnico de la Edificación español, la conductividad térmica de un muro de tierra de densidad  $1800 \text{ kg/m}^3$  y de espesor  $0,45 \text{ m}$ , cuenta con una conductividad de  $1 \text{ W/m}\times\text{K}$  y una transmitancia térmica (U) de  $1,61 \text{ W/m}^2\times\text{K}$ . Y un muro de adobe del mismo espesor de una densidad de  $1885 \text{ kg/m}^3$ , cuenta con una conductividad de  $0,369 \text{ W/m}\times\text{K}$  y una transmitancia (U) de  $1,73 \text{ W/m}^2\times\text{K}$ .

Minke (2006) adopta los valores de conductividad establecidos por Volhard los cuales dependen únicamente de la densidad y se refiere a la DIN 4108-4 mediante la que un muro de densidad  $1800 \text{ kg/m}^3$  tiene con una conductividad de  $0,95 \text{ W/m}\times\text{K}$ . A partir de este dato un muro de  $0,45\text{m}$  tiene una transmitancia de  $2,11 \text{ W/m}^2\times\text{K}$ .

Para un muro de la misma densidad y un contenido de humedad del 5%, Hearthcote (2011) refleja en una tabla que relaciona densidad y conductividad y establece una conductividad de  $0,94 \text{ W/m}\times\text{K}$ . A partir de este dato, un muro de  $0,45 \text{ m}$  tiene una transmitancia de  $2,09 \text{ W/m}^2\times\text{K}$ .

Otros autores<sup>2</sup>, para muros de tierra contruidos en tapia de densidades entre 1400 kg/m<sup>3</sup> y 2000 kg/m<sup>3</sup>, establecen una conductividad de 0,6 W/m×K a 1,6 W/m×K. Lo que supone para un muro de 45 cm una transmitancia de entre 1,33 y 3,55 W/m<sup>2</sup>×K según la densidad. Estos mismos autores establecen para un muro de BTC de densidad de 1700 kg/m<sup>3</sup>, una conductividad de 0,81 W/m×K lo que supone una transmitancia (U) de 1,8 W/m<sup>2</sup>×K para un muro de 45 cm.

Es decir tanto la normativa como la bibliografía de referencia marca un orden de valores para la transmitancia térmica de un muro de tapia de 45 cm mayor que 1,7 W/m<sup>2</sup>×K.

### 3 OBJETIVO

El objetivo del presente artículo es parametrizar el comportamiento térmico de un muro de tapia, con el fin de obtener datos fehacientes de su transmitancia térmica, el retardo térmico y su comportamiento activo.

### 4 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Se listan a continuación unas consideraciones iniciales que enmarcan el estudio desarrollado.

1. La edificación estudiada cuenta con un diseño bioclimático que potencia las virtudes del comportamiento higrotérmico de los cerramientos de tapia.
2. El muro ensayado consiste en un muro de tapia calicostrada<sup>3</sup> por el interior y el exterior del edificio con un mortero de cal hidráulica, el espesor total del muro es de 45 cm, el espesor de cada costra tanto interior como exterior es de 3 cm de media y el cuerpo del muro es de tierra con fibras de paja de cebada de densidad 1850 kg/m<sup>3</sup>.
3. La zona climática en la que se encuentra el edificio D2 según la clasificación del CTE DB-HE, apéndice B.1 (2006). El clima es templado y cálido con precipitaciones significativas, incluso en el mes más seco hay mucha lluvia. Esta ubicación está clasificada como Cfb por Köppen y Geiger. Presenta inviernos y veranos de temperaturas extremas y unas épocas intermedias de primavera y otoño con temperaturas más suaves. Se procede a parametrizar la totalidad del ciclo anual pero el presente artículo se focaliza en los datos obtenidos entre los meses de diciembre y enero, el período más crítico del invierno dado que es el momento de máxima demanda de calefacción.

La monitorización de los muros se realiza según las indicaciones ISO 9869-1 (2014). Los instrumentos de medida utilizados para llevar a cabo la toma de datos en el muro consiste en:

- 1 ud. registrador data logger con sensor externo de temperatura colocado en la cara exterior del muro.
- 1 ud. registrador data logger con sensor externo de temperatura colocado en la cara interior de muro.
- 1 ud. termohigrómetro en el interior de la estancia.
- 1 ud. termohigrómetro exterior.
- 1 ud. registrador data logger con fluxometro (sensor de flujo y temperatura).

<sup>2</sup> Se refiere a Bauluz y Barcena (1992) y a Walker y otros (2005), pero existen muchas otras referencias a la transmitancia térmica de este material que asumen el mismo rango de valores.

<sup>3</sup> La tapia calicostrada es un sistema constructivo de tapia tradicional en toda España, incluso en la zona de estudio. Tradicionalmente se encuentra en edificaciones de uso noble y militar donde existe una justificación para construir una protección económicamente más costosa. La autora ha encontrado costras de mortero de tierra en el Prepirineo de Huesca donde se sustituye el mortero de cal por un mortero de arcilla estabilizado con arena, lo que demuestra lo extendida que estuvo la técnica de la construcción con costra en el territorio estudiado.

Se aplican dos métodos para la determinación de la transmitancia térmica del muro:

#### 4.1 Análisis termométrico (Método 1)

El análisis termométrico no está regulado por ninguna norma aunque esta muy extendido por su sencillez. Para la obtención de la transmitancia térmica tiene en cuenta la diferencia de temperaturas interior y superficial interior y la diferencia de temperaturas interior y exterior, todo ello corregido mediante una constante que corresponde con el valor de resistencia superficial interior (o su inverso el coeficiente de convección superficial interior) del cerramiento. Como valor de resistencia térmica superficial interior se toma el propuesto por el NBE CTE DB-HE1 (Ministerio de la vivienda, 2006) y la UNE-EN ISO 10456 (2012). La fórmula aplicable es la (1).

$$U = \frac{(T_i + T_{si})}{(T_i - T_e)} h_{si} \quad (1)$$

donde: U: transmitancia térmica (W/m<sup>2</sup>×K)

T<sub>i</sub>: temperatura del ambiente interior (°C o K)

T<sub>e</sub>: temperatura del ambiente exterior (°C o K)

T<sub>si</sub>: temperatura superficial interior (°C o K)

h<sub>si</sub>: coeficiente de convección superficial interior

#### 4.2 Análisis termoflujométrico (Método 2)

Este ensayo consiste en la medición in situ del flujo de calor que atraviesa un cerramiento, y en la combinación de éste con las temperaturas superficiales del cerramiento (interior y exterior) y la de los ambientes que separa (interior y exterior). Permite determinar el valor de la transmitancia térmica del cerramiento, así como su conductancia y sus resistencias térmicas superficiales.

La toma de datos se rige por la norma ISO 9869-1 (2014). Entre otras indicaciones, toma de datos durante mínimo 72 horas con un intervalo de 5 minutos. Δt >10° (T<sub>i</sub>-T<sub>e</sub>), etc.

Se aplica la ecuación (2) teniendo en cuenta la corrección para las perturbaciones del sensor de flujo.

$$U_{c} = \frac{q}{(T_i - T_e) - R' \cdot q} \quad (2)$$

donde: U<sub>corregido</sub>: transmitancia térmica, corregido para las perturbaciones del sensor de flujo (W/m<sup>2</sup>×K)

q: flujo de calor (W/m<sup>2</sup>×K)

T<sub>i</sub>: temperatura del ambiente interior (°C o K)

T<sub>e</sub>: temperatura del ambiente exterior (°C o K)

R': resistencia térmica del sensor de flujo de calor (m<sup>2</sup>×K/W)

#### 4.3 Método de la media para la corrección de la transmitancia en los muros con inercia térmica (método 2 corregido)

Los datos obtenidos mediante el método de la termoflujometría se han procesado utilizando el procedimiento del promedio progresivo o de la media que se basa en la idea de que el promedio de las relaciones instantáneas entre el flujo de calor y las diferencias de temperatura una escala de tiempo progresivamente creciente suaviza las oscilaciones, cosa que conduce al valor de estacionario de la transmitancia. A partir de la ecuación (3) que complementa la anterior (2) es posible obtener el valor asíptótico de la transmitancia térmica.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^N q_j}{\sum_{j=1}^N (T_{i,j} - T_{e,j})} \quad (3)$$

donde:  $q$ : es el flujo de calor por unidad de área ( $W/m^2 \times K$ )

$T_i$ : temperatura del ambiente interior ( $^{\circ}C$  o  $K$ )

$T_e$ : temperatura del ambiente exterior ( $^{\circ}C$  o  $K$ )

Con el fin de tener en cuenta los efectos de la inercia térmica, para estructuras con un alto valor de resistencia térmica  $R$  y de alta inercia térmica, la norma propone un método de corrección que consiste en calcular los factores de masa térmica ( $F_i$  y  $F_e$ , respectivamente).

Se desprecia el efecto de las costras de mortero y se considera el muro de una única hoja, de manera que:

$$F_i = \frac{C}{3} \quad F_e = \frac{C}{6} \quad (4)$$

donde:  $C$ : es la capacidad térmica ( $J/(m^2 \times K)$ ) que consiste en el producto de la capacidad calorífica específica o calor específico ( $c$ ) ( $J/kg \times K$ ), la densidad ( $kg/m^3$ ) y el espesor ( $m$ ). Para este muro de tierra  $1900 J/kg \times K$

Para la corrección de los datos obtenidos de la medición del flujo de calor en la ecuación (3)

se sustituye  $\sum_{j=1}^N q_j$  por lo siguiente:

$$\sum_{j=1}^N q_j \frac{(F_i \partial T_i + F_e \partial T_e)}{\Delta t} \quad (5)$$

donde:  $\Delta t$ : es el intervalo entre tomas de datos, en segundos.

$\partial T_i$ : es la diferencia entre la temperatura promedio interna durante las 24 h anteriores a la lectura  $j$  y la temperatura interna promedio promediada durante las primeras 24 h del período de análisis ( $^{\circ}C$  o  $K$ )

$\partial T_e$ : es la diferencia entre la temperatura promedio externa durante las 24 h anteriores a la lectura  $j$  y la temperatura externa promedio promediada durante las primeras 24 h del período de análisis ( $^{\circ}C$  o  $K$ )

#### 4.4 Interpretación de resultados según la ISO 9869-1 (2014)

Como valor de la  $U$  del muro se tomará como el valor de la curva corregida al final de la medida, con una banda de incertidumbre igual al rango de la curva corregida en las últimas 24 horas, siempre que se cumpla cada una de las siguientes condiciones:

- El período de análisis no es inferior a 96 h
- El período de análisis es un múltiplo entero de 24 h
- El valor  $R$  obtenido es igual al valor de  $R$  utilizado para derivar los factores de corrección, dentro del 5%.
- Los valores de la curva corregida:
  - o Al final de la toma de datos
  - o 24 h antes del final de test
  - o 48 h antes del final del test
  - o Son todas iguales dentro del 5% de desviación.

- e) Se obtienen los mismos resultados dentro del 5% si se descartan las primeras 12 horas de datos

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como se puede observar en la figura 2 se colocan los aparatos de medida según las indicaciones de la norma. Se selecciona la posición de los sensores comprobando mediante una imagen termográfica que no existe discontinuidad en el muro en la posición seleccionada según indica en la norma ISO 9869-1 (2014).



Figura 2. Instalación de equipos de medida en el muro estudiado (crédito: A. Castellarnau)

Para la selección de los periodos a analizar dentro de los datos obtenidos y dado que es preciso un intervalo de mínimo 3 días (72 horas) en los que la dirección del flujo sea la misma y que la diferencia de  $T_i - T_e$  sea lo más estable posible (figura 3).

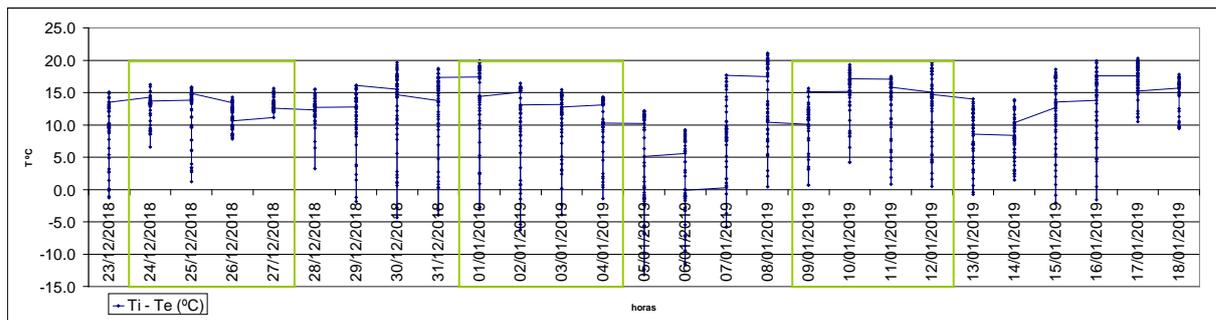


Figura 3. Representación de los datos de  $T_i - T_e$  de los que se selecciona el tramo de 4 días de mayor estabilidad

Se discriminan tres tramos de datos en la figura 3:

1. Se detecta un intervalo con gran estabilidad entre los días 24 y 27 de diciembre de 2018, en este período la vivienda está ocupada y la calefacción interior de la vivienda se enciende con intermitencia según demanda.
2. Se detecta un intervalo de suficiente estabilidad entre los días 1 y 4 de enero de 2019. En este periodo la vivienda está deshabitada, viene de un período habitado que afectará a los datos pero no existe calefacción en el ambiente interior por lo que el comportamiento del muro tendrá mayor influencia de las condiciones ambientales exteriores.

- Se detecta un intervalo con gran estabilidad entre los días 9 y 12 de enero de 2019. En este período la vivienda vuelve a estar habitada por lo que la calefacción se enciende de forma intermitente según la demanda.

Es preciso constatar que en ningún momento se cuenta con una equidistancia entre  $T_e$  y  $T_i$  sostenida durante las 72 horas preceptivas puesto que esta depende del clima, que en esta latitud corresponde a inviernos suaves con bajas temperaturas por la noche pero temperaturas en general moderadas durante el día.

Esta circunstancia desvía los valores de transmitancia como se verá más adelante, el cálculo de esta desviación no lo describe la metodología utilizada y la intermitencia corresponde precisamente con los períodos de carga del muro, es decir cuando la temperatura exterior asciende durante el día y por tanto se acorta la distancia entre  $T_i$  y  $T_e$  por lo que no llega a una diferencia de temperatura de  $10^{\circ}\text{C}$ . El flujo en estos tramos de los períodos estudiados puede llegar incluso a invertirse.

### 5.1 Comparación de los datos obtenidos según los dos métodos de análisis contemplados

En la tabla 1 se reflejan los valores obtenidos mediante sendos métodos de análisis, se detecta una desviación media de un 53% del método 1 respecto al método 2. Los valores del método termométrico (método 1) se acercan a los referidos en la bibliografía de referencia pero no tienen en cuenta el flujo de calor en el interior del muro por lo que no se aceptan como válidos dado que no reflejan la realidad del comportamiento térmico del muro.

Tabla 1. Comparativa de datos obtenidos en sendos métodos

Intervalo	U ( $\text{W}/\text{m}^2 \times \text{K}$ )	
	Método 1	Método 2 corregido
24-27 diciembre	1,760	0,822
1-4 enero	1,137	0,662
9-12 enero	1,828	0,994

El estudio de los distintos intervalos se ha realizado mediante el método de la fluxometría (método 2).

### 5.2 Datos obtenidos intervalo 1 (24-27 diciembre)

En este intervalo la temperatura exterior no desciende de  $0^{\circ}\text{C}$  y presenta muy corta oscilación día/noche salvo el día 25 que a temperatura asciende a  $16^{\circ}\text{C}$ , acortando la distancia de  $10^{\circ}$  respecto a la temperatura interior.

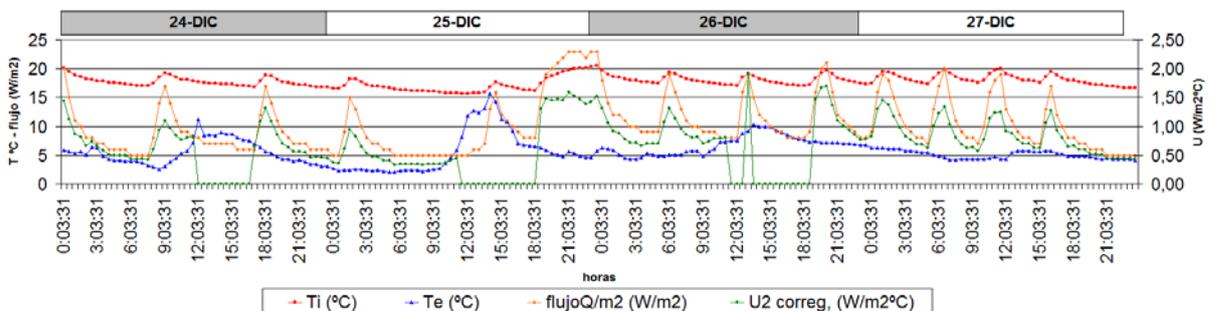


Figura 4. Representación de los datos de  $T_i$ ,  $T_e$ , flujo de calor y U del período del 24 al 27 de diciembre 2018

Se observa en la temperatura interior una estabilidad sostenida por los pequeños repuntes aportados por la calefacción (con el termostato a  $18^{\circ}\text{C}$  que no ha permitido que la temperatura interior, a pesar de la sutil oscilación, descendiese de  $15^{\circ}\text{C}$ ).

Estos repuntes aportados por la calefacción suponen un aumento del flujo hacia el interior del muro en sentido hacia el exterior. El flujo se mantiene en un rango entre 5 y 22 W/m<sup>2</sup>. Esta intermitencia se refleja en la oscilación de la U corregida y se acrecienta cuando la temperatura exterior tiende a descender y por tanto distanciarse de la temperatura interior. Hay que tener en cuenta que el régimen de uso del edificio hasta el momento concreto del ensayo se encuentra en uso con la calefacción encendida de la manera explicada, por tanto el muro cuenta con una carga térmica que reacciona a las pequeñas oscilaciones interiores.

También hay que tener en cuenta que este método refleja el flujo de calor hacia el interior del muro pero no documenta el flujo del muro hacia el exterior, es por ello que el valor de la transmitancia no tiene en cuenta la capacidad de acumular calor que tienen el muro. Y por ello se considerará como un valor transitorio hasta que desarrollemos un método que tenga en cuenta el flujo de calor del muro hacia el exterior. Teniendo en cuenta las precauciones anteriormente mencionadas, la transmitancia (U) corregida según el método de la media en este período es de 0,82 W/m<sup>2</sup>×K y la conductividad ( $\lambda$ ) 0,369 W/m×K.

### 5.3 Datos obtenidos intervalo 2 (1-4 enero)

En este intervalo la temperatura exterior presenta amplias oscilaciones entre el día en concreto existe una diferencia de temperatura de más de 20°C los días 1, 2 y 3 de enero. Por el contrario, la temperatura interior al no estar habitado el edificio y por tanto no contar con aporte de calefacción, refleja un descenso contenido hasta llegar a los 10°C.

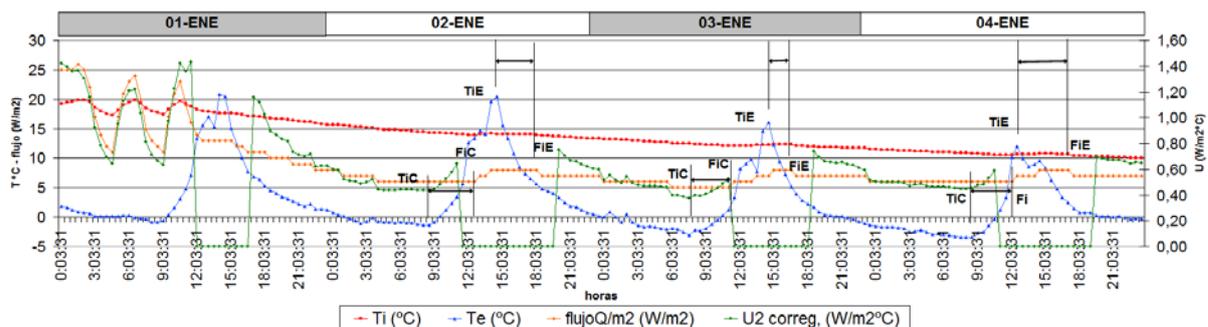


Figura 5. Representación de los datos de Ti, Te, flujo de calor y U del período del 1 al 4 de enero 2019

Esta circunstancia expone al muro a la oscilación de la temperatura exterior. Se observa un flujo de calor sin grandes oscilaciones hacia el exterior del edificio, así como unos períodos de retardo, motivados por la inercia térmica del muro. El flujo, en cuanto entra en período de estabilidad se mantiene en un rango entre 5 y 8 W/m<sup>2</sup>. En presencia de calefacción no es posible detectar el retardo en fase de carga y descarga dado que en este caso no se cuenta con los datos de las temperaturas internas del cuerpo del muro.

Se observa un retardo en fase de carga TiC-FiC de cuatro horas los 2, 3 y 4 de enero y un retardo en fase de descarga de entre tres y cuatro horas los mismos días. Teniendo en cuenta las precauciones mencionadas en relación a las limitaciones del presente método de obtención de los valores, la transmitancia térmica (U) corregida según el método de la media en este período es de 0,657 W/m<sup>2</sup>×K y la transmitancia ( $\lambda$ ) 0,296 W/m×K.

Se discriminan los valores que no responden a la condición de 10°C de diferencia de temperatura interior y exterior, dado que esta es una condición limitante según la norma de referencia.

### 5.4 Datos obtenidos intervalo 3 (9-12 enero)

En este intervalo la temperatura exterior presenta así mismo amplias oscilaciones entre el día y la noche, en concreto existe una diferencia de temperatura de cerca de 20°C en todo el período. La temperatura interior oscila según la demanda del termostato de calefacción fijado a 18°C.

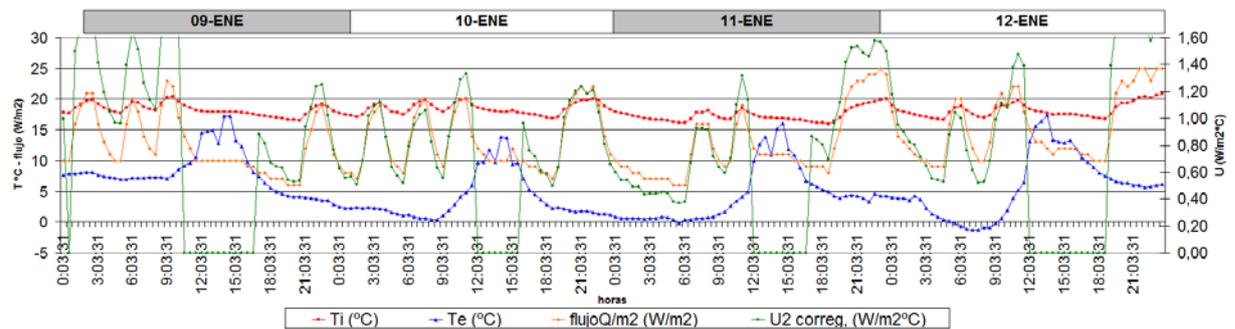


Figura 6. Representación de los datos de  $T_i$ ,  $T_e$ , flujo de calor y  $U$  del período del 9 al 12 de enero 2019.

De la misma manera que en el primer período estudiado el flujo de calor hacia el interior del muro refleja los aumentos rápidos de temperatura interior que aporta la calefacción. Este flujo se mantiene entre  $6$  y  $25 \text{ W/m}^2$ .

Los valores de la transmitancia, al depender directamente del flujo de calor recogen también estas oscilaciones de la temperatura interior. Los datos reflejan un comportamiento similar al del primer período estudiado. Teniendo en cuenta las precauciones mencionadas en relación a las limitaciones del presente método de obtención de los valores, la transmitancia térmica ( $U$ ) corregida según el método de la media en este período  $0,993 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$  y la conductividad ( $\lambda$ )  $0,447 \text{ W/m} \times \text{K}$ .

Se discriminan los valores que no responden a la condición de  $10^\circ\text{C}$  de diferencia de temperatura interior y exterior, dado que esta es una condición limitante según la norma de referencia.

Si se hace una media ponderada de los tres períodos, se obtiene un valor de transmitancia ( $U$ ) de  $0,823 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$  y un valor de conductividad térmica ( $\lambda$ ) de  $0,37 \text{ W/m} \times \text{K}$ , datos que quedan lejos de los valores de referencia que aporta la norma y que podemos utilizar para esta sección constructiva de muro. A pesar de ello el CTE DB-HE (2006) limita la transmitancia térmica para los muros de cerramiento en esta zona climática a  $0,66 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$  sin discriminar la orientación del muro. Por lo que el muro tal como está construido cumpliría norma eventualmente. Este extremo variará en el momento en que la metodología tenga en cuenta el flujo real en el interior del muro y respecto al exterior.

## 6 CONCLUSIONES

Tras realizar la comparativa de los métodos de análisis se detecta una desviación de los valores de la transmitancia de un 53% del método de la termometría respecto al método de la fluxometría. Esto lleva a invalidar este método para la obtención *in situ* de valores de transmitancia térmica de muros en edificios existentes dado que versa un factor importante de imprecisión en los valores de transmitancia obtenidos, seguramente motivado por la imposibilidad de mantener las condiciones ideales.

Para la toma *in situ* de los datos de temperatura y flujo de los edificios en uso mediante termofluxometría y en climas cálidos secos (con contraste de temperatura día y noche), es preciso seleccionar períodos sin calefactar y con grandes oscilaciones térmicas día/noche. De manera que dado que el muro de gran inercia mantiene en descenso sostenido la temperatura, este se somete principalmente a la oscilación de temperatura exterior, simplificando las variables y por tanto facilitando la lectura del comportamiento térmico del muro.

Así mismo se ha constatado que es precisa la obtención de valores de flujo de calor del muro hacia el exterior para poder evaluar con precisión el flujo que atraviesa el muro. Sin estos datos el método de la fluxometría quedaría también invalidado dado que el valor de la transmitancia calculado no refleja el calor que atraviesa el muro sino el que entra en el muro sin tener en cuenta el que sale (cuando la dirección del flujo de calor es desde el interior

hacia el exterior); ni consecuentemente la capacidad de acumular calor que tiene el muro y su comportamiento activo. Para esta corrección del método se propone la instalación de un segundo sensor de flujo en el exterior del muro, tal como recomienda el fabricante pero no recoge la norma.

Los valores de transmitancia térmica del muro descrito, medidos en los períodos en orientación norte más críticos del ciclo anual en clima cálido seco se encuentran dentro de un rango de valores medios corregidos comprendido entre 0.66 y 0.99 W/m<sup>2</sup>K. Con la precaución observada respecto a la metodología ya son significativamente mayores que los que aparecen en la bibliografía de referencia (valores mayores a 1.7 W/m<sup>2</sup>K) por lo que entendemos que el presente estudio, a pesar de los datos obtenidos, puede ayudar a hacer más competitiva la utilización de muros de tierra en la construcción convencional en este tipo de climas sin ser precisa la colocación de aislamiento (lo que encarece significativamente el sistema).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bauluz, G.; Barcena, P. (1992). Bases para el diseño y construcción con tapial. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes

CTE DB-HE (2006-última modificación 2018). Documento Básico HE Ahorro de energía. Código técnico de la edificación. España: Ministerio de Vivienda

Exigencia básica HE 1: Limitación de demanda energética.

Exigencia básica HE 2: Rendimiento de las instalaciones térmicas.

Exigencia básica HE 3: Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.

Exigencia básica HE 4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria.

Exigencia básica HE 5: Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.

Heathcote, K. (2011). The thermal performance of earth buildings. Informes de la Construcción 63 (523), p. 117-126

ISO 9869-1 (2014). Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1: Heat flow meter method. International Standard Organization

Minke, G. (2006). Building with earth: design and technology of a sustainable architecture. Basel/Berlin/Boston: Birkhäuser

UNE-EN ISO 10456 (2012). Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño. Asociación Española de Normalización y Certificación.

Walker, P.; Keable, R.; Martin, J.; Maniatidis, V. (2005). Rammed earth, design and construction guidelines. Ed. BRE Bookshop. HIS BRE

## AUTORES

Àngels Castellarnau Visús, Arquitecta por la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), Phd por la UPC en Energía natural en la Arquitectura. Especializada en bioconstrucción, arquitectura de bajo impacto ambiental y construcción con tierra. Investiga en sistemas constructivos con material local y en la gestión de recursos naturales en el territorio. Dirige talleres de formación en técnicas de construcción con tierra y material local. Fundadora de Edra Arquitectura km 0, Co-fundadora de Made in Tierra Spain.