Gremium©| Volúmen 7 | Número 14 | ISSN: 2518-2943 | Agosto-Diciembre 2020
Ciudad de México | Revista de acceso abierto editada por Editorial Restauro
Disponible en línea https://editorialrestauro.com.mx/gremium/

Gremium
Revista de restauración arquitectónica

CC BY NC SA

Research Paper | Artículo de investigación



Caracterización del comportamiento térmico de un muro de tapia mediante la termofluxometría

Rammed earth wall's thermal behaviour characterization by termofluxometry

Àngels Castellarnau Visús
Arquitecta por la UPC (Universitat Politécnica de Catalunya), especializada en bioconstrucción, arquitectura de bajo impacto ambiental y arquitectura de tierra. Phd por la UPC en Energía natural en la Arquitectura. Investiga sistemas constructivos con material local y la gestión de recursos naturales en el territorio. Fundadora del estudio Edra Arquitectura km0. Recibió el Premio Internacional de Arquitectura Contemporánea en Tierra Cruda Terra Award 2016, el Premio de Construcción Sostenible de Castilla y León 2015-2016 y el Premio de Sostenibilidad del García Mercadal 2017 y 2018 por, entre otras, una casa de Tapia en Ayerbe (España). Miembro de la red PROTERRA. Cofundadora de la plataforma Made in tierra Spain. Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=s0acS4wAAAAJ ORCID: 0000-0002-1568-1254

Recibido: 31 de enero de 2019 | Aceptado: 30 de junio de 2020 | Disponible en línea: 01 de agosto de 2020. © Àngels Castellarnau Visús 2020. Este artículo es una publicación de acceso abierto. CC BY-NC-SA.

Resumen

La gran cantidad de patrimonio construido en tierra en España, que precisa de una rehabilitación urgente, la aparición de nuevos criterios de sostenibilidad que empujan la construcción contemporánea en tierra, y la necesidad del cumplimiento de la norma para la reintroducción de las técnicas de construcción en tierra en el escenario de la construcción española, obligan a revisar los datos y la metodología para la parametrización del comportamiento térmico de los muros de tierra. Es precisa la homologación de los sistemas en la normativa vigente, y la formulación de nuevos protocolos de cuantificación adaptados a la peculiaridad del comportamiento dinámico de este tipo de construcciones. La falta de estudios relativos a la cuantificación efectiva del comportamiento térmico de estos sistemas constructivos, alimenta las dudas sobre su confortabilidad. El objetivo de esta investigación es caracterizar el comportamiento térmico de un muro de tapia calicostrada (un sistema tradicional en la zona de estudio) de la fachada norte de un edificio de vivienda de reciente construcción, teniendo en cuenta tanto los valores de flujo desde el interior de la vivienda hacia el interior del muro, como los de flujo desde el muro hacia el exterior. La metodología se basa en la monitorización de la temperatura ambiente y superficial, y en 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 caracteriza el comportamiento dinámico del

muro. Los resultados revelan la vulnerabilidad de la transmitancia respecto a la temperatura exterior, y la ineficacia de la metodología para muros de gran inercia térmica. A pesar de ello, los datos obtenidos mejoran significativamente los valores que se reflejan en la normativa vigente de edificación española, y los aparecidos en bibliografías de referencia.

Palabras clave: Tapia, Comportamiento térmico dinámico, Monitorización termofluxométrica.

Abstract

The large amount of Spanish earth built heritage that already requires urgent rehabilitation, the emergence of new sustainability criteria that pushes up contemporary earth architecture and the need of compliance with the standard for the reintroduction in the Spanish construction system of the earth building techniques, oblies to review the data and the methodology for the parameterization of the earth wall's thermal behaviour. It's necessary the homologation of the earthen buildings to the current building regulations and the formulation of new protocols adapted to the peculiarity of their dynamic behaviour. The lack of research related to quantification of the thermal behaviour of this type of building solutions casts doubts about their conformability. The objective of the present research is to characterize the thermal behaviour of a north rammed earth façade of a contemporary building taking into account both the heat flow from the inside ambient towards the inside of the wall and the heat flow from the wall towards the outside ambient. Methodology is based on monitoring the ambient surface temperatures and the heat flow under certain conditions (in compliance with the standardized in situ monitoring tests of the thermal behaviour of building envelopes) to obtain the U values. It is characterized the dynamic behaviour of the wall. The results characterize the dynamic behaviour of the wall, reveal its positive vulnerability to the outside temperature and determine the inefficiency of the regulation's methodology in case of walls with thermal inertia. Despite this, the data obtained improves significantly the values that are reflected in the current Spanish building regulations and those that appear in reference bibliographies.

Keywords: Rammed earth, Dynamic thermal behaviour, Thermal flow monitoring.

Introducción

El patrimonio construido en tierra en España es innumerable. En la zona de estudio, el Pre Pirineo de Huesca, este patrimonio (Figura1) tiene un peso significativo respecto al construido en otras técnicas como la piedra o la madera.

Desde una perspectiva arquitectónica, la rehabilitación y puesta en uso de este patrimonio, así como la recuperación de la técnica constructiva para la reintroducción de la misma en el escenario de la construcción contemporánea, pasa por el conocimiento del comportamiento de los cerramientos y de los sistemas.

Para cualquier intervención sobre un cerramiento existente, así como cualquier ejecución de un cerramiento nuevo, es preciso el cumplimiento de la normativa preceptiva, en concreto en España del Código Técnico de la edificación (CTE).

El buen conocimiento del comportamiento de este tipo de cerramientos permitirá dar soluciones constructivas que potencien sus virtudes y minimicen el impacto de sus debilidades. La caracterización de estos sistemas tradicionales, la obtención de datos fehacientes que maticen los aparecidos en la norma y la introducción de estas técnicas en la normativa, son algunas de las claves para posibilitar la pervivencia tanto de



Figura 1. Imagen de la una fachada de tapia calicostrada tradicional en Agüero (Huesca). (Fuente: la autora).

este patrimonio edificado como del patrimonio inmaterial que condensa el conocimiento de la técnica y su adaptación al clima, al medio físico y al medio social al que pertenece.

Nos encontramos ante la circunstancia de que la norma exige la parametrización del comportamiento térmico de los cerramientos, con el fin de la justificación de su cumplimiento.

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, tanto de finales del siglo XX como principios del siglo XXI. La composición tradicionalmente monolítica y la inercia térmica de los muros de 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 realizan 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 térmicas 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,[1] aportar un valor medio de transmitancia térmica para cada cerramiento, y así poder evaluar mediante programas informáticos homologados el comportamiento térmico teórico del edificio. Es preciso aclarar que la norma (CTE en su documento básico de Ahorro de energía: DB-HE, tiene como objeto limitar el consumo energético de los edificios y el control de la demanda energética).

La bibliografía conocida cuenta con valores poco fehacientes del comportamiento térmico de los muros de tierra, a los que se suman las posibles desviaciones consecuencia de la heterogeneidad del sistema constructivo en cuanto a revestimientos, densidades y aparición de otros materiales, en el caso de estabilizaciones con fibras o costras y revocos.

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 rehabilitación y construcción contemporáneas.

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 pre Pirineo de Huesca en el Norte de España (Figura 2). Este artículo complementa otro artículo presentado por la autora en el marco del 19° SIACOT-Volver a la Tierra VII, Conservación sostenible del paisaje: Tierra y Agua en el año 2019, en el que se ensayaba la metodología de monitorización in situ de la transmitancia térmica prescrita por la norma de referencia ISO 9869-1:2014 y en el que se concluía que esta metodología no arroja datos fehacientes del comportamiento térmico real de los muros, proponiendo al final una mejora metodológica, que es la que se ensaya en la presente investigación.

Se decide la monitorización de un muro de nueva construcción, dado que de esta muestra se tienen datos de densidad por haber participado en la ejecución del mismo, y dado que en los edificios tradicionales en uso a los que se tiene acceso en la zona, no se puede asegurar estanqueidad suficiente para la consecución de las circunstancias de ambiente que prescribe la metodología de referencia.

Esta densidad de muro aparece recurrentemente en muros tradicionales de la zona, por lo que se considera la presente investigación de interés para futuras intervenciones en el patrimonio de tapia local.

Marco teórico

Tras la caracterización del comportamiento térmico de un muro de tapia situado en orientación norte de una vivienda ubicada en Ayerbe (Huesca), pre Pirineo Español, se concluye que la aplicación de la metodología de la termofluxometría que prescribe la norma de referencia ISO 9869-1:2014 no arroja datos fehacientes del comportamiento térmico del muro, dado que esta metodología tiene en cuenta únicamente el flujo de calor que atraviesa el muro respecto al interior de la vivienda pero desprecia el flujo de calor respecto al exterior del edificio (Castellarnau, 2019).

[1] En el caso español es preceptivo el cumplimiento de la NBE CTE DB_HE respecto a la limitación de la demanda energética en la edificación.



Figura 2. Imagen de la fachada del edificio estudiado. (Fuente: la autora).

Este extremo, concluye el artículo presentado por la autora en el marco del 19° SIACOT-Volver a la Tierra VII, Conservación sostenible del paisaje: Tierra y Agua en el año 2019, aporta datos de la cantidad de calor que entra en el muro desde el interior de la estancia, pero no de la cantidad de calor que sale del muro (cuando la dirección del flujo de calor es desde el interior hacia el exterior), despreciando de esta manera la capacidad de almacenamiento térmico que tienen los muros de tierra (de gran inercia térmica) y su comportamiento activo.

Para la corrección del método se propone la instalación de un segundo sensor de flujo de calor en el exterior del muro, tal como lo recomienda el fabricante, aunque no recoge la norma.

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 con una temperatura interior estable y con gran contraste térmico interior/exterior. De manera que el muro de gran inercia se somete principalmente a la oscilación de temperatura exterior, simplificando las variables, y por tanto facilitando la lectura del comportamiento térmico del muro.

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 cruda de densidad 1800 kg/m^3 y de espesor 0,45m, cuenta con una conductividad de 1 W/mK y una transmitancia térmica (U) de 1.61 W/m^2K. Y un muro de adobe del mismo espesor de una densidad de 1885 kg/m^3, cuenta con una conductividad de 0.369 W/mK y una transmitancia (U) de 1.73 W/m2K.

Minke 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 kg/m^3 tiene con una conductividad de 0.95 W/mK. A partir de este dato, un muro de 0.45m tiene una transmitancia de 2.11 W/m2K.

Arnold, para un muro de la misma densidad y un contenido de humedad del 5%, tal y como como refleja Hearthcote en una tabla que relaciona densidad y conductividad, establece una conductividad de 0.94 W/mK. A partir de este dato, un muro de 0.45m tiene una transmitancia de 2.09 W/m^{2}K.

Otros autores, para muros de tierra construidos en tapia de densidades entre 1400 y 2000 kg/m3, establecen una conductividad de 0.6 a 1.6 W/mK. Lo que supone para un muro de 45 cm una transmitancia de entre 1.33 y 3.55, según la densidad. Estos mismos autores establecen para un muro de bloque de tierra comprimida de densidad de 1700 kg/m^3, una conductividad de 0.81 W/mK, lo que supone una transmitancia (U) de 1.8 W/m^{2}K para un muro de 45 cm.

Es decir, tanto la normativa como la bibliografía de referencia marcan un orden de valores para la transmitancia térmica de un muro de tapia de 0.45 m mayor que 1.7 W/m^{2}K.

Castellarnau establece para un muro de tapia calicostrada de densidad del cuerpo del muro de 1800 kg/m^3, valores de transmitancia medios corregidos comprendidos entre 0.66 y 0.99 W/m2K, medidos mediante termofluxometría según la prescripción del método de la media (ISO 9869-1:2014).

En la Tabla 1 se resumen los datos de conductividad que aparecen en la bibliografía de referencia.

Objetivo

El objetivo del presente artículo es comprender y 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, así como testar la utilización de doble termofluxómetro, con el fin de matizar la metodología que prescribe la norma para la monitorización del comportamiento térmico de muros de gran inercia.

1. Estrategia metodológica

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

Tabla 1. Tabla resumen que lista algunos datos de conductividad térmica de la bibliografía de referencia. (Fuente la autora respecto a la bibliografía referida).

bibliografía	descripción material	densidad ρ (kg/m^3)	conductividad λ (W / m·K)
CTE	Tapia, adobe, bloque de tierra comprimida	1770<ρ<2000	1,10
ARNOLD, P.J. HEARTHCORE, K.	Tapia, bloque de tierra comprimida	2000	1,20
		1800	0,94
DIN 4108-4 MINKE, G. VOLHARD, F.		2000	1,20
		1800	0,95
WALKER, P. et al.	Tapia	1400<ρ<2000	0,60 a 1,60
BAULUZ, G. , BARCENA, P.	Btc	1700	0,81
CASTELLARNAU, A.	Tapia calicostrada	1800	0,29 a 0,45

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[2] 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 arcillosa con fibras de paja de cebada de densidad 1850 kg/m3.
3. La zona climática en la que se encuentra el edificio es D2 según la clasificación del CTE_DB-HE, apéndice B.1. 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 del muro se realiza según las indicaciones del método de la media corregido especificado en la ISO 9869-1:2014 (Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1: Heat flow meter method).

Los instrumentos de medida utilizados para llevar a cabo la toma de datos en el muro, consisten 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 fluxómetro colocado en la superficie interior del cerramiento (sensor de flujo y temperatura).
- 1 Ud. registrador data logger con fluxómetro colocado en la superficie exterior del cerramiento (sensor de flujo y temperatura).
- 1 cámara termográfica.

Se colocan los aparatos de medida según las indicaciones de la norma (Figuras 3 y 4), instalando además (no lo exige la norma) un termofluxómetro en la cara exterior del muro (TF2).


Figura 3. Instalación interior de los equipos de medida en el muro estudiado. (Fuente: la autora).


Figura 4. Instalación exterior de los equipos de medida en el muro estudiado. (Fuente: la autora).

[2] 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 pre Pirineo 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 toman los siguientes datos:

-Cara interior del muro:

- *Temperatura superficial interior.*
- *Temperatura ambiente interior.*
- *Humedad relativa ambiente interior.*
- *Flujo en la superficie interior del muro.*

-Cara exterior del muro:

- *Temperatura superficial exterior.*
- *Temperatura ambiente exterior.*
- *Humedad relativa exterior.*
- *Flujo en la superficie exterior del muro.*

Se selecciona la posición de los sensores, comprobando mediante una imagen termográfica (Figuras 5 y 6) que no existe discontinuidad en el muro en la posición seleccionada según indica la norma ISO 9869-1:2014, y en la posición en la que se comprueba que la distancia suficiente respecto a la afección que pueda tener en el comportamiento térmico de muro respecto a jambas y esquinas.

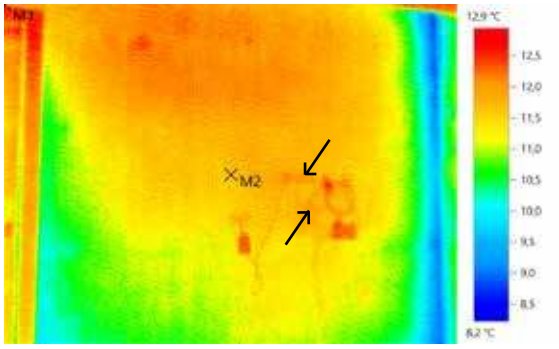

Figura 5. Imagen termográfica del muro monitorizado desde su cara interior. (Fuente: la autora).

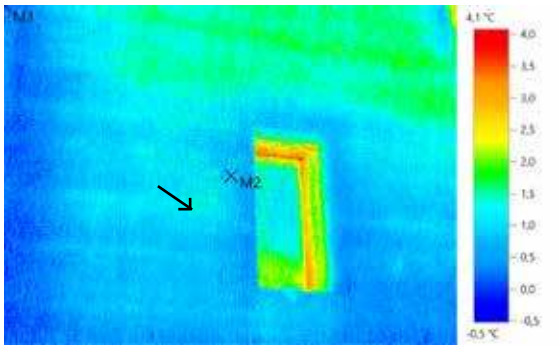

Figura 6. Imagen termográfica del muro monitorizado desde la cara exterior. (Fuente: la autora).

1.1. Análisis gráfico

Se utiliza el análisis de las gráficas realizadas, empleando los datos obtenidos con el fin de detectar períodos de carga y descarga, evaluar retardos y medir oscilaciones. Para ello, se siguen los siguientes pasos:

1. Detectar tendencias dentro del ciclo, agrupando los tramos en función de las características conocidas de clima exterior, y compararlas con las condiciones de clima medias en la ubicación del ensayo, para evaluar si las condiciones del ensayo son representativas.

2. Detectar comportamientos recurrentes de carga y descarga.

3. Evaluar la sensibilidad del comportamiento térmico del muro a la temperatura ambiente exterior.

4. Seleccionar los tramos más representativos (con un comportamiento recurrente) para analizar las curvas (trazado, pendiente, amplitud, etc.).

1.1.1. Análisis termofluxométrico

Este ensayo consiste en la medición in situ del flujo de calor que atraviesa un cerramiento, y la combinación de éste con las temperaturas superficiales del cerramiento (interior y exterior), y las 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 (Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1: Heat flow meter method). Entre otras indicaciones, toma de datos durante mínimo 72 horas con un intervalo de 5 minutos. Δt >10º (Ti-Te), etc.

Para este estudio, se instala un medidor de flujo en la cara interior, y otro en la cara exterior del muro. Se realiza un balance de flujo entre las dos mediciones, y se obtiene un valor de flujo neto que se empleará para realizar los cálculos.

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

$$Ucorregido = \frac{q}{(Ti - Te) - R'q} \qquad (2)$$

Dónde:

Ucorregido: transmitancia térmica, corregido para las perturbaciones del sensor de flujo (W/ m² • K)

q: flujo de calor (W/m2 • K)

Ti: temperatura del ambiente interior (ºC o K)

Te: temperatura del ambiente exterior (ºC o K)

R': resistencia térmica del sensor de flujo de calor (m² • K/W)

Los datos obtenidos mediante el método de la termofluxometría 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 en una escala de tiempo progresivamente creciente suaviza las oscilaciones, cosa que conduce al valor estacionario de la transmitancia. A partir de la siguiente ecuación (3), que complementa la anterior (2), es posible obtener el valor asintótico de la transmitancia térmica.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{N} qj}{\sum_{j=1}^{N} (Tij - Tej)} \qquad (3)$$

Dónde:

q: es el flujo de calor por unidad de área (W/ m2 • K)

Ti: temperatura del ambiente interior (ºC o K)

Te: temperatura del ambiente interior (ºC 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 (Fi y Fe, respectivamente).

Dado que la metodología de la termofluxometría trabaja con el valor absoluto del flujo que atraviesa el muro, y que por lo tanto no se cuenta con datos termohigrométricos en los puntos de cambio de capa de material que demuestren que el flujo (dirección e intensidad) varía en las capas de la costra, que por otro lado cuentan con una densidad similar a la del cuerpo del muro, se decide despreciar en la presente investigación el efecto de las costras de mortero, y considerar el muro de una única hoja, de manera que:

$$Fi = \frac{C}{3} \qquad Fe = \frac{C}{6} \qquad (4)$$

Dónde:

C: es la capacidad térmica (J/ (m2 • K)) que consiste en el producto de la capacidad calorífica específica o calor específico (c) (J/kg °C), la densidad (kg/m3) y el espesor (m). Para este muro de tierra, C= 810 J/m2K

Sin prejuicio de que en posteriores investigaciones se puedan colocar sensores de flujo en estos puntos de cambio de capa, para evaluar su afección al flujo que atraviesa el muro.

Para la corrección de los datos obtenidos de la medición del flujo de calor en la ecuación (3) sustituimos $\sum_{j=1}^{N} qj$ por lo siguiente:

$$\sum_{j=1}^{N} qj - \frac{(Fi\partial Ti + Fe\partial Te)}{\Delta t} \qquad (5)$$

Dónde:

Δt*: es el intervalo entre tomas de datos, en segundos.*

∂Ti *: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 (ºC o K)*

∂Te*: 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 (ºC o K)*

a) El periodo de análisis no es inferior a 96 h

b) El período de análisis es un múltiplo entero de 24 h

c) El valor R obtenido es igual al valor de R utilizado para derivar los factores de corrección, dentro del 5%.

d) 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 h de datos

La norma tiene en cuenta la posibilidad de que no se cumplan algunos de estos condicionantes (apartado 7.2.3), e incluso acepta que errores de medición eleven el grado de incertidumbre de los valores válidos hasta en un 28%, o incluso por encima, en función de las circunstancias del ensayo (apartado 9).

1.1.2. Interpretación de resultados según la ISO 9869-1:2014

Las dificultades expresadas en el Anexo A (transferencia de calor entre superficies y medida del valor U) respecto a la obtención del balance térmico dependiente de la complejidad de la toma de datos de la temperatura ambiente y sus variaciones tanto por la posición de los sensores como por las variaciones en el tiempo en las medidas in situ, nos da una idea de las vulnerabilidades de la metodología.

La norma plantea una serie de condicionantes para validar los datos obtenidos. Como valor de la U del muro se tomará 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 h, siempre que se cumpla cada una de las siguientes condiciones:

2. Resultados y discusiones

Se obtienen datos de los días comprendidos entre el 29 de diciembre de 2019 y el 6 de enero de 2020. La metodología de referencia ISO 9869-1:2014 establece como requerimiento indispensable la obtención de datos durante un intervalo de 72 horas, en los que tanto la dirección de flujo como la diferencia de la temperatura sean lo más estables posible.

En este período, la evolución de temperaturas interiores y exteriores, así como de la humedad relativa, responde a la siguiente dinámica (Figura 7).

Se observa que aparecen tramos calefactados en los dos extremos del ensayo, de rangos de cierta estabilidad en el tramo central del ensayo. Por el contrario, tal y como es de esperar, la temperatura exterior tiene unas fluctuaciones notables día/ noche.

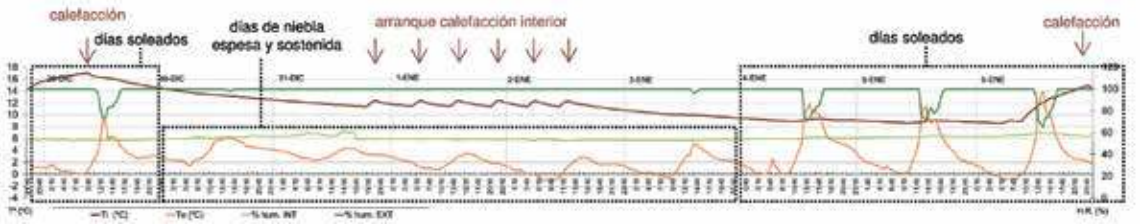

Figura 7. Gráfica de temperaturas y humedad relativa ambiente interior y exterior. (Fuente: la autora).

De los 9 días de datos obtenidos, 4 días corresponden a días soleados, y 5 corresponden a días de niebla espesa (no la niebla, pero sí la nubosidad aparece de forma recurrente en esta época en el clima estudiado[3]); esto supone un porcentaje de días soleados del 44%, lo que resta por debajo de la media para este tiempo, aún así la muestra se considera representativa, dado que está por el lado de la seguridad.

Los días de niebla la humedad relativa se mantiene en el 100%, mientras que durante los períodos de sol de los días soleados ésta desciende hasta el 70%. La humedad relativa interior se mantiene constante entre valores entre 55 y 60%.

Se observa que la temperatura interior se corrige puntualmente mediante el aporte de calefacción el día 29 de diciembre y el 6 de enero, y entre estos dos días se produce un arranque del sistema de calefacción desde la tarde del día 31 hasta el mediodía del día 2, que corrige la temperatura hasta los 11ºC interiores.

Previo a la parametrización, mediante la aplicación de la norma se realiza un análisis gráfico de los datos obtenidos que explica el funcionamiento térmico dinámico del muro.

Desde el interior, en todo el intervalo de tiempo estudiado el flujo es hacia el interior del muro (Figura 8).

El flujo medido por el termofluxómetro exterior (Figura 9) presenta períodos de carga y de descarga, es decir, el flujo cambia de sentido en función de la temperatura exterior. Los períodos de carga del muro desde el exterior siguen, aunque de manera no lineal, las fluctuaciones de la temperatura ambiente exterior.

Esto demuestra que el muro es extremadamente sensible a las variaciones de temperatura exterior, y tiene un comportamiento activo a pesar de no recibir radiación directa, pues se encuentra en orientación norte, incluso los días de niebla.

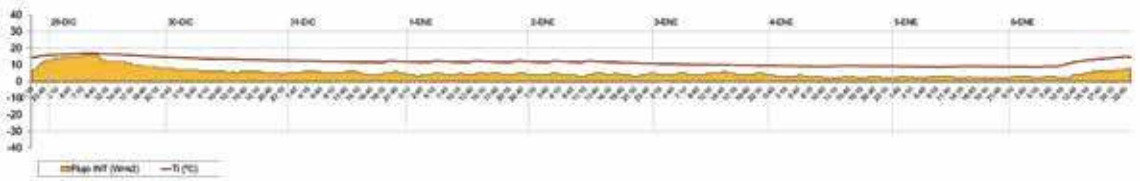

Figura 8. Gráfica flujo interior y temperatura interior. (Fuente: la autora).

[3] En el período estudiado en la localidad de Ayerbe el porcentaje medio del tiempo en que la nubosidad permanece parcialmente constante es de alrededor del 50%. (Fuente: MERRA-2 Modern-Era Retrospective Analysis de NASA).

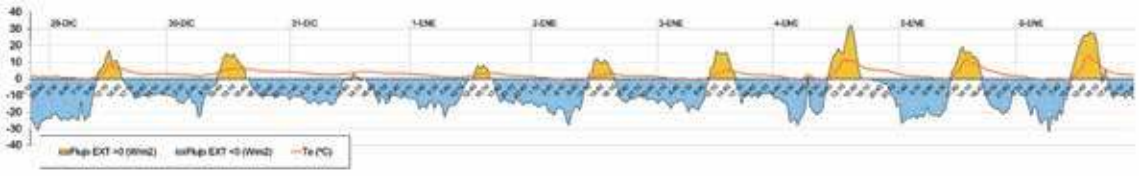

Figura 9. Gráfica flujo exterior y temperatura exterior. (Fuente: la autora).

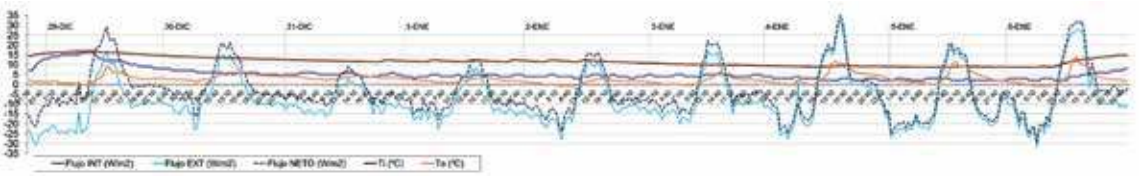

Figura 10. Gráfica temperaturas ambiente y flujo interior y exterior, así como flujo neto. (Fuente: la autora).

Con el fin de poder parametrizar el balance térmico, teniendo en cuenta el comportamiento activo tanto desde la cara interior como desde la cara exterior del muro, se calcula el valor de flujo neto (Figura 10).

La media de flujo neto del período estudiado es de 2,96 W/m2, lo que supone que atraviesan en sentido hacia el exterior 2,96 W por metro cuadrado de muro. Este valor no es de utilidad para el cálculo de la transmitancia, pues no se han despreciado los tramos de temperatura en el que el diferencial de Ti y Te es mayor que 10ºC, pero nos da un orden de magnitud del flujo que atraviesa el muro y nos indica el sentido de este flujo.

Analizado por tramos diarios, en función de las condiciones del clima, y distinguiendo un tramo con niebla de un tramo soleado, se observa que los días de niebla tienen un comportamiento similar entre sí, dado que la temperatura exterior es poco extrema.

Se analizan dos días de niebla consecutivos, en este caso días 1 y 2 de enero (Figura 11). De este análisis se deduce que en un día de niebla el tramo de recarga corresponde a 7 horas, y el tramo de descarga se sostiene durante 17 horas, es decir, existe una relación de 1 a 3. Este período de descarga se divide en dos tramos, primero se observa una descarga de inclinación

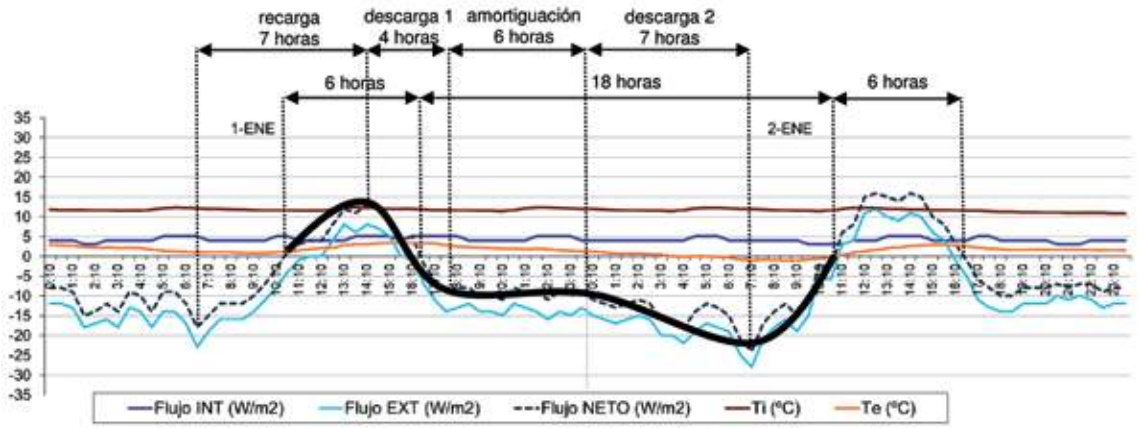

Figura 11. Gráfica temperaturas ambiente y flujo interior y exterior, así como flujo neto del tramo de dos días de niebla consecutivos, en este caso días 1 y 2 de enero. (Fuente: la autora).

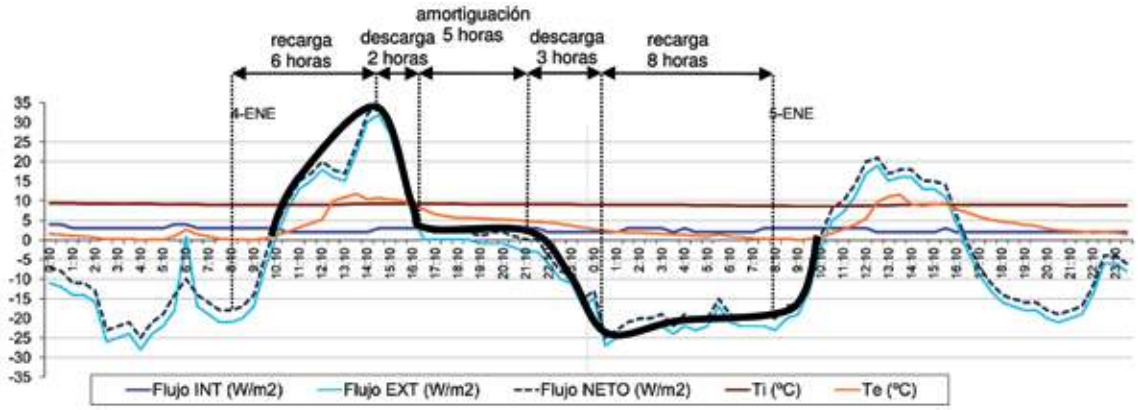

Figura 12. Gráfica temperaturas ambiente y flujo interior y exterior, así como flujo neto del tramo de un día soleado, en este caso el día 4 de enero. (Fuente: la autora).

prácticamente simétrica a la recarga de 4 horas, para a continuación entrar en un tramo de estabilización donde la descarga se sostiene horizontal, que corresponde a un período de amortiguación de 6 horas. Finalmente le sigue un período de descarga de inclinación más atenuada de 7 horas.

En un día soleado la dinámica responde a un patrón más complejo. Se inicia con un tramo de recarga de 6 horas, para a continuación pasar a un tramo de descarga de 2 horas, seguido de una amortiguación que sostiene el flujo durante 5 horas, un período de fuerte descarga durante 3 horas, y de un tramo de recarga suave de 8 horas (Figura 12). En total presenta 14 horas de recarga frente a 10 de descarga, es decir, una relación de 1 a 1,4. Esta dinámica se repite los días 29, 4 y 6. El día 5, a pesar de ser un día soleado, la dinámica es distinta pues la recarga durante la mañana es menor y la descarga es sostenida. Aparece un tramo de recarga a partir de 20:00 horas, que culmina a las 23:00, que no se refleja en la gráfica de temperatura exterior, lo que hace dudar de los datos de este tramo.

En relación a la interpretación de los datos de transmitancia, los datos que a priori podrían estimarse válidos según los criterios de la ISO 9869-1:2014 tienen una dirección de flujo hacia el interior (día 29), o con una dirección de flujo hacia el exterior (día 30, 1, 2,3 y 6). El valor medio de la transmitancia, según el método de la media corregido de estos tramos, es de 0.8238 W/m2ºK.

A pesar de poder obtener un valor medio, hay varias de las condiciones que no es posible cumplir, dado que la fluctuación de las condiciones exteriores que se ve reflejada en el flujo no permite tener valores con cierta estabilidad.

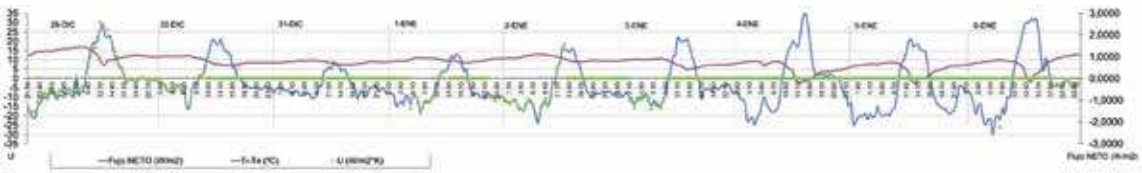

Figura 13. Gráfica balance de temperaturas ambiente, flujo neto y transmitancia térmica de todo el período estudiado. (Fuente: la autora).

La mayoría de datos de transmitancia en períodos de recarga es desestimada (no se cumple la condición de Ti - Te > 10º), así como los datos de los tramos de amortiguación (Figura 13), por ello no se estima representativa la validación de datos que propone la norma.

3. Conclusiones

El método dinámico que propone la norma presenta tal complejidad que se escapa del alcance de las posibilidades del presente estudio. A pesar de que se observa que el comportamiento del muro es dinámico, este método no cuenta con los valores del flujo del muro hacia el exterior, por lo que sería preciso integrar estos datos en la metodología para obtener datos fehacientes del comportamiento térmico del muro.

No está al alcance de este estudio cuantificar si el método dinámico estabilizaría los datos, pero en cualquier caso la dificultad de cumplir la condición de obtener desviaciones de la resistencia térmica (y por tanto de la transmitancia térmica) menores del 5% teniendo en cuenta el flujo que sale del muro, incluso desestimando datos, dificulta sobremanera la puesta en práctica de la metodología de una medición in situ. Por otro lado, son tan importantes en términos absolutos los tramos de carga del muro que, no tenerlos en cuenta, desvía significativamente la realidad del comportamiento térmico del muro respecto al valor absoluto obtenido.

La vulnerabilidad del flujo respecto al ambiente exterior nos lleva a buscar no tanto un dato estacionario de transmitancia, sino un dato medio que nos aporte una parametrización del balance de flujo a través del muro, por ejemplo, a lo largo de un ciclo de día noche. Este valor de balance térmico es comparable con el de otros sistemas constructivos, y nos arrojará datos de la "vulnerabilidad térmica" del sistema en caso de que exista.

Un dato estacionario de transmitancia térmica no refleja el comportamiento dinámico del muro.

A pesar de lo anteriormente expuesto, mediante la termofluxometría se ha podido constatar que en el tramo estudiado (invierno cara norte) el muro alterna períodos de carga y de descarga respecto al ambiente exterior. Este comportamiento activo aumenta el potencial térmico del muro, ya que éste tiene capacidad de "aprovechar" la energía del exterior incluso en una orientación norte sin asoleo directo.

Se hace necesario revisar la metodología para la obtención y la interpretación de datos estacionarios de transmitancia térmica de muros de gran inercia térmica y en climas cálidos secos (con contraste de temperatura día y noche), mediante la toma in situ de los datos de temperatura y flujo y mediante termofluxometría.

A pesar de lo anterior y dado que es preciso justificar valores de transmitancia para la puesta en obra de los sistemas constructivos de tapia, de los datos obtenidos se concluye que 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/m2K. Este rango no se corrige respecto a la investigación anterior dado que la metodología invalida los datos de los períodos de carga. A pesar de ello, y 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/m2K), 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.

Bibliografía

Arnold, P.J. (1969). Thermal conductivity of masonry materials. *The Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers*, 37, pp. 101-108,11.

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

Código Técnico de la Edificación, España. Real Decreto 314/2006 y sus modificados, Documento Básico de Eficiencia Energética (CTE DB-HE).

Heathcote, K. (2011). The Thermal Performance of Earth Buildings. *Informes de la construcción*, 63 (523), 2011, pp. 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)

Minke, G. (2013). *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture.* Birkhäuser Verlag GmbH, Basel.

Volhard, F. (2016). *Light Earth Building*. Birkhäuser Verlag GmbH, Basel.

Walker, P.; Teable, R.; Martin, J.; Maniatidis, V. (2005). *Rammed Earth, Design and construction guidelines*. Ed. BRE Bookshop.

Gremium©| Volume 7 | Issue 14 | August-December 2020 | ISSN: 2007-8773 | Mexico City | CC BY-NC-SA
This article is an open access publication | Retrieved from https://editorialrestauro.com.mx/gremium/

Gremium