



CARACTERIZACIÓN DE UNA NUEVA TÉCNICA DE TAPIA CALICOSTRADA CON COSTRAS DE MORTERO ALIGERADO

Àngels Castellarnau Visús

Edra arquitectura km0, Red Iberoamericana PROTERRA, angels@edraculturaynaturaynatura.com

Palabras clave: tapia calicostrada, comportamiento térmico dinámico, parametrización, mortero aligerado, cáñamo

Resumen

Los edificios contemporáneos de tierra en España se someten al Código Técnico de la Edificación, DB-HE relativo a la eficiencia energética de los edificios. La justificación del comportamiento térmico del edificio se base en parámetros de transmitancia. Los muros de tierra, de gran inercia térmica, tienen un comportamiento dinámico lo que penaliza sus virtudes de cara a la metodología que contempla la norma. El objetivo del presente artículo es desarrollar la tecnología de un nuevo sistema de muros de tapia calicostrada basado en la implementación de costras de mortero aligerado en la cara exterior del muro y describir la implementación de este nuevo sistema de muro en un edificio de uso de Hotel construido en la provincia de Teruel, en España. Así mismo, se parametriza su comportamiento térmico activo mediante la termofluxometría con el objeto de compararlo con otros muros de tapia estudiados. Se describen los parámetros a tener en cuenta para caracterización de las mezclas. Se implementa un método de caracterización del comportamiento térmico dinámico basado en termofluxometría desarrollado en investigaciones anteriores que permite comparar los parámetros obtenidos con los previstos en la norma. 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 detallan las limitaciones observadas del sistema en cuanto a la ejecución de los muros y la fase de secado y entrada en carga. De la monitorización del comportamiento térmico dinámico del muro realizada en fachada sur-oeste se detalla la potencialidad del sistema de los períodos de recarga del muro frente a los períodos de descarga haciendo el sistema muy interesante debido precisamente a su comportamiento activo.

1 INTRODUCCIÓN

La técnica tradicional de la tapia calicostrada consiste en la ejecución de muros de tapia introduciendo en el momento previo al vertido de cada tongada de tierra una capa de mortero ya sea de tierra, ya sea de cal en los moldes de encofrado. Posteriormente se vierte la tierra y se apisona. El mortero al aprisionarse contra el tablero y percolar en el cuerpo de tierra consigue una adherencia importante minimizando el riesgo de desprenderse a lo largo del tiempo.

Esta técnica es muy utilizada en la construcción tradicional de tapias a lo largo del territorio español, observándose principalmente en edificaciones militares o de cierta envergadura. Dado el elevado coste de la obtención de la cal y dada la mayor complejidad de la ejecución de los muros.

Con el objeto de mejorar el comportamiento térmico del muro se desarrolla un nuevo sistema de tapia calicostrada con la costra exterior de mortero aligerado. Se formulan morteros que puedan proveer al muro de mejora en su transmitancia global y se desarrolla la técnica de ejecución del muro. El hecho de adosar una capa gruesa de mortero aligerado en el exterior del muro permite mantener la inercia térmica en la cara interior optimizando el comportamiento térmico del conjunto.

El contexto de los ensayos es una obra donde que se pretende implementar la técnica desarrollada y su protocolo de control de ejecución. Es por ello que se prescriben mediciones *in situ* que permiten obtener datos de lo realmente ejecutado y no únicamente simulaciones en probetas. Esto conlleva una serie de consideraciones específicas en cuanto

a los ensayos de medición *in situ* y a la elaboración de las muestras por parte del constructor a ensayar en laboratorio. Así mismo las mediciones del comportamiento térmico *in situ* se someten a las condiciones ambientales y al régimen de uso y calefacción real del edificio.

2 MARCO TEÓRICO

Tras la caracterización mediante la aplicación de la metodología de la termofluxometría que prescribe la norma de referencia ISO 9869-1 (2014) del comportamiento térmico de un muro de tapia calicostrada situado en orientación norte de una vivienda ubicada en Ayerbe (Huesca), pre Pirineo Español, desarrollada por Castellarnau (2019), y la posterior corrección metodológica añadiendo un segundo sensor de medición de flujo que permita obtener datos del flujo de calor hacia el exterior (Castellarnau, 2020). Se concluye que el flujo de calor a través de los muros de gran inercia térmica es altamente vulnerable a las condiciones de temperatura y humedad del ambiente exterior. Así mismo se ha podido constatar este tipo de muros alternan períodos de carga y de descarga respecto a este 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.

Para mejorar el comportamiento térmico del muro la autora desarrolla un sistema de a tapia calicostrada que mediante una costra gruesa de mortero aligerado exterior permita corregir la vulnerabilidad del muro respecto a la temperatura ambiente. Este nuevo sistema de muro se implementa en una obra de ampliación de un edificio para Hotel construido entre los años 2019-2020 en el municipio de Monroyo, Teruel, noreste español. La presente investigación caracteriza las mezclas del muro ejecutado y el comportamiento térmico mediante la termofluxometría del muro en un período extremo de invierno.

Para la caracterización física y mecánica del muro ejecutado se hacen ensayos que determinan la densidad aparente y la resistencia mecánica tanto del cuerpo de tierra (y paja) como del mortero aligerado de las costras. Se realiza ensayo de compactación con Proctor modificado (UNE 103501, 1994) de la mezcla de tierra utilizada. La densidad y la humedad del cuerpo del muro se miden *in situ* en partes del muro con diferentes edades de secado por el método isótopos radiactivos y en las probetas ensayadas en laboratorio también a diferentes edades de secado. El método de isótopos radiactivos es un ensayo no destructivo que permite la obtención de la densidad aparente de un muro ejecutado. Las probetas tanto ejecutadas como extraídas de los muros ejecutados se someten a rotura según UNE 103400 (1993).

La densidad del mortero aligerado se ensaya mediante método de balanza hidrostática según UNE 103301 (1994). Y se ensaya su resistencia a compresión según UNE 83304 (1984) y su resistencia a flexo-tracción según UNE 83306 (1985).

Para la caracterización del comportamiento térmico se toman en cuenta valores de transmitancia de diferentes fuentes.

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 0.60 m, cuenta con una conductividad de 1 W/mK y una transmitancia térmica (U) de $1.282 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Minke (2013) 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 0.60 m tiene una transmitancia de $1.2321 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Arnold (1969), para un muro de la misma densidad y un contenido de humedad del 5%, tal y como refleja Hearthcote (2011) en una tabla que relaciona densidad y conductividad, establece una conductividad de 0.94 W/mK . A partir de este dato, un muro de 0.60 m tiene una transmitancia de $1.222 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Walker et al. (2005) y Bauluz y Bárcena (1992), para muros de tierra contruidos 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 60 cm una transmitancia de entre 0.84 y 1.801 W/m²K según la densidad. Estos mismos autores establecen para un muro de bloque de tierra comprimida de densidad de 1700 kg/m³, una conductividad de 0.81 W/mK lo que supone una transmitancia (U) de 1.086 W/m²K para un muro de 60 cm.

Tanto la normativa como la bibliografía de referencia marca un orden de valores para la transmitancia térmica de un muro de tapia de 0.60 m mayor que 1.2 W/m²K.

Castellarnau (2020) establece para un muro de tapia calicostrada de densidad del cuerpo del muro de 1800 kg/m³ 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). Que para un muro de 60 cm equivaldría a valores de transmitancia entre 0.918 y 1.27 W/m²K.

El nuevo sistema de tapia calicostrada con morteros aligerados pretende mejorar estos valores de transmitancia térmica si comprometer el potencial de térmico del muro que le aportan los períodos de carga /descarga.

3 OBJETIVO

El objetivo del presente artículo es comprender y parametrizar los muros de un edificio construido en una nueva técnica de tapia calicostrada con mortero aligerado desarrollada por la autora.

Esta caracterización pretende en concreto por un lado obtener datos fehacientes de su densidad, humedad, resistencia a compresión y transmitancia térmica, el retardo térmico y su comportamiento activo. Y por otro lado testar tanto 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, como testar la metodología de control de mezclas a pie de obra.

4 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Para la caracterización del nuevo sistema, dado que no se cuenta con datos de transmitancia comparables, se decide tomaren cuenta, a modo de dato previo y de cara a comparar los valores obtenidos en el transcurso de la investigación desarrollada en el presente artículo, la transmitancia que resulta de tomar en cuenta un muro de tapia de densidad 1850 kg/m³ con un sendas capas de mortero aligerado de densidad 600 kg/m³ la interior de 2 cm y la exterior de 8 cm.

4.1 Características físicas y mecánicas

Para la caracterización física y mecánica del muro ejecutado se hacen ensayos que determinan la densidad aparente y la resistencia mecánica tanto del cuerpo de tierra (y paja) como del mortero aligerado de las costras.

Se realiza ensayo de compactación con Proctor modificado según UNE 103501 (1994) de la mezcla de tierra utilizada.

La densidad y la humedad del cuerpo del muro se miden *in situ* en partes del muro diferentes edades de secado de 1 día y de 48 días, mediante ensayo de control de compactación por el método isótopos radiactivos según ASTM D2922 (2005) y ANSI/ASTM D3017 (2005).

Se realizan probetas a pie de obra de tamaño 30x30x30 cm y se ensayan a rotura según UNE 103400 (1993), 1 serie 4 probetas de 7 días de edad, 1 serie 4 probetas de 14 días de edad ,1 serie de 2 probetas de 24 días de edad, 1 serie 4 probetas de 60 días de edad.

Se extrae una serie de 3 muestras en muro existente de edad de 143 días de tamaño 30x30x30 cm y se ensaya a rotura según UNE 103400 (1993).

Se realizan ensayos que determinan la densidad aparente sobre las mismas probetas antes de romperlas mediante cálculo volumétrico y peso. Así mismo se ensaya el contenido de humedad de las probetas antes de proceder a su rotura para el ensayo de compresión.

La densidad del mortero aligerado se ensaya mediante método de balanza hidrostática según UNE 103301 (1994). Y su resistencia a compresión mediante rotura según UNE 83304 (1984) de 1 serie de 4 probetas cilíndricas de 120 días de edad y su resistencia a flexotracción mediante rotura según UNE 83306 (1985) de 1 serie de 2 probetas prismáticas de 120 días de edad.

4.2 Características del comportamiento térmico

La monitorización *in situ* del muro se realiza según las indicaciones del método de la media corregido especificado en la ISO 9869-1 (2014).

Los instrumentos de medida utilizados para llevar a cabo la toma de datos en el muro consiste en:

- Dos unidades de registrador data logger con sensor externo de temperatura colocados uno en la cara exterior del muro y otro en la cara interior de muro.
- Dos unidades de termo higrómetro colocados uno en el interior de la estancia y otro en el exterior.
- Dos unidades de registrador data logger con termo fluxómetro colocado uno en la superficie interior del cerramiento (sensor de flujo y temperatura) y otro en la superficie exterior del cerramiento (sensor de flujo y temperatura).
- Una cámara termográfica

Se colocan los aparatos de medida según las indicaciones de la norma instalando además (no lo exige la norma) un termo fluxómetro en la cara exterior del muro.

4.3 Descripción de la técnica y del caso de estudio

La nueva técnica de tapia calicostrada con morteros aligerados consiste, como se ha descrito anteriormente en construir una costra de mortero aligerado a la vez que se levanta el muro, es decir, añadiendo a las tongadas una capa de mortero en los encofrados que tras el apisonado queda completamente adherida al cuerpo del muro. Tras el desencofrado la parte visible del muro de esta costra que actúa de aislamiento exterior con el fin de dotar al conjunto del muro de un mejor comportamiento térmico.

Las características del cuerpo del muro deben soportar las acciones a las que se somete el muro siendo el único papel de la costra de mortero el de dotar aislamiento y protección al cuerpo del muro. A pesar de ello la costra debe ser flexible para absorber las posibles deformaciones del cuerpo del muro para evitar posibles figuraciones al entrar en carga el muro.

Se implementa la técnica en una edificación y se desarrolla un control de ejecución y una medición *in situ* del comportamiento térmico de uno de los muros.

El proyecto en el que se implementa y desarrolla la técnica consiste en la ampliación de un edificio tradicional de mampostería de piedra arenisca. Se levanta un volumen rectangular a lo largo de la fachada noreste de tres plantas con cubierta a un agua y orientaciones sureste, noreste y noroeste.

El uso de estas estancias en planta baja es de baños públicos existiendo una extensión hacia el norte de uso de spa. Y en las plantas superiores el uso es de dormitorios en los extremos y el núcleo de accesos que distribuye los mismos. El uso más representativo de cara a evaluar el comportamiento y en cuanto a las condiciones de confort es el de

dormitorio dado que en estos espacios el comportamiento pasivo del muro incide directamente en el confort del espacio y en el spa se corrige constantemente su ambiente (temperatura y humedad relativa) mediante un sistema mecánico de bomba de calor, debido a que es el vaso de agua caliente el que determina principalmente las condiciones ambientales.



Figura 1. Imagen exterior del edificio

4.4 Descripción del sistema y proceso constructivo

El sistema constructivo consiste en un sistema de muro de tapia continuo, de espesor en este caso 60 cm, con una capa exterior de mortero de cal hidráulica aligerado con cáñamo de espesor medio de 8 cm y densidad teórica de 600 kg/m^3 más un cuerpo de tierra con paja con una densidad de teórica de 1850 kg/m^3 más capa interior de 2 cm de la misma mezcla que la exterior.

El acopio de material se realiza a pie de muro, la tierra se mezcla con la paja, eleva y vierte mediante auto-cargadora / elevadora / amasadora horizontal.

El encofrado se resuelve mediante tableros de madera con guías de madera de encofrado re montante y con fleje de acero galvanizado. El apisonado se realiza mediante pisón mecánico.

Se construyen 245 m^3 de muro, a pesar de estar prescrita su ejecución en época de verano-primavera, la ejecución se inicia a principios de octubre de 2018 y se termina a finales de enero de 2019 suponiendo esto un importante perjuicio en el control de humedad de las mezclas, y dificultando el secado de los muros, su puesta en obra y su entrada en carga.

5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Datos obtenidos de los ensayos

Para la caracterización de la densidad y la resistencia a compresión del muro ejecutado, se opta por la caracterización de la densidad del cuerpo de tierra del muro ejecutado y de la del mortero aligerado de las costras.

Para el cuerpo de tierra se realiza un ensayo de Proctor modificado de la mezcla de tierra utilizada que indica que su densidad máxima es de 2200 g/cm^3 y su humedad óptima es de 7,7%.

Se desarrolla un protocolo de control de ejecución en el que intervienen los ensayos de caracterización del muro antes descritos.

Con el objeto de caracterizar la densidad y la resistencia a compresión del cuerpo de tierra (y paja) se prescribe un ensayo de densidad *in situ* por el método isótopos radiactivos. Se ensayan siete puntos en los muros ejecutados. En los cinco puntos ubicados en muros apisonados con edad de 1 día se obtiene una densidad media a 15 cm de profundidad de 1867 kg/m³ con una humedad media de un 12%. En los dos puntos ubicados en muros apisonados con edad de 48 días se obtiene una densidad media a 15 cm de profundidad de 1790kg/m³ con una humedad media de un 9,7%. El ensayo se realiza con fecha de 11 de diciembre de 2018. Hay que tener en cuenta que el dato que arroja este ensayo es la densidad aparente y no la seca.

Así mismo se realizan cuatro series de probetas a pie de obra de tamaño 30x30x30 cm y se ensayan a rotura según UNE 103400 (1993); una serie de cuatro probetas de siete días de edad, una serie cuatro probetas de catorce días de edad, una serie de dos probetas de veinticuatro días de edad y una serie cuatro probetas de sesenta días de edad.

Cabe destacar la poca homogeneidad de las probetas lo que arroja datos no definitivos (tabla 1). De las muestras que se obtuvieron realizadas por la constructora unas se realizan con costra de mortero y otras sin. La humedad de la mezcla en el momento de ensayo es determinante. Las probetas se someten a un proceso de secado natural al aire libre estando por tanto expuestas a las condiciones ambientales lo que complejiza la interpretación de los datos obtenidos al no ser éstos homogéneos.

A pesar de ello es interesante su análisis para mejorar la definición del protocolo de ejecución de las muestras.

En general las muestras para el ensayo de resistencia a compresión de la parte central del muro deben hacerse sin la costra de mortero dato que esta costra imposibilita la medición de la densidad de la muestra y perjudica a los datos obtenidos de compresión.

Los datos obtenidos reflejan la dependencia de la humedad de la muestra más que de la edad, dado que el secado en caso de contar con costra de mortero se ralentiza. Las probetas de 7 días de edad (muestras con código 1, 2, 3 y 4 de la tabla 1) tienen una humedad relativa media de 12,04 %, una densidad media de 1587,75 kg/m³ y reflejan una resistencia a compresión media de 0,21 N/mm².

Tabla 1: Relación las muestras ensayadas, su edad, humedad, densidad y resistencia a compresión

código muestra	edad rotura (días)	humedad óptima (proctor modificado)	humedad zona rotura (%)	densidad seca (gr/cm3)	resistencia a compresión (N/mm2)
1	7	7,7	11,83	1614	0,22
2	7	7,7	12,42	1549	0,22
3	7	7,7	10,11	1588	0,21
4	7	7,7	13,83	1600	0,19
5	14	7,7	9,26	1571	0,3
6	14	7,7	8,53	1523	0,27
7	14	7,7	9,59	1487	0,28
8	14	7,7	11,03	1543	0,34
9	60	7,7	7,89	1460	0,63
10	60	7,7	8,22	1487	0,72
11	60	7,7	7,73	1458	0,69
12	60	7,7	7,58	1449	0,65
13	143	7,7	7,14	1694	1,18
14	143	7,7	7,38	1728	1,29
15	143	7,7	8,05	1780	1,55
16	24	7,7	3,93	2242	1,15
17	24	7,7	4,11	2177	1,12

Las probetas de 14 días de edad (muestras con código 5, 6, 7 y 8 de la tabla 1) cuentan con una humedad media de 9,6%, una densidad media de 1587,75 kg/m³ y una resistencia a compresión media de 0,2975 N/mm².

Las probetas de 60 días de edad (muestras con código 9, 10, 11 y 12 de la tabla 1) cuentan con una humedad media de 7,85% (cercana a la identificada mediante el ensayo de compactación con Proctor modificado), una densidad media de 1463,5 kg/m³ y resistencia a compresión media de 0,6725 N/mm².

Los datos obtenidos de las 3 series descritas de probetas corresponden a probetas realizadas con costra (indefinida) de mortero aligerado. Estos datos no se estiman válidos dado que ni la densidad obtenida caracteriza el cuerpo de tierra al tener las costras que la desvirtúan ni en el ensayo se refleja la resistencia de la muestra dado que el volumen de la muestra efectiva está indefinido como consecuencia de la costra de mortero aligerado. Este grupo de datos es el que aparece señalado en la gráfica de la figura 2.

Se extrae una serie de 3 muestras en muro existente de edad de 143 días (muestras con código 13, 14 y 15 de la tabla 1) de tamaño 30x30x30 cm y se ensaya a rotura según UNE 103400 (1993). Las muestras destructivas ensayadas se cortan con una capa de mortero aligerado de 2 cm en una de sus caras por lo que ni la densidad ni la resistencia serán representativas. Estas probetas de 143 días de edad cuentan con una humedad media de 7,52% (cercana a la identificada mediante el ensayo de compactación con Proctor modificado), una densidad media de 1734 kg/m³ y resistencia a compresión media de 1,34 N/mm². Se observa que a medida que la densidad se acerca a la de referencia la resistencia a compresión aumenta como en el caso de la probeta de 143 días con humedad del 7,38%, densidad de 1780 kg/m³ su resistencia a compresión media es de 1,55 N/mm² (a pesar de contar con la costra de mortero).

Se realizan probetas sin costra (muestras con código 16 y 17 de la tabla 1) al detectar este problema. Éstas sometidas a ensayo de rotura con 24 días de edad cuentan con una humedad media de 4,02%, una densidad media de 2209 kg/m³ y resistencia a compresión media de 1,135 N/mm².

Se dan como válidos los datos de esta última serie a la espera de obtener datos más rigurosos en futuras investigaciones, pero se pone en cuestión el sistema de elaboración de las probetas a pie de obra que debe realizarse con una metodología suficientemente rigurosa para que refleje la humedad y la densidad (controlando la compactación y las capas). En la figura 2 se observa la dispersión de estos datos.

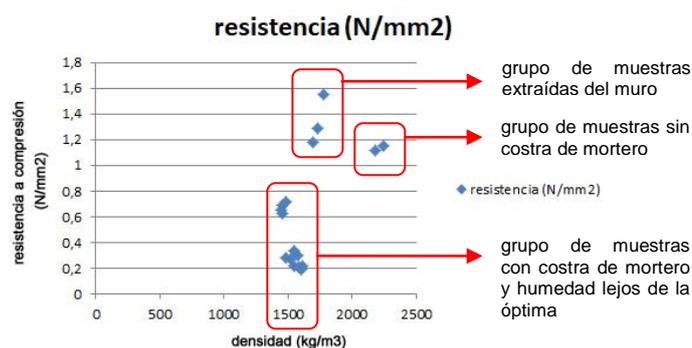


Figura 2. Gráfica de la dispersión de la relación de resistencia a compresión y densidad

En cuanto a los ensayos de densidad, rotura y flexo tracción del mortero aligerado, se realizan probetas prismáticas de mortero aligerado que se someten a ensayo de rotura a flexo tracción y así como ensayo de densidad seca del mortero aligerado mediante el método de la balanza hidrostática.

El mortero cuenta con una densidad seca media de 633,75 kg/m³ según método de la balanza hidrostática.

Las probetas cilíndricas se someten a ensayo de rotura a los 120 días de edad, cuentan con una densidad media de $509,25 \text{ kg/m}^3$ y una resistencia a compresión media de $0,3175 \text{ N/mm}^2$.

Las probetas prismáticas que se someten a flexo tracción a la edad de 120 días cuentan con una densidad media de 548 kg/m^3 y una resistencia a flexo tracción media de $0,166 \text{ MPa}$.

5.2 Comportamiento térmico del muro

El período estudiado corresponde a un período sin actividad del establecimiento, comprendido entre el día 24 de enero del año 2019 y el 6 de diciembre del año 2020. En este período invernal se suceden tradicionalmente días de frío extremo y nubosidad por lo que se considera uno de los momentos con climatología más adversa del año. Se acota históricamente desde la última semana de diciembre a la primera semana de febrero, es decir, corresponde a máximo un mes y medio de invierno con temperaturas más extremas. En este período la lluvia no es abundante aunque la nubosidad es recurrente. Se pretende analizar los datos en estas condiciones con el objeto de estudiar los límites del nuevo sistema constructivo.

El establecimiento hotelero ha tenido un período de actividad en los meses de verano para posteriormente permanecer cerrado por lo que la calefacción no ha estado en marcha a lo largo del otoño. Al no estar en uso durante el período de monitorización no se cuenta con la incidencia del sistema de calefacción lo que permitiría contar con extremos más estables de temperatura; además la estancia en la que se colocan los instrumento de medición, que corresponde a un dormitorio, se oscurece mediante los elementos de oscurecimiento (contraventanas interiores y cortinajes) con el fin de evitar las ganancias térmicas a través de los huecos limitando así la influencia de éstas sobre los datos obtenidos en el muro.

En el tramo de días estudiado (figura 3), se suceden una serie de días soleados en los que la temperatura exterior oscila entre los 15 y 1°C y la humedad relativa durante las noches aumenta hasta rangos del 90% y durante el día el efecto del sol la hace descender significativamente hasta el 40% . En este período se presupone un asoleo directo sobre el muro por la mañana debido a la orientación sureste del mismo.

A este período de días soleados se sucede otro de días nublados (figura 3) en los que la temperatura exterior se mantiene en torno a los 0°C ascendiendo hasta los 5°C durante el día en los que la humedad relativa no remonta con tanta intensidad durante el día quedando siempre por encima del 75% . En este período la nubosidad anula la captación solar directa del muro.



Figura 3. Gráfica temperaturas y humedad relativa ambiente interior y exterior

Se analizan estos dos tramos diferenciados debido al distinto comportamiento dinámico del muro en cada uno de ellos.

Se obtienen datos del par de sensores de flujo, un par de termómetros que miden temperaturas superficiales interior y exterior y los datos de temperatura exterior y humedad

relativa de una estación meteorológica cercana (embalse de la Pena a 8,5 km) en el período de estudio.

Los sensores de flujo de calor que permiten la medición in situ del flujo de calor que acaece en el muro sin requerir el valor conocido de la resistencia térmica o la conductividad. El medidor convierte la diferencia de temperaturas a voltaje eléctrico. Para el presente análisis se instalan uno en el exterior del muro que mide el flujo que entra o sale del muro hacia el exterior y un termómetro que mide la temperatura superficial exterior. Así mismo se instala un termoflujómetro en el interior del muro, que mide el flujo de calor que entra o sale hacia el interior del muro desde el espacio interior, junto con un termómetro que mide la temperatura superficial interior. La ubicación de los sensores se decide en función de la accesibilidad a los equipos y se comprueba mediante la termografía que no existen discontinuidades o elementos de borde que alteren las mediciones.

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 dado que la aplicación de la norma no refleja este comportamiento (Cartellarnau, 2020).

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. Se observa que debido a que el muro no ha recibido calefacción en ningún momento el flujo hacia el interior es muy sensible a las condiciones exteriores dado que la inercia térmica del muro no recibe aportes internos y sólo se activa mediante el asoleo que recibe el muro por encontrarse expuesto a orientación sureste.

El flujo de temperatura que incide en el muro es prácticamente equivalente al flujo que entra en el interior del espacio y en el período estudiado es en todo momento positivo hacia el interior del espacio. Esto permite deducir que el muro en una orientación favorable consigue aprovechar toda la energía que incide sobre él pero tiene la inercia y el aislamiento suficiente para no perder este calor cuando desciende la temperatura exterior.

En el gráfico de la figura 4 se observa que:

- Los flujos exterior (hacia el interior del muro) e interior (hacia el interior del espacio) prácticamente simétricos lo que representa que son iguales dado que aparecen en el gráfico con signo contrario.
- En todo momento el flujo en dirección hacia el interior del edificio es positivo, es decir en todo momento hay ganancias a través del muro hacia el interior del edificio, incluso en periodos en que la temperatura exterior desciende bajo los 0°C. esto se debe a la inercia térmica del muro y a la resistencia que ofrece la costra del mortero aligerado.
- La dinámica del flujo desde el exterior hacia el interior del muro y a su vez el del interior del muro hacia el interior del espacio es cíclica, el flujo hacia el interior del espacio. La ganancia de temperatura hacia el interior tiene un ritmo constante que refleja un aumento en los tramos horarios de la mañana tanto en días soleados como en los nublados, seguida de un período de descarga y otro de amortiguación.
- El reflejo de este acceso de calor hacia el interior también se refleja en las lecturas de la temperatura interior que recoge esta dinámica de ganancia tanto en los días soleados como en los días nublados. La temperatura interior se sostiene entre de los 18 y los 15°C los días soleados (merece la pena recordar que la captación solar pasiva a través de los huecos se ha anulado para el análisis) y entre los 15 y los 13°C en los días nublados.
- La transmitancia térmica corregida ($U_{\text{corregida}}$) calculada según la ISO 9869-1:2014 cuenta con valores válidos en que coinciden con los períodos de amortiguación. Los datos de los períodos de recarga y descarga no son válidos según la metodología que marca la norma y por ello en la gráfica se llevan a 0.

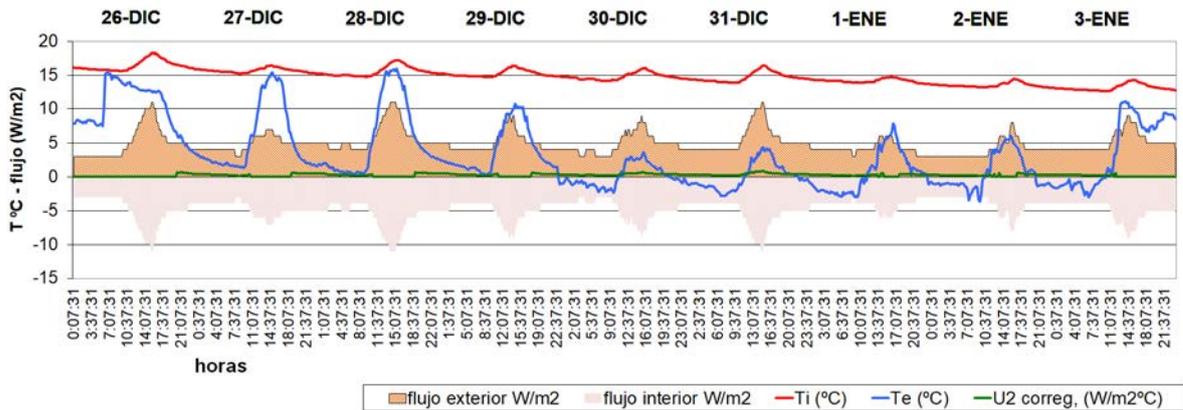


Figura 4. Gráfica temperaturas interior y exterior, flujo desde el exterior hacia el interior del muro, flujo hacia el interior del espacio del período que comprende los dos tramos consecutivos de días soleados y días nublados

Con el fin de poder cuantificar esta dinámica de carga-descarga-amortiguación se analizan por separado una serie de dos días del período de días soleados y dos días del período de días nublados. En el tramo de días soleados estudiado de los días 27 y 28 de diciembre, (figura 5) se produce una carga sostenida de más de 6 horas de las 9 de la mañana a las 14 horas, para a continuación sucederse una descarga de 3 horas. El flujo se estabiliza a lo largo de un período de amortiguación de 8,5 horas para a continuación descender ligeramente y volver a estabilizarse hasta que se inicia de nuevo el ciclo de carga hacia las 9 de la mañana.

El valor de la transmitancia corregido no aparece en la gráfica porque los datos de este período al no haber un contraste de $T_i - T_e > 10^{\circ}C$ la metodología que prescribe al ISO 9869 los desestima.

En el período de los días nublados, 2 y 3 de enero, se repite la dinámica de carga que transcurre durante 5,5 horas, seguido de un período de descarga de 2 horas y seguido a su vez de un período de amortiguación de 17 horas.

A partir de los datos obtenidos mediante los sensores se obtiene la transmitancia siguiendo el método de medición *in situ* prescrito por la ISO 9869-1 (2014). Para ello se detecta el período en el que se sostienen las condiciones que prescribe la norma.

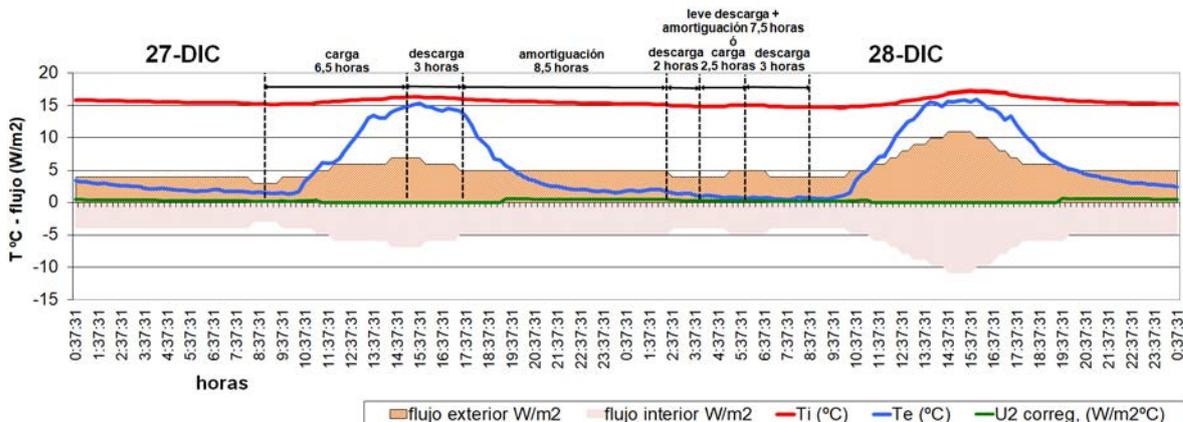


Figura 5. Gráfica temperaturas interior y exterior flujo hacia el interior del muro desde el exterior y hacia el interior del espacio

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:

- 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 de un 28% o incluso por encima en función de las circunstancias del ensayo (apartado 9).

La mayoría de datos de transmitancia en períodos de recarga es desestimada (no se cumple la condición de $T_i - T_e > 10^\circ$) así como los datos de los tramos de amortiguación (figura 6), por ello no se estima representativa la validación de datos que propone la norma dado que los datos de los tramos inválidos (que en la figura 5 se llevan a 0) mejorarían sustancialmente los valores medios de transmitancia. A pesar de ello el valor medio la transmitancia según el método de la media corregido recogiendo los datos válidos según los criterios que establece la ISO 9869-1 (2014) de todo el período del 26 de diciembre al 3 de enero es de $0.3405 \text{ W/m}^2\text{K}$. Este dato mejora significativamente a los obtenidos en estudios de muros (no expuestos a asoleo) y que no cuentan con costras de mortero aligerado ($0.8238 \text{ W/m}^2\text{K}$, Castellarnau 2020).

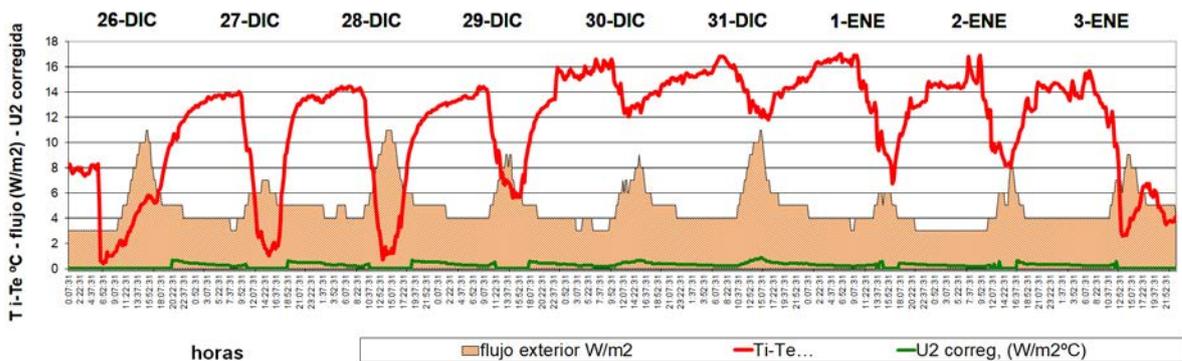


Figura 6. Gráfica Balance temperatura interior y exterior, flujo hacia el interior del muro desde el exterior y U corregida, en el periodo estudiado del 26 de diciembre al 3 de enero.

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. Se estima necesario redundar en el ensayo del comportamiento térmico de muros construidos con este nuevo sistema constructivo en orientaciones sin asoleo, así como muros expuestos a ganancias internas sostenidas que permitan contar con mayor cantidad de valores validados que la metodología valide y con cierta estabilidad.

6 CONSIDERACIONES FINALES

La nueva técnica constructiva de tapia calicostrada supone una mejora tecnológica para las construcciones en tierra, resuelve la problemática del aislamiento térmico de estos sistemas manteniendo la capacidad del muro de almacenar calor. Pudiéndose obtener datos de transmitancia muy competitivos respecto a los sistemas constructivos basados en el súper aislamiento.

La metodología de control de mezclas debe poner especial cuidado en la elaboración de las mezclas (tanto del cuerpo de tierra como de la costra de mortero aligerado) que debe ser rigurosa y representativa para conseguir muestras de densidad y humedad que correspondan con el muro ejecutado.

Se estima necesario el desarrollo de mayor cantidad de muestras para poder obtener datos rigurosos que puedan ser representativos.

Respecto al comportamiento térmico del muro, conocidas las limitaciones del sistema de medición *in situ* que prescribe la ISO-9869-1:2014 para los muros de gran inercia térmica y por tanto con comportamiento dinámico, se refleja en el presente estudio el potencial activo del nuevo sistema constructivo a la hora de almacenar el calor que proviene del exterior y el óptimo comportamiento térmico frente al aislamiento y por tanto las pérdidas de calor. Se estima necesario realizar ulteriores ensayos en orientaciones no expuestas, en espesores menores de muro y en condiciones de espacios interiores calefactados para poder obtener los datos característicos significativos del nuevo sistema constructivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arnold, P.J. (1969). Thermal conductivity of masonry materials. The journal of the institution of heating and ventilating engineers. vol. 37, p. 101-108 and 11.

ASTM D 2922 (2005). Standard test methods for density of soil and soil-aggregate in place by nuclear methods (shallow depth). USA: ASTM International

ANSI/ASTM D3017 (2005). Standard test method for water content of soil and rock in place by nuclear methods (shallow depth).

Bauluz, G.; Barcena, P. (1992). Bases para el diseño y construcción con tapial. Ministerio de obras públicas y transportes, Madrid. ISBN 8474338395.

Castellarnau, A. (2019). Caracterización de la transmitancia térmica de un muro de tierra comprimida. In: Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 19. Memorias... San Salvador, El Salvador: FUNDASAL / PROTERRA. p.109-118.

Castellarnau, A. (2020). Caracterización del comportamiento térmico de un muro de tapia mediante la termofluxometría. Revista Gremium, 7(14), 169–184. Recuperado a partir de <https://editorialrestauro.com.mx/gremium/index.php/gremium/article/view/135>

Código Técnico de la Edificación, España. Real decreto 314/2006 y sus modificados, documento básico de eficiencia energética (CTE DB-HE).

DIN 4108-4 (2020). Thermal insulation and energy economy in buildings - Part 4: Hygrothermal design values. Germany: Deutsches Institut Fur Normung

Heathcote, K (2011). The thermal performance of earth buildings. Informes de la construcción. 2011. vol. 63, nº. 523, 2011, p. 117-126. ISSN 0020-0883.

ISO 9869-1 (2014) Thermal insulation – building elements – in-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – part 1: heat flow meter method. International Organization for Standardization

Minke, G. (2013). Building with earth: design and technology of a sustainable architecture. Birkhäuser Verlag GmbH, Basel. ISBN 978-3-0346-0822-0.

UNE 83304 (1984). Ensayos de hormigón. Rotura por compresión. España: Normalización Española.

UNE 83306 (1985). Ensayos de hormigón. Rotura por tracción indirecta. (Ensayo brasileño). España: Normalización Española.

UNE 103301 (1994). Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática. España: Normalización Española.

UNE 103400 (1993). Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo. España: Normalización Española.

UNE 103501 (1994). Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor modificado. España: Normalización Española.

Volhard, F. (2016). Light earth building. Birkhäuser Verlag GmbH, Basel. ISBN 978-3-0356-0634-8.

Walker, P.; Keable, R.; Martin, J.; Maniatidis, V. (2005). Rammed earth, design and construction guidelines. ed. BRE Bookshop. ISBN 1-86081-734-3.

AUTORA

Àngels Castellarnau Visús, arquitecta por la UPC (Universitat Politècnica 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 en tierra y con material local y la gestión de recursos naturales en el territorio. Fundadora del estudio Edra Arquitectura km0. Miembro de la red PROTERRA. Cofundadora de la plataforma Made in tierra Spain.