

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO DE PARED EN ZONA ALTOANDINA UTILIZANDO UN MÓDULO EXPERIMENTAL

EVALUATION OF THERMAL BEHAVIOR OF A WALL CONSTRUCTION SYSTEM IN THE HIGH ANDEAN ZONE USING AN EXPERIMENTAL MODULE

Juan Molina-Fuertes ^{1*} , Manfred Horn-Mutschler ¹ , Mónica Gómez-León ¹ 

¹Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido (Received): 12 / 03 / 2024 Aceptado (Accepted): 20 / 12 / 2024

RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo evaluar el comportamiento térmico de un sistema constructivo de pared de ladrillo de arcilla roja cocida con cavidades, de uso masivo en las grandes ciudades del Perú, y que en la actualidad se está masificando en zonas altoandinas sin haber sido evaluado en climas de heladas. Por consiguiente, se ha llevado a cabo la construcción de un módulo experimental a escala real a 4500 msnm. La experimentación realizada durante 49 días evidencia que el retraso térmico es de 4 h y el factor de decremento de 0,27, siendo el promedio horario diario de la amplitud térmica interior de 6,4 °C y exterior de 17,1 °C. Asimismo, el estudio numérico, mediante el uso del software *EnergyPlus* y la implementación del modelo equivalente de conjunto de capas homogéneas para materiales heterogéneos, que considera de manera dinámica los modos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación, muestra buenas concordancias entre los valores medidos y simulados de la temperatura interior, con índices de R² de 0,87 y RMSE de 0,91.

Palabras Clave: Comportamiento térmico, Módulo experimental, Simulación térmica, *EnergyPlus*, Energía Solar.

ABSTRACT

This article aims to evaluate the thermal behavior of a construction system consisting of fired red clay brick walls with cavities, commonly used in large cities in Peru and increasingly adopted in high-altitude Andean areas without being evaluated for frost climates. Consequently, an experimental module was constructed at a real scale at 4500 masl. The experimentation carried out over 49 days shows that the thermal delay and decrement factor are 4 hours and 0.27, respectively, with the daily hourly average thermal amplitude indoors being 6.4°C and outdoors being 17.1°C. Additionally, the numerical study using *EnergyPlus* software and the implementation of the equivalent model of a set of homogeneous layers for heterogeneous materials, which dynamically considers the heat transfer modes by conduction, convection, and radiation, achieve good agreements of the indoor temperature between the measured and simulated values with R² indices of 0.87 and RMSE of 0.91, validating the experimental module model.

Keywords: Thermal behavior, Experimental module, Thermal simulation, *EnergyPlus*, Solar Energy.

1. INTRODUCCIÓN

Es sabido que la calidad térmica en el interior de las viviendas está en gran medida determinada por la configuración de los materiales que conforman los elementos constructivos de la envolvente. La calidad del ambiente interior es uno de los principales problemas de salud en el mundo, ya que las personas pasan entre el 80 % y el 90 % de su tiempo en casa o en otros ambientes públicos interiores [1]. Esto no es una excepción en las zonas altoandinas, donde,

debido a las bajas temperaturas y heladas, las viviendas se convierten en el principal escudo para mitigar sus efectos, especialmente durante la madrugada, cuando duermen.

En estas zonas, se está perdiendo la costumbre de construir paredes de alta masa térmica utilizando adobe, sillar o piedra, de buen comportamiento térmico en climas fríos, ya que atenúan las altas oscilaciones térmicas del aire exterior con tiempos de retraso de la onda térmica entre el interior y el

¹ * Autor de correspondencia:
E-mail: jomolina@uni.edu.pe

exterior de más 9 h e incluso hasta de 14,5 h, como es el caso del adobe [2], [3]. Alcanzando incluso la temperatura promedio interior de 11,3 °C, tal como se reporta en un caso de estudio de simulación con *EnergyPlus* del mismo diseño del módulo propuesto [4]. Actualmente, se está masificando el uso de materiales ligeros como el ladrillo con cavidades (de uso masivo en las grandes ciudades y a bajas altitudes), desconociendo su comportamiento térmico como sistema constructivo ante las bajas temperaturas de estas zonas.

Si bien es cierto que localmente existe una gran variedad de estudios que se centran en evaluar el desempeño térmico interior de una vivienda, especialmente en zonas altoandinas [5], muchas de ellos consideran como indicador, solo la medición de la temperatura interior. La evaluación del comportamiento térmico de los sistemas constructivos que forman la envolvente de las viviendas, especialmente las paredes, aún está en sus primeras etapas. Las paredes son particularmente importantes porque tienen una mayor área expuesta a las condiciones climáticas exteriores, lo que genera una mayor pérdida o ganancia de calor. Esta evaluación busca determinar parámetros clave, como el factor de reducción de temperatura en la superficie exterior, el tiempo de retraso en la respuesta térmica de la pared y la temperatura promedio diaria de la superficie interior, tal como lo considerado por Barrios [6]. Además, de la temperatura interior y el flujo de calor a través del sistema constructivo.

2. ANTECEDENTES

Actualmente, para evaluar el comportamiento térmico de la envolvente de una vivienda o sistema constructivo, se utiliza la simulación computacional como complemento del análisis, validando principalmente los valores de temperatura medida y simulada, y buscando lograr similitud entre ellos. Una de las desventajas de estas herramientas, como es el caso del software *EnergyPlus*, es que no permiten simular sistemas constructivos no homogéneos, como el ladrillo con cavidades. No obstante, existen estudios que, con el fin de salvaguardar este detalle, se basan en un modelo equivalente de conjunto de capas homogéneas, tal como lo ha realizado Huelsz en su modelo 3 de una propuesta de 5 modelos, que incluye los mecanismos de transferencia de calor unidimensional a través de la parte sólida, la convección natural en el aire dentro de las cavidades y la radiación entre las superficies de las cavidades de aire, con el fin de implementarlo en el software [7].

En este contexto, se ha diseñado e implementado un módulo experimental en el centro poblado de Imata para determinar experimentalmente el

comportamiento térmico de un sistema constructivo de pared de ladrillos con cavidades, el cual está masificando como elemento constructivo en zonas altoandinas en la actualidad. El estudio experimental se complementa con la simulación computacional, validando los datos medidos y simulados de una configuración de sistema constructivo no homogéneo a partir de índices de incertidumbre tales como la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2) [8].

3. METODOLOGÍA

3.1 MÓDULO EXPERIMENTAL (ME)

El módulo experimental considerado permite evaluar el comportamiento térmico y dinámico del sistema constructivo expuesto a condiciones atmosféricas reales, en este caso, de zona altoandina, consideraciones que son un tanto difíciles de obtener en un estudio de laboratorio. El diseño del módulo pretende ser un calorímetro en el que se evalúa solo el efecto térmico de la pared, debido a que las demás superficies que componen la envolvente presentan un elevado aislamiento de 0,4 m de espesor de lana de vidrio.

ME está ubicado en el centro poblado de Imata (Lat. 15°55'43" S, Long. 71°06'3" W, 4500 msnm), en el distrito de San Antonio de Chuca, provincia de Caylloma, región Arequipa. La ubicación es idónea para el estudio experimental debido a las considerables fluctuaciones térmicas y la importante radiación solar que presenta esta zona. Antes de la implementación de ME, se llevó a cabo un análisis de diseño, tal como se presenta en [4].

ME tiene forma cúbica, con dimensiones interiores de 2,4 m × 2,4 m × 2,4 m y exterior de 3,2 m × 3,3 m × 3,3 m. La envolvente, que consta de tres paredes, techo y piso, presenta un espesor de 0,4 m de lana de vidrio encajonada con placas OSB (virutas de madera orientadas), de modo que se pueda apreciar un comportamiento adiabático, siendo solo la cuarta pared (orientada al norte) la pared de prueba, lo cual permitirá evaluar su comportamiento como sistema constructivo y efectos térmicos en el interior de ME. Esta pared de prueba (Fig. 1a) está compuesta por ladrillo con cavidades cuyo uso es cada vez mayor en zonas altoandinas. La pared sur presenta una puerta doble (Fig. 1b, vista posterior), separada hacia el interior por 0,5 m de un espacio de aire.



Fig. 1. Módulo experimental, (a) Pared de prueba y (b) posterior del módulo.

3.2 DISEÑO, INSTRUMENTACIÓN Y ETAPA DE MEDIDA

El diseño experimental se muestra en la Fig. 2. Los botones de colores, que se encuentran en el centro de cada superficie y en el centro geométrico del volumen interior, representan la ubicación de los sensores utilizados: verde para medir la temperatura superficial interior de las paredes, piso y techo; anaranjado para medir la temperatura y humedad relativa del aire interior; rojo para medir el flujo de calor; celeste para medir la temperatura superficial exterior; y azul para medir la temperatura del aire exterior. En el lado interior de la pared de prueba se instalaron 5 sensores para medir la temperatura superficial, uno, en el centro de la pared y en línea con el sensor superficial exterior, y los otros cuatro equidistantes a 18 cm del sensor central. Sobre esta misma pared, los sensores de flujo de calor se ubican equidistantes a 15 cm de los sensores de temperatura superficial.

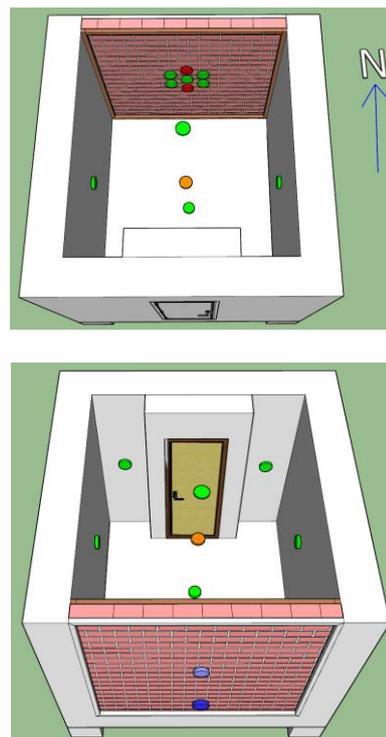


Fig. 2. Ubicación de los sensores (botones de colores): verde para temperatura superficial interior, anaranjado para temperatura del aire interior, rojo para flujo de calor, celeste para temperatura superficial exterior y azul para temperatura exterior del aire.

Los sensores utilizados para medir la temperatura del aire y de la superficie fueron Pt100. En el caso de la temperatura superficial de la pared de prueba (Fig. 3), se incrustaron a 1,5 cm de su superficie, cubriéndolos con restos del propio material. Para la temperatura del aire exterior, el sensor se ubicó al interior de una caja de PVC para evitar la incidencia solar, pero con agujeros que aseguran ventilación natural. Para las demás paredes, techo y piso, los sensores se colocaron sobre la superficie y se protegieron con espuma de poliuretano. Estos sensores se conectan a registradores de datos HOBO. En cuanto a los sensores de flujo de calor, se utilizaron dos del tipo Hukseflux HFP01, que se ubicaron en la superficie interior de la pared de prueba (presentan una menor fluctuación de temperatura) y se colocaron sobre una misma vertical, distanciados 48 cm para verificar sus influencias. En la instalación de estos sensores de flujo, se utilizó film en la interfaz de su superficie con la de la pared de prueba. Estos sensores están conectados a un registrador de datos CR300 Campbell Scientific. Las condiciones ambientales exteriores, tales como la temperatura del aire, la humedad relativa, la irradiancia solar en la superficie horizontal, y la velocidad y dirección del viento, fueron registradas con una estación meteorológica Davis Vantage Pro Plus, instalada a 40 m de ME. La programación del registro de datos se realizó cada 15 minutos desde el 30 de abril hasta el 18 de junio de 2021, período en el que se contó con datos de radiación solar para la simulación del 4 al 18 de junio.

Durante este período, la temperatura del aire exterior experimentó una disminución (hasta -12,4 °C) debido al inicio del invierno y las condiciones climáticas adversas (heladas). Es esencial evaluar el comportamiento térmico del sistema constructivo en relación con estas condiciones climáticas.

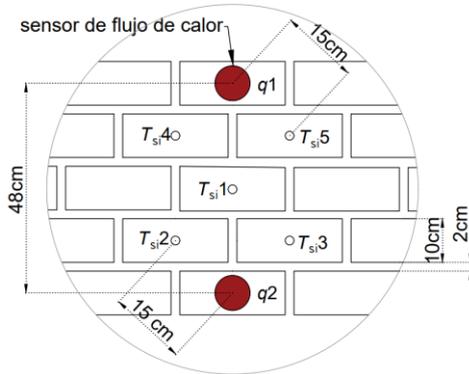


Fig. 3. Esquema de la ubicación de los sensores en el lado interior del sistema constructivo: sensores de temperatura en la superficie interior (T_{si}) y flujo de calor (q).

3.3 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Según [6] los parámetros para evaluar el comportamiento térmico de sistemas constructivos son: el factor de decremento y tiempo de retraso.

El factor de decremento superficial (FD_s) se calcula mediante el cociente entre la amplitud térmica (diferencia entre la temperatura máxima y mínima) de la superficie interior y exterior del sistema constructivo:

$$FD_s = \frac{T_{si,max} - T_{si,min}}{T_{se,max} - T_{se,min}} \quad (1)$$

donde $T_{si,max}$ y $T_{si,min}$ son el máximo y mínimo de la temperatura de la superficie interior durante un día, respectivamente, y $T_{se,max}$ y $T_{se,min}$ son el máximo y mínimo de la temperatura de la superficie exterior, respectivamente.

El tiempo de retraso superficial (TR_s) se define como:

$$TR_s = t(T_{si,max}) - t(T_{se,max}) \quad (2)$$

donde $t(T_{si,max})$ y $t(T_{se,max})$ son la hora del día en que las temperaturas de la superficie interior y exterior alcanzan sus máximos, respectivamente.

Cuanto más pequeños sean los FD_s , mejor será el comportamiento térmico. En general, cuanto más grandes sean los TR_s , mejor será el comportamiento térmico. Para climas fríos, cuanto mayor sea el promedio de la temperatura superficial interior T_{si} , mejor será el comportamiento térmico.

3.4 SIMULACIÓN DE ME CON ENERGYPLUS

La simulación térmica de ME se realiza mediante el programa computacional *EnergyPlus* y sus complementos *SketchUp* (Trimble) y *Euclid* (Big Ladder Software), con el fin de predecir la temperatura interior sin cargas térmicas.

Previo a la simulación, se llevó a cabo el modelamiento de ME, que se inicia con el diseño en 3D de la arquitectura de ME utilizando *SketchUp* y *Euclid*. Este último es un plugin de *SketchUp*, con el cual se crea una zona térmica (volumen de aire encerrado a temperatura uniforme) que representa a ME. Luego, se configuran cada una de las superficies que conforman la envolvente (piso, paredes, techo y puerta). El modelado culmina con la creación de un archivo con extensión IDF, que posteriormente será uno de los dos archivos que solicita *EnergyPlus* para llevar a cabo la simulación. El otro archivo solicitado es del clima del lugar donde se ubica ME y tiene la extensión EPW (*EnergyPlus Weather Format*). La metodología de la simulación es por prueba y error, hasta que los datos simulados (s_i) y medidos (m_i) presenten una buena concordancia, lo cual se evalúa con índices de precisión como el RMSE y R^2 , con las condiciones sugeridas mostradas en la Tabla I (siendo n la cantidad de datos), para la temperatura interior y superficial [8].

Asimismo, las consideraciones para la simulación de ME fueron las siguientes: la temperatura del suelo se utilizó como el promedio mensual de la temperatura del aire exterior, según los registros del SENAMHI [9]. El piso se simuló como una superficie sin exposición al sol y expuesta al viento. Dado que tiene un alto aislamiento, se puede inferir que, esté o no en contacto con el suelo, no sería influyente en el paso del calor. El espacio de aire que se encuentra entre las puertas se simuló como tal. El archivo de clima EPW se generó mediante la plantilla del programa *Elements*, a partir de los datos registrados, calculándose analíticamente a partir de la radiación global horizontal, la radiación difusa y directa, datos sugeridos por este programa.

Las propiedades termofísicas de los materiales utilizados en la simulación de ME, tales como la conductividad térmica (k), la densidad (ρ) y el calor específico (Ce) (Tabla II), se han extraído de la literatura. La placa de virutas de madera tipo OSB y la lana de vidrio provienen de [10]. De [10] también se tomaron las propiedades ópticas del ladrillo, como la absorptancia solar y la emitancia (0,75 y 0,93, respectivamente), y del Cengel para el color blanco aplicado a la superficie exterior del OSB: 0,14 y 0,93, respectivamente [11]. Para el sistema constructivo

de ladrillos a evaluar, las propiedades térmicas se tomaron de la norma EM.110 [12].

3.5 MODELO EQUIVALENTE DE CONJUNTO DE CAPAS HOMOGÉNEAS

Este modelo equivalente, que representa el flujo de calor a través de las paredes de un edificio, se implementa en el software de simulación energética *EnergyPlus*. Para hacerlo, se divide la pared en secciones, de modo que el número de secciones coincida con las rutas del flujo de calor. Cada sección se trata como una superficie independiente, con sus propias características constructivas, lo que permite simular de manera más precisa el comportamiento térmico de las paredes [7], [13]. Con el propósito de simplificar la geometría de las cavidades originales, estas fueron reemplazadas por cavidades rectangulares (con centros alineados) que tienen un área transversal similar. Para ello, se asumió que la suma de las áreas de las nuevas cavidades A'1 + A'2 es igual a A'3 (ver Fig. 4a). Como resultado de este ajuste, las nuevas cavidades en los bordes de la unidad tienen dimensiones de 2,98 cm x 3,25 cm, mientras que las cavidades en el resto de la unidad son de 2,98 cm x 3,00 cm, tal como se ilustra en la Fig. 4b. Esto da como resultado el ladrillo equivalente mostrado en la Fig. 4c, donde la fracción del área sólida homogénea (sin cavidades) es del 23 % (calculado como $2 \times A1 + 4 \times A3 + A5/AT$), y la fracción de área heterogénea, que incluye las capas con cavidades, es del 77 % (calculada como $2 \times A2 + 4 \times A4/AT$), siendo AT el área total de la unidad de albañilería.

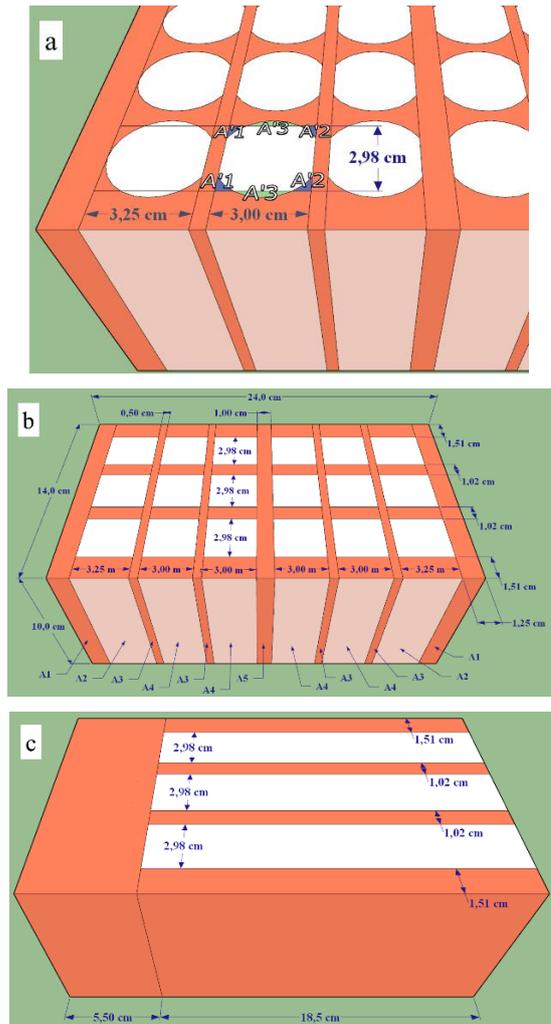


Fig. 4. (a) geometría original de las cavidades, (b) cavidades rectangulares, y (c) esquema equivalente simplificado del ladrillo con cavidades. Elaborado con SketchUp 2017.

TABLA I

Índices de precisión (métricas de comparación). Adaptado de [8].

Índice	Nombre	Formula	Condiciones sugeridas	Ecuaciones
RMSE	Raíz del error cuadrático medio	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n}}$	$\leq 1^\circ\text{C}$	(3)
R ²	Coefficiente de determinación	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}$	R ² > 0,75	(4)

TABLA II

Propiedades térmicas de materiales del módulo experimental [12].

Materiales	k (W/m·K)	ρ (kg/m³)	Ce (J/kg·K)
Placa OSB	0,13	600	1700
Lana de vidrio	0,04	12	840
Bloque de arcilla	0,47	1000	930

4 RESULTADOS

4.1 TEMPERATURA INTERIOR, EXTERIOR Y SUPERFICIES INTERIORES

Para el período de medición comprendido entre el 30 de abril y el 18 de junio de 2021, a pesar

de no estar en la temporada de heladas, la temperatura del aire exterior en la madrugada se encuentra por debajo de 0 °C (Fig. 5a), lo cual es típico de zonas altoandinas durante gran parte del año en horas nocturnas. Las amplitudes térmicas del aire exterior fueron determinadas como la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima

registradas en cada jornada. Los resultados muestran que la temperatura exterior osciló entre 11,9 °C y 23,3 °C durante el período de estudio. Esta variación corresponde a una amplitud térmica diaria promedio de 11,4 °C. Mientras que, en el interior del módulo, las temperaturas oscilaron entre 3,0 °C y 8,8 °C. La amplitud térmica interna promedio fue de 5,8 °C. A diferencia del aire exterior, las oscilaciones térmicas interiores fueron menores, lo que indica una moderación térmica proporcionada por las características del módulo de medición.

La desviación estándar de las amplitudes térmicas exteriores fue de 2,7 °C, mientras que para las interiores fue de 1,3 °C, lo que indica una mayor estabilidad térmica en el interior del módulo.

Asimismo, el promedio de la temperatura interior (T_i) del aire es de 7,1 °C y el de la temperatura exterior (T_e) de 1,2 °C. Esto quiere decir que el ambiente interior es generalmente más cálido que el exterior en 5,9 °C, lo que vendría hacer el aporte del sistema constructivo de ladrillos con cavidades considerando que las demás paredes presentan un elevado aislamiento. También, el promedio mínimo de T_i resultó 3,9 °C y de T_e -6,7 °C, el promedio máximo es 10,4 °C y 10,9 °C, con extremos mínimos de 1,6 °C y -12,4 °C, y extremos máximos de 12,5 °C y 13,3 °C, respectivamente, lo que refuerzan la diferencia en los rangos de temperatura, siendo para T_e un patrón típico de zonas altoandinas con diferencias de temperatura notables entre el día y la noche. El espacio interior tiene una mayor estabilidad térmica debido a que atenúa las temperaturas en su interior, ya que las temperaturas extremas no son tan extremas como las del exterior.

Por otro lado, de la medición de la irradiancia solar del 4 al 18 de junio (Fig. 5b), se obtuvieron valores máximos entre 731 W/m² y 836 W/m². Esto refleja el importante recurso solar en la zona, cuyo promedio para el periodo de medición es de 5,1 kWh/m²·día.

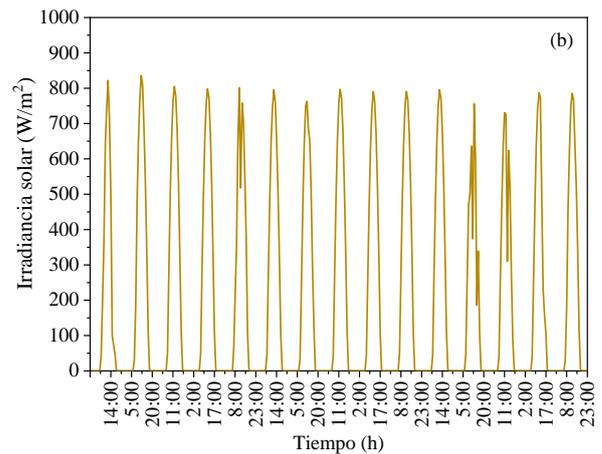
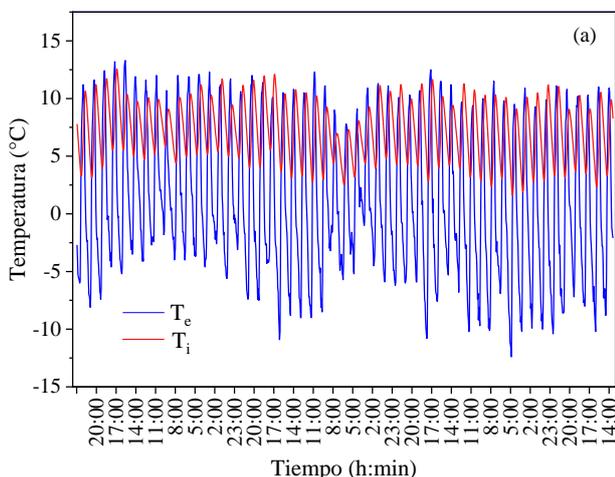


Fig. 5. (a) Temperatura horaria diaria del aire interior (T_i) y exterior (T_e), del 30 de abril al 18 de junio del 2021, y (b) irradiancia solar horaria medida del 4 al 18 de junio del 2021.

Las mediciones de temperatura de la superficie interior (T_{si}) para cinco ladrillos de la pared de prueba, con uno de ellos situado aproximadamente en el centro geométrico (T_{si1} como referencia) de la pared y el resto equidistante 15 cm de este (T_{si2} , T_{si3} , T_{si4} y T_{si5}), mostraron una diferencia máxima promedio respecto de la referencia de 0,18 °C, una mínima de 0,17 °C y un promedio de 0,08 °C. De estos resultados se puede inferir que, para un radio de medida de 15 cm que abarca los lados interiores de distintos ladrillos, la temperatura superficial interior es uniforme. Por lo tanto, para posteriores análisis de la pared, se considerará como valor representativo el promedio ($T_{si,p}$). La Fig. 6 muestra los perfiles del promedio diario horario para cada T_{si} considerada (T'_{si1} , T'_{si2} , T'_{si3} , T'_{si4} y T'_{si5}), además de la temperatura superficial exterior (T'_{se}). En este último caso, los picos presentan distorsiones debido a la sombra proyectada en la pared por la tubería que cuelga frente a la pared de ensayo, donde se ubica un sensor de temperatura, como se aprecia en la Fig. 1a.

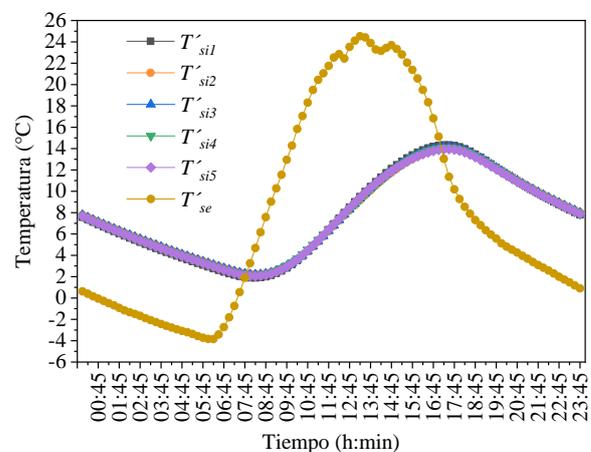


Fig. 6. Temperaturas promedio diario horario en la superficie interior (T'_{si}) de la pared de prueba para cinco puntos de medida con T'_{si1} en el centro geométrico de la pared y los demás (T'_{si2} , T'_{si3} , T'_{si4} y T'_{si5}) en un radio de 15 cm de este.

4.2 FACTOR DE DECREMENTO Y RETRASO TÉRMICO

El promedio horario diario (Fig. 7) de la temperatura del aire interior y exterior (T_i y T_e), y de la superficie interior y exterior de la pared de prueba ($T_{si,p}$ y T_{se}), resultó en: T_i de 7,1 °C, T_e de 1,2 °C, $T_{si,p}$ de 7,7 °C y T_{se} de 7,9 °C. Estos valores de temperatura muestran que, en general, la temperatura superficial de la pared ($T_{si,p}$ y T_{se}) está bastante cerca de las temperaturas del aire interior y exterior. Sin embargo, la diferencia entre T_i y $T_{si,p}$, así como entre T_e y T_{se} , indica que la pared está interactuando activamente con el aire interior y exterior, proporcionando un cambio en las condiciones térmicas de la superficie. Las temperaturas superficiales son ligeramente más altas que las temperaturas del aire interior y exterior, lo cual podría estar relacionado con la capacidad de la pared para almacenar y liberar calor.

Las amplitudes térmicas fueron: T_i de 6,4 °C, T_e de 17,1 °C, $T_{si,p}$ de 11,9 °C y T_{se} de 27,9 °C. A partir de las mediciones de T_{si} y T_{se} , se obtiene para el sistema constructivo FD_s de 0,27 y TR_s de 4 h. En cuanto a las mediciones de T_i y T_e , se obtiene para la envolvente de ME, TR_s de 5 h.

El valor de FD_s sugiere que la pared tiene una capacidad moderada para atenuar las variaciones térmicas de la superficie exterior. Un factor de decremento de 0,27 implica que la pared reduce significativamente la amplitud térmica del lado exterior, lo que es un indicador positivo de la capacidad de la pared para amortiguar el calor y reducir las fluctuaciones térmicas dentro del espacio interior.

El valor de TR_s del sistema constructivo evaluado, muestra que tiene un efecto moderado en la atenuación de las variaciones térmicas exteriores, lo que permite que las fluctuaciones térmicas del ambiente exterior afecten la pared de manera retardada. Este retraso es fundamental en zonas donde la temperatura exterior varía drásticamente durante el día, ya que un mayor retraso térmico ayuda a estabilizar la temperatura interior. En cuanto al retraso térmico de la envolvente (5 h), se observa que ofrecen una mayor atenuación del cambio térmico entre el aire exterior e interior, debido a los demás componentes de ME que presentan un elevado aislamiento.

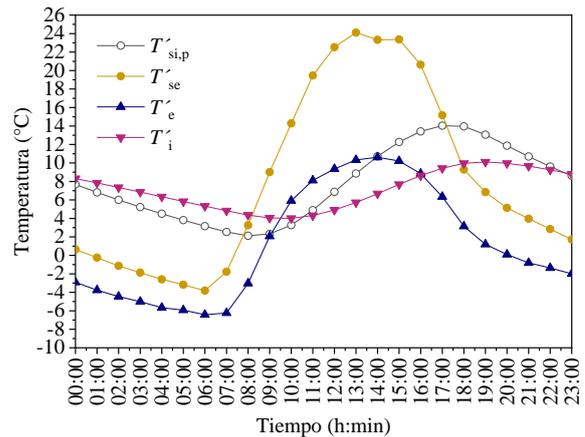


Fig. 7. Promedio horario diario de la temperatura interior (T_i), exterior (T_e) y superficie de la pared de prueba: interior ($T_{si,p}$) y exterior (T_{se}).

4.3 FLUJO DE CALOR

Las mediciones de flujo de calor realizadas sobre la superficie interior de dos ladrillos en diferentes posiciones, separados 48 cm, ubicados en una línea vertical imaginaria y equidistantes respecto al centro de la pared, tuvieron como resultado una diferencia máxima de 0,21 W/m², una media de 0,02 W/m² y una mínima de -1,96 W/m². Debido a esto, es factible inferir que las condiciones térmicas en la pared son bastante uniformes, ya que las mediciones son muy similares, como se muestra en la Fig. 8a para valores horarios diarios y en la Fig. 8b para valores promedio horarios diarios. Para posteriores análisis, se considerará la media de q_1 y q_2 como un valor representativo del flujo de calor (q_p).

La medición del flujo de calor en el lado interior de la pared de prueba, dependiendo de la hora del día, es positiva (cuando el calor sale del interior) o negativa (cuando entra al interior). El promedio horario diario para el periodo de medición indica que el calor entra al módulo entre las 10:45 y 22:30, mientras que el resto de las horas sale. En total entra 619,22 W/m² y sale 298,19 W/m². Esto implica que el ladrillo evita que salga del interior 321,03 W/m². En términos de energía, para los 6 m² de área de la pared y un intervalo de medición de 15 minutos, esto sería, entra 0,93 kWh y sale 0,45 kWh, mientras que al interior ingresa 0,48 kWh.

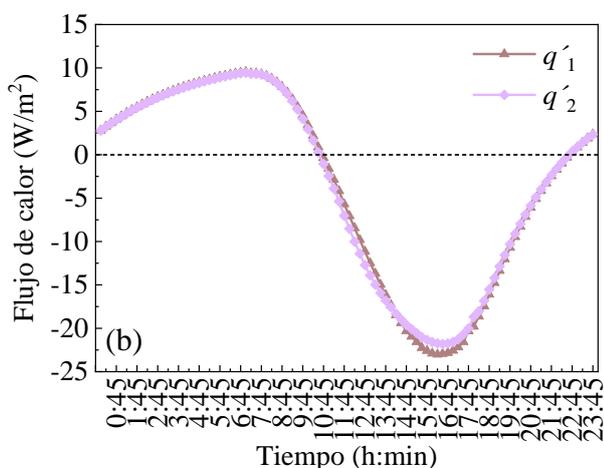
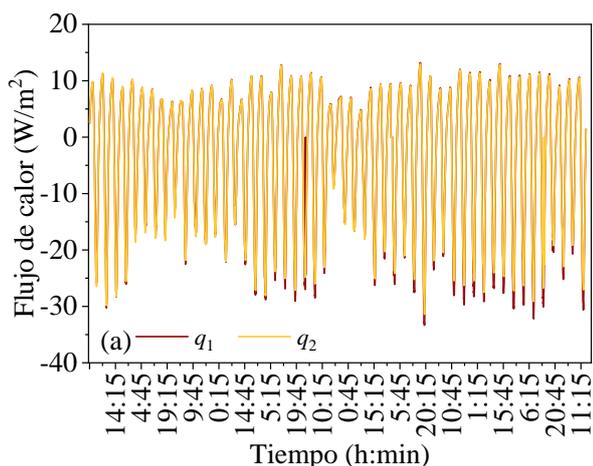


Fig. 8. Flujos de calor medido en el lado interior de la pared de ensayo, (a) medidas diarias (q_1 y q_2) y (b) promedio horario diario (q'_1 y q'_2).

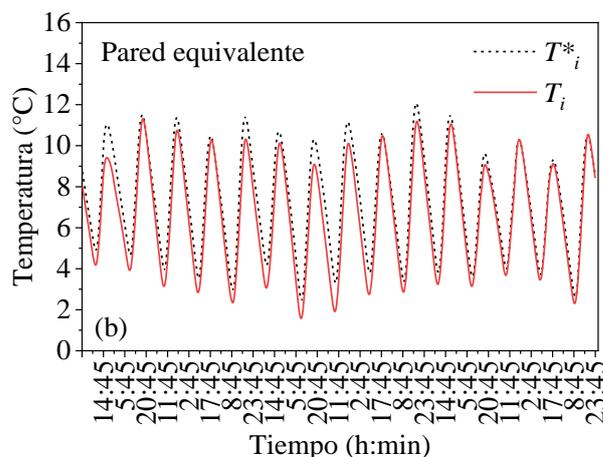
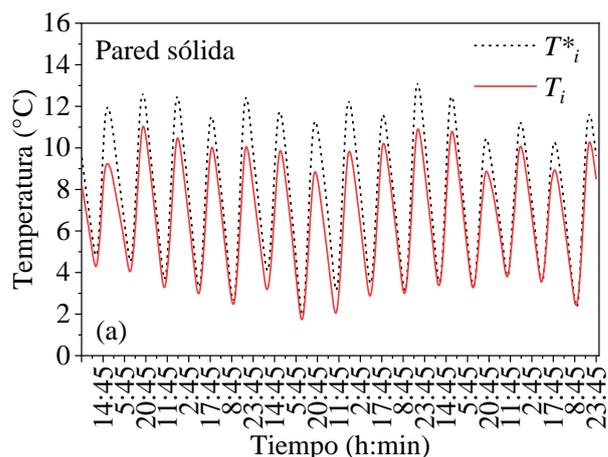


Fig. 9. Temperatura interior medida (T_i) y simulada (T^*_i) del 4 al 18 de junio de 2021, (a) para sólida y (b) pared equivalente.

4.4 SIMULACIÓN DINÁMICA

La Fig. 9a y 9b muestra la comparación de los cambios de temperatura interior medida (T_i) y simulada (T^*_i) del 4 al 18 de junio, donde se registraron mediciones de la irradiancia solar. Para la pared de prueba, considerando el ladrillo como material sólido, se obtuvieron los valores de R^2 y RMSE de 0,68 y 1,35, respectivamente, mientras que, considerando la pared como un conjunto de capas homogéneas equivalentes, R^2 resultó en 0,87 y RMSE en 0,91. Esto último presenta una mayor concordancia entre lo medido y simulado. Asimismo, se aprecia que el modelo equivalente implementado en *EnergyPlus* para materiales heterogéneos es más cercano al comportamiento real debido a las cavidades que presenta el material, las cuales contribuyen a un mejor aislamiento. Por eso, los picos son menores y los valles mayores en comparación con el caso en que el material es completamente sólido.

5. CONCLUSIONES

- La evaluación del comportamiento térmico de la pared de ensayo de ladrillos perforados mediante un módulo experimental evidencia que el sistema constructivo ha reducido la amplitud térmica exterior durante el periodo de medición, de 17,1 °C en el exterior a 6,4 °C en el interior. Además, la temperatura interior se encuentra por encima de la temperatura exterior en promedio horario de 5,2 °C. Entre los lados del material de prueba el tiempo de retraso fue de 4 h y el factor de decremento fue de 0,27, esto último de FD_s quiere decir que el ladrillo con cavidades tiene una capacidad moderada para reducir las fluctuaciones térmicas del exterior al interior.
- El retraso térmico de 4 h podría ser considerado relativamente corto en zonas altoandinas con temperaturas exteriores bajo 0°C. Este retraso refleja la capacidad moderada de la pared para amortiguar los cambios térmicos, pero no es suficiente para prevenir el enfriamiento rápido del interior en condiciones extremas. El sistema constructivo de ladrillos con cavidades puede no ser lo suficientemente aislante para mantener el

confort térmico en condiciones de frío extremo, por lo que sería recomendable mejorar el sistema constructivo con materiales de mayor inercia térmica o aislantes adicionales para garantizar un mejor desempeño en zonas altoandinas de oscilaciones térmicas considerables. Donde, se esperaría un retraso térmico de más de 10 h en estas zonas ya que las temperaturas exteriores descienden abruptamente.

- Es importante destacar que las mediciones de flujo de calor en diferentes puntos de la pared son similares, lo que justifica el uso de un valor promedio para futuros análisis. Sin embargo, las pérdidas de energía a través de otras superficies de la envolvente deben ser consideradas en cualquier análisis energético más amplio.
- El uso de *EnergyPlus* para simular materiales heterogéneos (como ladrillos con cavidades) es un enfoque más adecuado para representar la realidad de las paredes en los edificios. El modelo basado en capas homogéneas parece ser una mejor aproximación a la física real de la pared, en contraste con la simulación del material como si fuera completamente sólido. Esto se resalta con los valores de los índices de precisión: el aumento en el valor de R^2 y la reducción del RMSE indican que el modelo de capas homogéneas tiene una mayor capacidad para predecir la temperatura interior de manera precisa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el auspicio del Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Perú (CONCYTEC) bajo el contacto N° 121-2018-FONDECYT. Además, J.O. Molina agradece a FONDECYT por la beca doctoral dentro del convenio No. 05-2018-FONDECYT/Banco Mundial.

REFERENCIAS

- [1] N. Jannat, A. Hussien, B. Abdullah, y A. Cotgrave, «A Comparative Simulation Study of the Thermal

Performances of the Building Envelope Wall Materials in the Tropics», *Sustainability*, vol. 12, no. 2, ene. 2020, doi: 10.3390/su12124892.

- [2] Y. H. Lee et al., «Thermal Behavior and Energy Efficiency of Modified Concretes in the Tropical Climate: A Systemic Review», *Sustainability*, vol. 13, no. 21, ene. 2021, doi: 10.3390/su13211957.
- [3] A. Carrobé, L. Rincón, y I. Martorell, «Thermal Monitoring and Simulation of Earthen Buildings. A Review», *Energies*, vol. 14, no. 8, ene. 2021, doi: 10.3390/en14082080.
- [4] J. O. Molina, M. J. Horn, y M. M. Gómez, «Design of a “Test Cell” to be located at 4500 masl in a high Andean region of Peru and dynamic simulation of the thermal performance of housing wall materials», *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1433, no. 1, ene. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1433/1/012002.
- [5] J. R. Molina, G. Lefebvre, R. Espinoza, M. Horn, y M. M. Gómez, «Bioclimatic approach for rural dwellings in the cold, high Andean region: A case study of a Peruvian house», *Energy and Buildings*, vol. 231, ene. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110605.
- [6] G. Barrios, G. Huelsz, J. Rojas, J. M. Ochoa, y I. Marincic, «Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings», *Energy and Buildings*, vol. 50, pp. 120-127, jul. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.030.
- [7] G. Huelsz, G. Barrios, y J. Rojas, «Evaluation of heat transfer models for hollow blocks in whole-building energy simulations», *Energy and Buildings*, vol. 202, nov. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109338.
- [8] H. E. Huerto et al., «Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: State of the art, research challenges and recommendations», *Building and Environment*, vol. 180, ago. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107081.
- [9] SENAMHI, «Estaciones». [En línea]. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- [10] J. A. Clarke, *Thermophysical properties*, Second Edition. Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 325-339. doi: 10.1016/B978-075065082-3/50010-3.
- [11] Y. Cengel, *Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico*, Tercera Edición. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [12] MVCS, «Norma EM.110 Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética», Reglamento Nacional de Edificaciones. [En línea]. <http://www.construccion.org.pe/normas/rne2012/rne2006.htm>
- [13] E. Harb et al., «Thermal performance of starch/beet-pulp composite bricks for building insulation at a wall scale», *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e01851, jul. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01851.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe