

Design of an adobe housing model with thermal insulation for residents of cold climates using phase change material

Daniel Ferrandiz, Bachiller¹, Erick Huayta, Bachiller¹, José Rodríguez, Doctor², Ivan Bragagníni, Ingeniero³

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201416869@upc.edu.pe; u201622530@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, jose.rodriguez@upc.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, pccibra@upc.edu.pe

Abstract— Climate change has an impact on all the areas that operate in a construction environment and, essentially, on the life cycle of a home; in which the materials affect the construction process according to their energy content. The adobe is used for its thermal conductivity to improve the internal temperature of a home; However, in cold climates their behavior is not very efficient. In this sense, the phase change material (PCM) can be used as an alternative because it is capable of storing latent heat and increasing the thermal mass of a building. In the present work, 06 insulation systems for walls, ceilings and floors of an adobe house are analyzed thermal insulation system is proposed, and a prototype is made with some components in 3D printing; the results indicate that the systems Trombe-PCM wall, translucent concrete block wall-PCM, false ceiling-PCM, concrete ceiling-PCM, alveolar floor-PCM and plasterboard floor-PCM are adequate; with the proposed insulation system, an improvement of 42.71% of the internal thermal comfort is achieved when compared to adobe house without PCM; and an increase of 320.38% with respect to the Imata temperature, while the Trombe-PCM wall system prototype allows to make corrections in the design for its implementation on a real scale.

Keywords — Climate Change, PCM, cold climates, adobe, thermal insulation.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.575>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Diseño de un modelo de vivienda de adobe con aislamiento térmico para pobladores de climas fríos utilizando material de cambio de fase

Design of an adobe housing model with thermal insulation for residents of cold climates using phase change material

Daniel Ferrandiz, Bachiller¹, Erick Huayta, Bachiller¹, José Rodríguez, Doctor²
Ivan Bragagnini, Ingeniero³

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201416869@upc.edu.pe; u201622530@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, jose.rodriguez@upc.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, pccibra@upc.edu.pe

Resumen— El cambio climático tiene impacto en todas las áreas que operan en el entorno de una construcción y, esencialmente, en el ciclo de vida de una vivienda; en el cual los materiales inciden en el proceso constructivo según su contenido energético. El adobe, se utiliza por su conductividad térmica para la mejora de la temperatura interna de una vivienda; sin embargo, en climas fríos su comportamiento no es muy eficiente. En este sentido, se puede utilizar el material de cambio de fase (PCM), como una alternativa porque es capaz de almacenar el calor latente e incrementar la masa térmica de un edificio. En el presente trabajo se analizan 06 sistemas de aislamientos para muros, techos y pisos de una vivienda de adobe, se propone un sistema de aislamiento térmico, y se elabora un prototipo con algunos componentes en impresión 3D; los resultados indican que los sistemas muro trombe-PCM, muro de bloques de concreto translúcido-PCM, falso techo-PCM, techo de concreto-PCM, piso alveolar-PCM y piso de láminas de yeso-PCM son los adecuados. Además, con el sistema de aislamiento propuesto, se alcanza una mejora del 42.71% del confort térmico interior al compararlo con una vivienda de adobe sin PCM y un incremento de 320.28% respecto a la temperatura de Imata, mientras que, el prototipo del sistema muro trombe-PCM permite hacer correcciones en el diseño para su implementación a escala real.

Palabras claves— Cambio climático, PCM, climas fríos, adobe, aislamiento térmico.

Abstract— Climate change has an impact on all the areas that operate in a construction environment and, essentially, on the life cycle of a home; in which the materials affect the construction process according to their energy content. The adobe is used for its thermal conductivity to improve the internal temperature of a home; However, in cold climates their behavior is not very efficient. In this sense, the phase change material (PCM) can be used as an alternative because it is capable of storing latent heat and increasing the thermal mass of a building. In the present work, 06 insulation systems for walls, ceilings and floors of an adobe house are analyzed thermal insulation system is proposed, and a prototype is made with some components in 3D printing; the results indicate that the sys-

tems Trombe-PCM wall, translucent concrete block wall-PCM, false ceiling-PCM, concrete ceiling-PCM, alveolar floor-PCM and plasterboard floor-PCM are adequate; with the proposed insulation system, an improvement of 42.71% of the internal thermal comfort is achieved when compared to adobe house without PCM; and an increase of 320.38% with respect to the Imata temperature, while the Trombe-PCM wall system prototype allows to make corrections in the design for its implementation on a real scale.

Keywords — Climate Change, PCM, cold climates, adobe, thermal insulation.

I. INTRODUCCION

El cambio climático está originando modificaciones en el clima que afectan a diversos países a nivel mundial [1], en el caso de Italia y Cuba, estos cambios producen alteraciones en la temperatura, humedad y precipitaciones; las cuales inciden sobre los monumentos históricos de piedra, alterando sus materiales de construcción y presentando diferentes deterioros. Así tenemos que [2] reporta la aparición de cortezas negras, desprendimientos y decoloraciones en la fachada de mampostería de piedra calcárea del Palacio Consoli. De la misma manera, [3] también indica la aparición de manchas negras en la fachada de piedra caliza del Convento San Francisco de Asís.

Por ello, [4] indica que la fusión entre materiales, como el adobe, y el diseño moderno no solo dará lugar a la construcción consciente de la tierra, sino también será eficiente en términos de energía. Es decir, será un material sustituto que la industria de la construcción puede adoptar como una solución que contribuya a la omnisciente enfermedad del calentamiento global.

Es así que el adobe, según [5] es un material tradicional que se compone de mezclas de tierra seca reforzadas con

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.575>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development" "Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy", July 27-31, 2020, Virtual Edition.

fibras naturales y unidas mediante mortero de barro. La inclusión de las fibras y la presencia del agua tienen un efecto dominante en el rendimiento mecánico de los bloques de adobe y la mampostería, los cuales, no afectan su comportamiento térmico. Por ello, las construcciones de viviendas con materiales vernáculos, esencialmente, el uso de bloques y muros de adobe, se implementaron por la habilidad de las personas, las cuales, reconocían las diferentes condiciones climáticas que atravesaban [6].

En el contexto moderno, muchas construcciones hechas de adobe son empleadas en climas con bajas temperaturas, es el caso de la localidad de Louroujina en Chipre, donde la temperatura mínima puede alcanzar los 5°C [4]. También, se construyeron viviendas de adobe en Mexicali Baja California en México, con aproximadamente 6°C [8] donde la capacidad calorífica del adobe viene a ser un factor primordial para moderar las cargas de temperaturas de las estructuras. También el adobe debido a que conserva la energía es considerado en el mejoramiento del confort térmico en lugares con climas fríos, este es el caso de la ciudad de Navapalos en España, cuya temperatura mínima alcanza los -1°C [9]. De igual manera, el adobe facilita el mantenimiento del confort térmico dentro de una vivienda, es decir, en ciudades como Sonora en México, donde la temperatura desciende en la noche, sobre todo en climas extremadamente fríos, a temperaturas menores a 5°C [10], los muros de adobe emiten su calor almacenado durante el día mejorando el confort interno del lugar [11].

En el estado de Himachal Pradesh en la India, cuya temperatura mínima es alrededor de 10°C, los muros de adobe no funcionan adecuadamente por su baja resistencia a los cambios térmicos lo que conduce a la pérdida de calor a través de los muros [12]. También, en la ciudad de Toulouse en Francia, cuya temperatura mínima es de 9°C, al no estar estabilizados los bloques de adobe son frágiles y susceptibles al daño por eventos climáticos cambiantes [13].

Existen algunas referencias de otros materiales naturales utilizados en climas con bajas temperaturas, como son la tierra y el barro debido a sus propiedades como aislantes térmicos. En algunas ciudades de la India de climas con temperaturas menores a 10°C se construyeron viviendas con bloques y muros de adobe, de la evaluación realizada mediante encuestas se encontró que en el estado de Himachal Pradesh, el 30% de los ocupantes no estaban satisfechos respecto al confort térmico interior [12]. No obstante, en Hokuriku, en Japón, con clima promedio de 0°C, se ha demostrado que al habitar en una vivienda con el piso de tierra y muros de barro se incrementa la temperatura interior entre 2°C y 3°C [14].

Por esta razón, es necesaria la inclusión del PCM en los análisis de los sistemas de aislamiento para muros, techos y pisos, debido a que, es un material de almacenamiento térmico de calor latente, que tiene el potencial de incrementar la masa térmica de un edificio sin cambiar drásticamente las

técnicas de construcción aplicadas en el proyecto [15]. Al cambiar de fase del estado líquido al estado sólido o viceversa puede absorber o liberar mucha cantidad de calor latente [15, 16], la cual es alta permitiéndole almacenar una gran cantidad de energía en pequeños intervalos de temperatura, lo que resulta en un aumento significativo de la masa térmica del edificio cuando se incorpora a su cerramiento exterior [17].

Diferentes investigaciones se han realizado utilizando el PCM dentro de los sistemas constructivos asociados a la construcción de muros, techos y pisos. Al respecto [18], estudia un muro trombe con 2 tipos de PCM en una vivienda de la ciudad de Wuhan con temperatura promedio mínima de 1°C y utilizando el software TRNSYS obtiene una reducción de la temperatura interior en 3°C. De igual manera [19], estudia el muro Drywall con PCM y mediante los software BEOpt y EnergPlus encuentran una mejora de la transferencia de la energía interna del muro en 8°C en la ciudad de Arizona de temperaturas que varían entre 7°C y 41°C. Adicionalmente [20], estudia otro muro hecho con concreto translúcido y PCM en una vivienda al sur de Francia con temperatura promedio de 5°C, obteniendo un aumento de la temperatura interna del lugar en 10°C.

Para el caso del techo, [21] estudia un falso techo con armadura metálica y PCM mediante la realización de un experimento de una habitación de prueba, en la ciudad de Tianjín con temperaturas que varían entre -8°C y 31°C, en China, se encontró un aumento de la temperatura interior en 3°C con un mejoramiento del confort interno.

En lo relacionado al piso, [22] estudia un sistema compuesto por poliestireno extruído, aluminio y con 2 capas de PCM para una vivienda de la ciudad de Shangai con temperatura de 8°C, encontrando un incremento de la duración del confort térmico en 2.2 veces comparado con el sistema sin PCM.

Luego de la amplia revisión bibliográfica realizada sobre el adobe y su comportamiento ante climas fríos y muy fríos, podemos ver que es necesario plantear el estudio de un material nuevo como el PCM que responda ante esta incidencia climática.

Asimismo, el uso de la tecnología de impresión 3D es un fundamental, porque ofrece una amplia gama de plataformas de producción que permiten a los usuarios crear productos personalizados [23], elaborados mediante un proceso de fabricación por capas, que crean un objeto sólido tridimensional a partir de un modelo digital; que facilita la producción de objetos de formas complejas [24].

Estos objetos pueden ser variados, siendo los moldes, piezas, maquetas y prototipos los que suelen utilizarse en la Ingeniería. Algunos prototipos relacionados con el ámbito de

la construcción de albañilería han sido reportados en [25], quien luego de elaborar prototipos de muros de concreto concluye que estos son necesarios porque actúan como pilotos y sirven para reconocer sus características a menor escala.

En esta investigación, se aborda el problema del comportamiento del adobe ante climas fríos. Para ello, se realizó el análisis de diferentes sistemas de aislamiento térmico de una vivienda, la propuesta de un sistema de aislamiento térmico para una vivienda de adobe y la elaboración de un prototipo del sistema de aislamiento térmico para un muro con algunos componentes en impresión 3D.

II. MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Materiales y/o equipos

2.1.1 Modelo de vivienda

a.- Sistemas de aislamiento térmico

En la elaboración de los sistemas de aislamiento térmico se utilizó una computadora portátil marca Acer Predator PH315-51 con un procesador Intel(R) Core (TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz, 2208 Mhz, 6 Core(s), 12 Logical Processor(s) con 16 GB de RAM y el software DesignBuilder versión 4.5.0.148.

b.-Propuesta de aislamiento térmico

Para el desarrollo de la propuesta de aislamiento térmico se utilizó una computadora portátil marca Acer Predator PH315-51 con un procesador Intel(R) Core (TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz, 2208 Mhz, 6 Core(s), 12 Logical Processor(s) con 16 GB de RAM y el software DesignBuilder versión 4.5.0.148.

2.1.2 Prototipo de aislamiento térmico para muro

En la elaboración del prototipo se empleó como materiales: en la primera capa, filamento PLA de color plomo de 19x16cm y espesor 15mm que representa al muro de concreto y el acrílico de 17x8cm y espesor 2mm que representa al vidrio doble; en la segunda capa, cartón de color marrón de 19x16cm y 1mm de espesor que representa al PCM; en la tercera capa, foam de color blanco de 19x16cm y espesor 4mm que representa al poliestireno expandido y; por último, en la cuarta capa, material de densidad media (MDF) de color crema de 19x16cm de 3mm de espesor que representa a los bloques de adobe.

Para la impresión del prototipo de dimensiones 19x16cm y espesor de 4mm, se utilizó una laptop de marca Alienware con procesador Core i7 y memoria RAM de 16GB con software Windows 10. Asimismo, se empleó una impresora 3D marca Sindoh modelo 3DWOX 1.

2.2 Método

2.2.1 Modelo de vivienda

Los sistemas de aislamiento térmico desarrollado tienen como base una vivienda de control de 150m² de área construida y de 15x10m respectivamente, la planta se compone de 2 zonas diferentes, una común destinada para una habitación con área de 79.20m² y la otra compartida de 36.96 m² para utilizarse como sala, comedor y cocina. Las características de los componentes, materiales y dimensiones de la vivienda de control se aprecian en la Tabla 1 y Fig. 1 respectivamente, siendo esta última la que se tomará como base para la designación de los muros, los cuales estarán referenciados con respecto a la ubicación del Norte.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DE LA VIVIENDA DE CONTROL

Componentes	Material
Muro (lxaxh)m	Bloques de adobe
	10.00x0.60x3.50
Piso (lxaxe)m	Cemento pulido
	15.00x10.00x0.20
Techo (lxaxe)m	Planchas de calamina
	15.00x10.00.x0.25

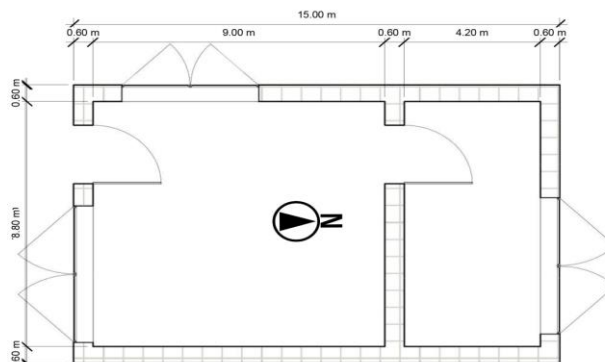


Fig. 1 Planta de la vivienda de control.

A.- Sistemas de aislamiento térmico

A. Muro trombe- PCM

En la Fig. 2, se muestra en un corte transversal las capas utilizadas en el muro trombe-PCM ubicado en el muro Este de la Fig. 1, compuesto por un muro de bloques de adobe de espesor 10.5 cm, una capa de poliestireno expandido de 11.75 cm, una capa de PCM de 7.5 cm, un muro de bloques de concreto de 10 cm, un espacio de aire de 50 cm y un vidrio doble de 3.5 cm.

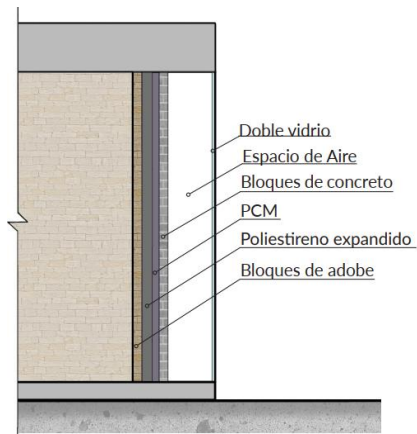


Fig. 2 Corte del muro trombe-PCM con los materiales utilizados en capas.

B. Muro de bloques de concreto traslúcido-PCM

En la Fig. 3, se muestra en un corte transversal las capas utilizadas en el muro de bloques de concreto traslúcido-PCM ubicado en el muro Este de la Fig. 1, compuesto por un muro de bloques de adobe de un espesor de 20 cm, una capa de PCM de 7.5 cm, un espacio de aire de 12.5 cm y un muro de ladrillos o bloques de concreto traslúcido de 20 cm.

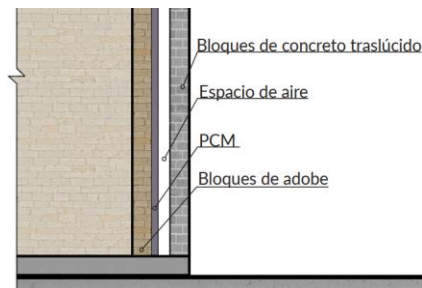


Fig. 3 Corte del muro de bloques de concreto traslúcido-PCM con los materiales utilizados en capas.

C. Falso techo-PCM

En la Fig. 4, se muestra en un corte transversal las capas utilizadas en el falso techo-PCM compuesto por un falso techo de madera tornillo de un espesor de 10.14 cm, una capa de PCM de 7.5 cm y láminas de policarbonato de 10 mm para el techo a dos aguas.

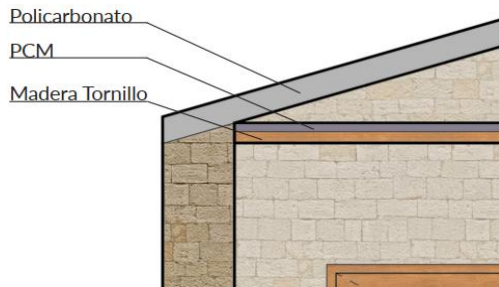


Fig. 4 Corte del falso techo-PCM con los materiales utilizados en capas.

D. Techo de concreto-PCM

En la Fig. 5, se muestra en un corte transversal las capas utilizadas en el techo de concreto-PCM compuesto por un falso techo de concreto ligero de un espesor de 12cm, una capa de PCM de 7.5 cm, una capa de ladrillos de una altura de 10 cm y planchas de calamina de 20 mm.

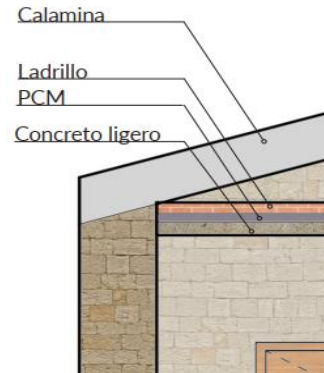


Fig. 5 Corte del techo de concreto-PCM con los materiales utilizados en capas.

E. Piso Alveolar-PCM

En la Fig. 6, se muestra en un corte transversal las capas utilizadas en el piso alveolar-PCM compuesto por 2 capas de concreto: superior de 29 cm y una inferior denominada losa de concreto de 10 cm en donde se colocan tubos de PVC, de un diámetro de 9.42 cm y PCM de 7.5 cm dentro del tubo de

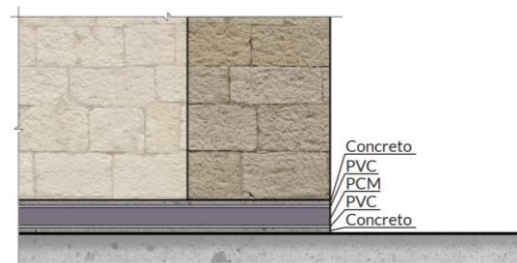


Fig. 6 Corte del piso alveolar-PCM con los materiales utilizados.

F. Piso de láminas de yeso-PCM

En la Fig. 7, se muestra en un corte transversal las capas utilizadas en el piso de láminas de yeso-PCM compuesto por una capa de paneles de yeso de un espesor de 1.27 cm, una capa de PCM de 7.5 cm, una capa de poliestireno expandido de 5 cm y una losa de concreto de 5 cm de espesor.



Fig. 7 Corte del piso de láminas de yeso-PCM con los materiales utilizados en capas.

b.- Propuesta de aislamiento térmico

En la Fig. 8, se muestra una isometría 3D de la propuesta de aislamiento térmico en donde se utilizaron los sistemas de muro trombe-PCM, Piso Alveolar-PCM y techo de concreto-PCM. Además, se colocaron zapatas, columnas y vigas para lograr estructurar la vivienda con los nuevos sistemas utilizados. En la Fig. 9, se muestra un corte de la propuesta de aislamiento térmico en donde se muestran todos los materiales, en capas, añadidos que forma parte de los sistemas propuestos utilizados.

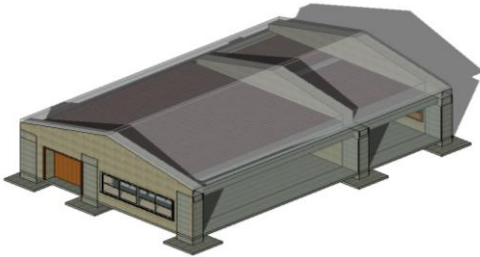


Fig. 8 Isometría 3D de la propuesta de aislamiento térmico.

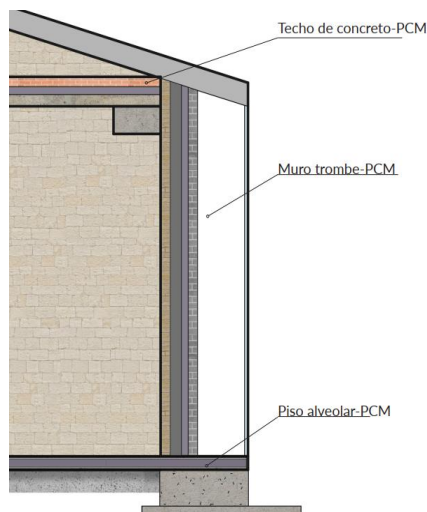


Fig. 9 Corte de la propuesta de aislamiento térmico con los materiales utilizados en capas de los sistemas de muro trombe-PCM, piso alveolar-PCM y techo de concreto-PCM.

2.2.2 Prototipo de aislamiento térmico para muro

El prototipo de aislamiento térmico para el muro de 19x16cm y 15mm de espesor, fue realizado en cuatro capas, habiéndose realizado la primera capa en el FabLab de la UPC-Monterrico, donde se imprimió en 3D un muro de concreto de 19x16cm con una abertura en el medio de 17x8cm donde se colocó el acrílico de 2mm de espesor. Luego, para la segunda capa se utilizó cartón microcorrugado de 19x16cm y 1mm de espesor, el cual fue colocado con pegamento silicona a la parte

posterior de la capa anterior. A continuación, para la tercera capa se usó foam, con dimensiones de 19x16cm y 4mm de espesor, que se colocó con pegamento silicona a la parte posterior de la segunda capa. Finalmente, en la cuarta capa se empleó material de densidad media (MDF) de 19x16cm y 3mm de espesor, que se colocó en la parte posterior de la capa anterior con pegamento silicona. Una vez pegadas las 4 capas, estas fueron colocadas en una base de madera de 23x10cm y 10mm de espesor.

Para la identificación de cada capa se colocaron sus nombres utilizando hojas bond de colores escogidos por cada una de las capas, los mismos que responden a los colores de los materiales utilizados en el modelo del prototipo y que responden a la siguiente nomenclatura: 1° capa, concreto-vidrio doble; 2° capa, PCM; 3° capa, poliestireno expandido; y 4° capa, bloques de adobe.

III. RESULTADOS Y ANALISIS

3.1 Modelo de Vivienda

a. Sistemas de aislamiento térmico

A. Muro trombe- PCM

En la Tabla 2, se presenta la variación mensual de la temperatura en el año 2018 para diferentes escenarios. En ella se ve que al variar los meses del año de Enero a Diciembre la temperatura en el muro Trombe-PCM tiene un comportamiento variable similar a las temperaturas en Imata y en la vivienda de control, alcanzándose para la temperatura en el muro Trombe-PCM el valor inicial de 19.82 °C en el mes de Enero, aumentando en Abril a 20.35 °C, luego disminuyendo en el mes de Julio a 18.74 °C, para finalmente aumentar hasta Diciembre a 20.56°C, representando un incremento en promedio anual del 31.57% respecto a la temperatura en la vivienda de control y un aumento de 287.45% respecto a la temperatura en Imata.

La Ref.[26], realiza el estudio de la variación de la temperatura en el periodo del 15 al 21 de Mayo sobre la temperatura para la partición del canal de aire de un muro Trombe-PCM y para la temperatura en las ciudades de Hobart y Melbourne, obteniendo tendencias similares; los resultados indican que la temperatura promedio del muro trombe-PCM es de 18°C en la ciudad de Hobart y de 24.6°C en la ciudad de Melbourne, y que la temperatura promedio es de 8.9 °C en la ciudad de Hobart y de 10.6°C en la ciudad de Melbourne, representando aumentos en la temperatura del muro Trombe-PCM del 102% respecto a la temperatura en Hobart y del 132% respecto a la temperatura en Melbourne. La Ref.[27], estudia la variación de la temperatura en un periodo desde las 7 a las 17 horas para la temperatura de la superficie en un muro trombe con una capa porosa que contiene PCM y la temperatura de la superficie en un muro trombe donde la capa

porosa no tiene PCM, se alcanzan tendencias similares; los resultados indican que la temperatura de la superficie con PCM tiene un valor inicial aproximado de 10°C a las 7 horas, de 19.5 °C a las 14 horas y de 17°C a las 17 horas y de 15 °C a las 24 horas . Mientras que en la superficie sin PCM se tiene una temperatura inicial aproximada de 10°C a las 7 horas, de 19 °C a las 14 horas, de 16°C a las 17 horas y de 12 °C a las 24 horas. El muro poroso de PCM facilita el flujo del aire y logra aumentar la temperatura promedio de las habitación en un 20.2% durante la noche. La Ref.[28], indica que este comportamiento de aumento de temperatura se debe a que la absorción de la radiación solar mediante la capa de vidrio logra el calentamiento del aire que circula en el canal colocado entre el vidrio del sistema y la capa de aislador térmico, esto genera calor que se almacena en la masa interna del muro y permite poner en funcionamiento el PCM que contribuye a que el aire caliente circule en el ambiente interno y aumente la temperatura.

B. Muro de bloques de concreto traslúcido-PCM

En la Tabla 2, se presenta la variación mensual de la temperatura en el año 2018 para diferentes escenarios. Se observa que al variar los meses del año de enero a diciembre la temperatura en el muro de bloques de concreto traslúcido-PCM tiene un comportamiento variable similar a las temperaturas en Imata y en la vivienda de control. Se tiene como resultado que la temperatura en el muro de concreto traslúcido tiene un valor inicial de 18.88 °C en el mes de enero, un valor de 19.43 °C en abril, un valor de 16.26 °C en junio y un valor de 19.84°C en diciembre, representando en promedio anual un incremento del 22.42% con respecto a la temperatura en la vivienda de control y un aumento de 260.51% respecto a la temperatura en Imata.

La Ref.[29], realiza un estudio de la variación de la temperatura usando un muro traslúcido superinsulado almacenador de calor latente con una capa de PCM. La simulación se realizó del 30 de Julio al 5 de Agosto para las temporadas de Verano e Invierno en la ciudad de Sophia Antipolis. Los resultados indican que la temperatura en la habitación de estudio es de 30.82°C en verano y de 18.38°C en invierno, y la temperatura promedio exterior es de 27.81°C en verano y 10.65°C en invierno, representando un aumento en la temperatura de 10.82% y de 72.58% respectivamente. La Ref.[21], realiza un estudio de la temperatura en un muro consistente de una capa de vidrio de 0.8 cm, una capa de aerogel de 4 cm y una capa de ladrillos de vidrio llenos de PCM. El estudio se realizó durante las fechas del 21 de agosto al 24 de agosto. Los resultados indican que la habitación de control tiene temperaturas que van de un rango de 33°C a 34 °C mientras que la habitación con el sistema constructivo aumenta las temperaturas a un rango de 35°C a 40°C, representando un aumento de las temperaturas en 17.64% sobre la temperatura de la habitación de control. La ref. [30], muestra que el aumento de la temperatura en las habitaciones con solu-

ciones constructivas de concreto traslúcido se debe a que aumenta la transmitancia de luz. Por consiguiente, se, cambia la demanda de energía necesaria para poner en funcionamiento el PCM debido a que estos dos valores son directamente proporcionales.

C. Falso techo- PCM

En la Tabla 2, se presenta la variación mensual de la temperatura en el año 2018 para diferentes escenarios. Se aprecia que al variar los meses del año de enero a diciembre la temperatura en el falso techo-PCM tiene un comportamiento variable similar a las temperaturas en Imata y en la vivienda de control. Se tiene como resultado que la temperatura en el falso techo-PCM tiene un valor inicial de 16.38 °C en el mes de enero, un valor de 16.83°C en abril, un valor de 13.88 °C en junio, un valor de 17.57°C en diciembre, representando en promedio anual un incremento del 5.7% con respecto a la temperatura en la vivienda de control y un aumento de 211.28% respecto a la temperatura en Imata.

La Ref. [31], realiza el estudio de la variación de las temperaturas en el periodo de 8 al 12 de Agosto mediante el uso de un sistema de un techo de fibrocemento y poliestireno con PCM. Se utilizaron 3 habitaciones para comparar las temperaturas cuando se usa un sistema con PCM y un sistema constructivo convencional. En la habitación techo de mortero CR se obtuvo una temperatura inicial de 15.78°C y una temperatura final de 17.7°C. En la habitación de techo PCM con mortero CR se obtuvo una temperatura inicial de 13.93°C y una temperatura final de 14.72°C. En la habitación de techo PCM se obtuvo una temperatura inicial de 16.69°C y una temperatura final de 18.7°C. Como conclusión se tiene que la habitación de PCM logra un aumento de 27.04% en comparación al techo PCM con mortero CR y un aumento de 5.64% respecto al techo con mortero CR. La Ref.[32], realiza el estudio de la variación de las temperaturas en el periodo de las 6 horas a las 19 horas para la temperatura externa de Subgan Jaya, Malaysia sobre la temperatura de la superficie de un techo a base de paneles de yeso con PCM, obteniendo tendencias similares; los resultados indican que para las temperaturas externas en Subgan Jaya se obtiene una temperatura inicial a las 6 horas de 25°C, una temperatura a las 13 horas de 30°C y una temperatura final a las 18 horas de 29°C a las 18 horas, mientras que cambio, las temperaturas en la habitación con techo-PCM fueron la inicial a las 6 horas de 26°C, 31°C a las 13 horas y 29.5°C a las 18 horas, representando los resultados un aumento de la temperatura promedio final del 3.01%. La Ref. [33], muestra que el aumento de estos techos con capas de PCM se logra porque el material incrementa el porcentaje de radiación que se refleja de las superficies de los techos, mediante el almacenamiento del calor latente, el flujo de calor que atraviesa al interior de la edificación por medio del techo y el flujo de calor de la superficie del techo al ambiente.

TABLA 2
VARIACIÓN MENSUAL DE LAS TEMPERATURAS DURANTE EL AÑO 2018 SEGÚN LA ZONA Y UBICACIÓN.

Zona	Ubicación	Temperatura (°C)												Promedio (°C)	Aumento Promedio (°C)	Aumento (%)
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre			
Lugar	Imata	6.2	6.4	6.2	5.4	3.9	2.5	2.2	3.4	4.8	6.1	7.0	6.9	5.1	-	-
Vivienda	Control	15.0	14.7	15.6	16.0	14.5	13.5	13.4	14.2	15.0	15.3	16.2	16.2	15.0	-	-
Muros	Trombe-PCM	19.8	19.4	19.9	20.4	19.3	18.6	18.7	19.1	19.8	20.0	20.7	20.6	19.7	4.7	31.6
	Bloques de concreto traslúcido-PCM	18.9	18.2	19.2	19.4	17.4	16.3	16.3	17.2	18.5	18.9	19.8	19.8	18.3	3.4	22.4
Techos	Falso techo-PCM	16.4	15.7	16.5	16.8	15.0	13.9	13.7	14.6	15.9	16.3	17.3	17.6	15.8	0.8	5.7
	De concreto-PCM	18.9	18.1	19.1	19.3	17.3	16.2	16.2	17.1	18.4	18.9	19.8	19.7	18.2	3.3	21.8
Pisos	Alveolar-PCM	18.9	18.3	19.1	19.1	17.4	16.4	16.4	17.3	18.4	18.8	19.6	19.5	18.3	3.3	22.0
	Láminas de yeso-PCM	18.9	18.2	19.1	19.2	17.4	16.3	16.4	17.2	18.4	18.9	19.7	19.6	18.3	3.3	22.0
Propuesta	De aislamiento térmico	21.8	20.9	22.0	22.1	20.5	19.5	19.7	20.4	21.9	22.3	22.9	22.6	21.4	6.4	42.7

D. Techo de concreto-PCM

En la Tabla 2, se presenta la variación mensual de la temperatura en el año 2018 para diferentes escenarios. Se puede notar que al variar los meses del año de enero a diciembre la temperatura en el techo de concreto-PCM tiene un comportamiento variable similar a las temperaturas en Imata y en la vivienda de control. Se tiene como resultado que la temperatura en el Techo de concreto-PCM tiene un valor inicial de 18.75 °C en el mes de enero, un valor de 19.34°C en abril, un valor de 16.15 °C en junio, un valor de 19.7°C en diciembre, representando en promedio anual un incremento del 21.78% con respecto a la temperatura en la vivienda de control y un aumento de 258.63% respecto a la temperatura en Imata.

El autor [34], realiza el estudio de la variación de las temperaturas en un periodo de 24 horas utilizando un techo con PCM con la diferencia de enfocar el estudio en la búsqueda de cuál es la pendiente que le dará mayor eficiencia térmica al techo. Como resultado se obtiene una temperatura mínima en la capa intermedia de la habitación sin PCM de 19 °C para las 5 horas, 6 horas y las 9 horas. En cambio, en la habitación con PCM se obtuvieron temperatura de 20.86,21.44°C y 22.61°C para las 5 horas para los techos de inclinación de 0°, 2° y 4° respectivamente. Representando un incremento de la temperatura de 9.78%, 12.84% y 19% respectivamente. La Ref. [35], realiza el estudio de la variación de las temperaturas en un periodo de 24 horas mediante el uso de un sistema de un techo a base de una losa alveolar y una capa de PCM. Los resultados muestran las temperaturas de la ciudad estudiada más fría, Harbin, sin el uso de PCM: temperatura inicial de 29°C, una temperatura a las 6 horas de 25.5 °C, una temperatura a las 12 horas de 29.5°C En la habitación de techo PCM se obtuvo una temperatura inicial de 30°C, una temperatura a las 6 horas de 29 °C, una temperatura a las 12 horas de 30°C. Como conclusión se tiene que la habitación de PCM logra un aumento promedio de la temperatura en un 7.59% respecto a las temperaturas medidas sin PCM para las primeras 12 horas

La Ref. [33] muestra que el aumento de estos techos con capas de PCM se logra porque el material incrementa el porcentaje de radiación que se refleja de las superficies de los techos, mediante el almacenamiento del calor latente, el flujo de calor que atraviesa al interior de la edificación por medio del techo y el flujo de calor de la superficie del techo al ambiente.

E. Piso Alveolar-PCM

En la Tabla 2, se presenta la variación mensual de la temperatura en el año 2018 para diferentes escenarios. Se puede apreciar que al variar los meses del año de enero a diciembre la temperatura en el piso alveolar-PCM tiene un comportamiento variable similar a las temperaturas en Imata y en la vivienda de control. Se tiene como resultado que la temperatura en el piso Alveolar-PCM tiene un valor inicial de 18.86 °C en el mes de enero aumentando a 19.07°C para el mes de abril, disminuye para el mes de junio al valor de 16.44 °C, vuelve aumentar hasta al mes de diciembre al valor de 19.5°C, representando en promedio anual un incremento del 22.040% con respecto a la temperatura en la vivienda de control y un aumento de 259.32% respecto a la temperatura en Imata.

La Ref. [36], realiza el estudio de la variación de las temperaturas en un periodo de 24 horas utilizando un piso alveolar relleno de capsulas de PCM y estudia el porcentaje óptimo de PCM. Como resultado se obtiene que el contar con un 50% de PCM en el piso alveolar se obtiene una temperatura promedio de 24 °C mientras que en el piso alveolar sin PCM mantiene una temperatura promedio de 23°C. Esto representa un aumento de la temperatura en 4.34%. La Ref. [37], realiza el estudio de la variación de las temperaturas en un periodo de 24 horas utilizando un piso alveolar con una doble capa de capsulas de PCM y una habitación de referencia; los resultados indican que la habitación de referencia tiene una temperatura inicial de 10.5°C y final de 10 °C, mientras que en el piso alveolar relleno con PCM una temperatura inicial de 16.5°C y final de 16°C, representando un aumento de la temperatura promedio en 57.14%. en comparación a la habitación de referencia. La Ref. [38], indica que este comportamiento se debe a que al integrarse el PCM en la edificación se reduce la amplitud de las fluctuaciones del aire de la temperatura interna la

cual está directamente relacionada con las ganancias solares producidas por la radiación solar y el almacenamiento del calor latente.

F. Piso de láminas de yeso-PCM

En la Tabla 2, se presenta la variación mensual de la temperatura en el año 2018 para diferentes escenarios. Se puede apreciar que al variar los meses del año de enero a diciembre la temperatura en el piso de láminas de yeso-PCM tiene un comportamiento variable similar a las temperaturas en Imata y en la vivienda de control. Se tiene como resultado que la temperatura en el piso de láminas de yeso-PCM tiene un valor inicial de 18.87 °C en el mes de enero aumentando a 19.15°C para el mes de abril, disminuye para el mes de junio al valor de 16.34 °C, vuelve aumentar hasta al mes de diciembre al valor de 19.58°C, representando en promedio anual un incremento del 22.032% con respecto a la temperatura en la vivienda de control y un aumento de 259.37% respecto a la temperatura en Imata.

La Ref. [39], realiza el estudio de la variación de la temperatura en un periodo de 72 horas utilizando un sistema de pisos de láminas de yeso-PCM y una habitación referencial. Los resultados alcanzados indican que en la habitación referencial la temperatura inicial a las 0 horas es de 18°C aumentado a 19°C a las 24 horas y a 18°C a las 54 horas y finaliza a una temperatura de 19 °C a las 72 horas, mientras que en el piso de láminas de yeso-PCM la temperatura inicial a las 0 horas es de 19°C aumentando a 20°C a las 24 horas y a 19°C a las 54 horas y finaliza a una temperatura de 19.5 °C a las 72 horas. Esto representa un aumento promedio de la temperatura en 5.55%. en comparación a la temperatura de un muro referencial. La Ref. [22], se estudia la variación de las temperaturas en un periodo de 35000 segundos(seg.) para un piso radiante de doble capa en donde se usan dos tipos de PCM y otro sin PCM, se obtiene que la temperatura inicial del piso sin PCM es de 10°C a los 0 seg., a los 10000 seg. es de 20°C y a los 35000 seg. es de 13°C. En cambio, en el piso con PCM la temperatura inicial a los 0 seg. es de 10°C, a los 10000 seg. es de 22.5°C y a los 35000 seg. de 15°C, representando un promedio de la temperatura en 12.5% en comparación a la sin PCM. La Ref. [40], indica que este comportamiento se debe a que el material mejora los problemas de baja conductividad térmica en las superficies de piso, lo que produce una reducción de la pérdida del calor almacenado en las otras capas del sistema de piso.

b. Propuesta de aislamiento térmico

La propuesta final está basada en el estudio de las soluciones constructivas de muros, techos y pisos. De los resultados y comparaciones se desarrolló un modelo nuevo utilizando las soluciones constructivas de muro trombe- PCM, piso alveolar-PCM y techo de concreto de PCM. Además, para mejorar los cerramientos internos de la vivienda se colocaron ventanas de doble hoja y puertas macizas con bordes hechos a

base de materiales aislantes. Finalmente se colocaron columnas y vigas para poder soportar el peso de los nuevos sistemas constructivos.

En la Tabla 2, se presenta la variación de los meses del año 2018 sobre la temperatura para diferentes escenarios: ciudad de Imata, una vivienda de adobe, designada como control, y la propuesta final desarrollada en la investigación. Los resultados indican que la temperatura en la propuesta final tiene un comportamiento variable similar a las temperaturas en Imata y en la vivienda de control, teniendo un valor de 21.8°C en el mes de enero, de 22.08°C en abril, de 19.48 °C en junio y de 22.56°C en diciembre, representando en promedio un incremento anual del 42.71% con respecto a la temperatura en la vivienda de control y un aumento de 320.28% respecto a la temperatura en Imata.

La Ref. [41], realiza el estudio de la variación de la temperatura en un periodo de 24 horas sobre la temperatura de una habitación con PCM en comparación a una sin PCM en las ciudades de Tehran, Tabriz, Bandar Abbas, Shiraz y Yazd. Se simuló el modelo de la habitación con PCM cambiando el PCM de posición en el cerramiento de la habitación para saber la ubicación óptima. Se obtuvo una tendencia variable; los resultados indican que la temperatura promedio inicial en la habitación con PCM es de 20°C, de 23°C a las 12 horas y de 17°C a las 24 horas y la habitación sin PCM tiene una temperatura promedio inicial de 18°C, 20°C para las 12 horas, de 15°C a las 24 horas, representando aumentos en la temperatura de 13.15% con respecto a la temperatura de la habitación sin PCM. La Ref. [15], usando soluciones constructivas en los muros externos e internos, los techos planos y losas de concreto con un PCM se estudia la efectividad del PCM para reducir o aumentar cargas de calor y temperaturas en el periodo de Julio a Noviembre, alcanzando tendencias variables. Los resultados indican que la temperatura en la habitación con PCM tiene un valor promedio de 26°C en julio, un valor de 25 °C en septiembre y un valor de 21°C en noviembre. Mientras que la temperatura del ambiente tiene un valor promedio de 21 °C en julio, de 22 °C en septiembre y de 12°C en noviembre. Estos resultados indican un aumento de la temperatura promedio respecto a la temperatura del ambiente en 37.48 % . La Ref. [42], mediante el uso de muros de placas de yeso con PCM, estudia la efectividad del PCM para reducir o aumentar las temperaturas en el periodo de Julio a Noviembre, alcanzando tendencias similares. Se realizó el estudio en dos habitaciones: habitación de referencia y habitación-PCM. Los resultados indican que la temperatura habitación con PCM reduce en 0.6°C la temperatura del aire, aumenta en 0.8°C la temperatura de conducción y en 1.2 °C la temperatura de la superficie del muro. Esto representa un aumento del 6.66% respecto a la temperatura del muro sin PCM.

3.2 Prototipo de aislamiento térmico para muro

En la Fig. 10, se muestra el prototipo de aislamiento térmico para el muro a escala 1:500, allí podemos ver 4 capas de materiales compuestos por: concreto y vidrio doble, material de fase (PCM), poliestireno expandido y bloques de adobe. Asimismo, se identifican los componentes de este.



Fig. 10 Prototipo de aislamiento térmico para muro.

En la Fig. 11, se observa la primera capa de filamento PLA impreso en 3D de 19x16cm y de espesor de 15mm que representa al concreto y también el acrílico de 17x8cm y 2mm de espesor que representa al vidrio doble.



Fig. 11 Primera capa compuesta por concreto y vidrio doble.

En la Fig. 12, se puede ver la segunda capa de cartón, material flexible de 19x16cm y de 1mm de espesor que, en este caso, representa al PCM.



Fig. 12 Segunda capa compuesta por cartón.

En la Fig. 13, se visualiza la tercera capa, perteneciente al foam de 19x16 cm y de 4mm de espesor, este material representa al poliestireno expandido.



Fig. 13 Tercera capa compuesta por foam.

En la Fig. 14, se muestra la cuarta capa de MDF (fibra de densidad media) de 19x16 cm y de 3mm de espesor que representa a los bloques de adobe.



Fig. 14 Cuarta capa compuesta por MDF.

IV. CONCLUSIONES

El PCM absorbe la radiación solar del día para liberarla en la noche, aumentando la inercia térmica de la vivienda de adobe en climas fríos.

Los sistemas de aislamiento analizados para el Techo-PCM, Muro-PCM y Piso-PCM, simulan de forma eficiente el comportamiento de los cerramientos interiores de la vivienda de adobe ante la temperatura interna, aislamiento y balance térmico.

La propuesta final de aislamiento para la vivienda conformada por muro Trombe-PCM, techo de Concreto-PCM y piso Alveolar-PCM, reducen totalmente las horas de discomfort térmico, ya que las temperaturas internas son sostenidas y los puentes térmicos reducidos al mínimo.

El prototipo realizado del muro Trombe-PCM como aislamiento térmico permite visualizar los diferentes elementos componentes, reconocer sus características técnicas y hacer modificaciones y correcciones en el diseño para la elaboración del sistema final.

REFERENCIAS

- [1] S.Gosling, G. McGregor and A. Páldy, Climate change and heat-related mortality in six cities Part 1: model construction and validation. *International Journal Biometeorol*, vol. 51, no. 6, p. 525-540, 2007.
- [2] N. Cavalagli, et al, Hierarchical environmental risk mapping of material degradation in historic masonry buildings: An integrated approach considering climate change and structural damage, *Construction and Building Materials*, vol. 215, pp. 998-1014, 2019.
- [3] F. Corvo, et al, Influence of Air Pollution and Humidity on Limestone Materials Degradation in Historical Buildings Located in Cities Under Tropical Coastal Climates, *Water Air Soil Pollut*, vol. 205, p. 359-375, 2010.
- [4] A. Olukoya and S. Kurt, Environmental impacts of adobe as a building material: The north cyprus traditional building case, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 4, pp. 32-41, 2016.
- [5] N. Engin, et al, Climatic effect in the formation of vernacular houses in the Eastern Black Sea region, *Building and Environment*, vol. 42, no. 2, p. 960-969, 2007.

- [6] T. Piani , et al, Dynamic behaviour of adobe bricks in compression: The role of fibres and water content at various loading rates, *Construction and Building Materials*, vol. 230, 2020.
- [7] S. Bodach, W. Lang and J. Hamhaber, Climate responsive building design strategies of vernacular architecture in Nepal, *Energy and Buildings* , vol. 81, pp. 227-242, 2014.
- [8] M. Parra-Saldivar and W. Batty, Thermal behaviour of adobe constructions, *Building and Environment*, vol. 41, p. 1892–1904, 2006.
- [9] S. Martín, F. Mazarrón and I. Cañas, Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia, *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 5, p. 666–676, 2010.
- [10] F. Martínez-Camacho, et al, Texture of nopal treated adobe: restoring Nuestra Señora del Pilar mission, *Journal of Archaeological Science*, vol. 35, no.6, pp. 1125-1133, 2008.
- [11] E. Quagliarini, M. D’Orazio and S. Lenci, The properties and durability of adobe earth-based masonry blocks, *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks*, Ancona, 2015, pp. 361-378.
- [12] S. Chandel, V. Sharma and B. Marwah, Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 459-477, 2016.
- [13] D. Daudon, et al, Adobe construction modeling by discrete element method: first methodological steps, *Procedia Economics and Finance*, vol. 18, p. 247 – 254 , 2014.
- [14] R. Ooka, Field study on sustainable indoor climate design of a Japanese traditional folk house in cold climate area, *Building and Environment*, vol. 37, no. 3, p. 319–329, 2002.
- [15] B. Nghana and F. Tariku, Phase change material’s (PCM) impacts on the energy performance and thermal comfort of buildings in a mild climate, *Building and Environment*, vol. 99, pp. 221-238, 2016.
- [16] M. Alizadeh and S. M. Sadrameli, Indoor thermal comfort assessment using PCM based storage system integrated with ceiling fan ventilation: Experimental design and response surface approach, *Energy & Buildings*, Vols. 188-189, pp. 297-313, 2019.
- [17] M. Saffari, et al, Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model, *Energy and Buildings*, vol. 112, pp. 159-172, 2015.
- [18] S. Li, et al, Numerical study on thermal performance of PCM Trombe Wall, *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2241-2447, 2019.
- [19] S. Wijesuriya, M. Brandt and P. Tabares-Velasco, Parametric analysis of a residential building with phase change material (PCM)-enhanced drywall, precooling, and variable electric rates in a hot and dry climate, *Applied Energy*, vol. 222, pp. 497-514, 2018.
- [20] Y. Berthou, et al, Full scale experimentation on a new translucent passive solar wall combining silica aerogels and phase change materials, *Solar Energy*, vol. 115, pp. 733-742, 2015.
- [21] S. Lu, et al, Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials, *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 159-169, 2016.
- [22] W. Sun, et al, Experimental investigation on the thermal performance of double-layer PCM radiant floor system containing two types of inorganic composite PCMs, *Energy & Buildings*, vol. 211, 2020.
- [23] F. Ishengoma and A. Mtaho, 3D Printing: Developing Countries Perspectives, *International Journal of Computer Applications*, vol. 104, no. 11, pp. 30-34, 2014.
- [24] M. Yossef and A. Chen, Applicability and Limitations of 3D Printing for Civil Structures, *Civil, Construction and Environmental Engineering Conference Presentations and Proceedings*, vol. 35, pp. 237-246, 2015.
- [25] O. Geneidy, W. Ismael and A. Abbas, A critical review for applying three-dimensional concrete wall printing technology in Egypt, *Architectural Science Review*, pp. 438-452, 2019.
- [26] F. Fiorito, Trombe walls for lightweight buildings in temperate and hotclimates exploring the use of phase-change materials for performances improvement, *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 1110-1119, 2012.
- [27] W. Li and W. Chen, Numerical analysis on the thermal performance of a novel PCM encapsulated porous heat storage Trombe-wall system, *Solar Energy*, vol. 188, pp. 706-719, 2019.
- [28] D. Wang, et al, Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics on Trombe walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 124, 2020.
- [29] F. Souayfane, P. Biwole and F. Fardoun, Thermal behavior of a translucent superinsulated latent heat energy storage wall in summertime, *Applied Energy*, vol. 217, pp. 390-408, 2018.
- [30] S. Pagliolico, et al, A preliminary study on light transmittance properties of translucent concrete panels with coarse waste glass inclusions, *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1811-1816, 2015.
- [31] S. Lu, et al, Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials, *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 159-169, 2016.
- [32] N.Yahaya and H. Ahmad, Numerical Investigation of Indoor Air Temperature with the Application of PCM Gypsum Board as Ceiling Panelsin Buildings, *Procedia Engineering*, vol. 20, pp. 238-248, 2011.
- [33] K. Roman, T. O'Brien, J. Alvey and O. Woo, Simulating the effects of cool roof and PCM (phase change materials) based roof to mitigate UHI (urban heat island) in prominent US cities, *Energy*, vol. 96, pp. 103-117, 2016.
- [34] D. Bhamare, M. Rathod and J. Banerjee, Numerical model for evaluating thermal performance of residential building roof integrated with inclined phase change material (PCM) layer, *Journal of Building Engineering*, vol. 28, 2020.
- [35] J. Yu, et al, Study on thermal insulation characteristics and optimized design of pipe-embedded ventilation roof with outer-layer shape-stabilized PCM in different climate zones, *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 1609-1622, 2020.
- [36] L. Royon, L. Karim and A. Bontemps, Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of buildings, *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 385-390, 2014.
- [37] S. Lu, B. Xu and X. Tang , Experimental study on double pipe PCM floor heating system under different operation strategies, *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1280-1291, 2020.
- [38] J. Belmonte, P. Eguia and J. Almendros-Ibáñez, Thermal simulation and system optimization of a chilled ceiling coupled with a floor containing a phase change material (PCM), *Sustainable Cities and Society*, vol. 14, pp. 154-17, 2015.
- [39] H. Wang, et al, Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight building in Shangai, *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 52-64, 2020.
- [40] E. Markarian and F. Fazelpour, Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM, *Solar Energy*, vol. 191, pp. 481-496, 2019.
- [41] A. Figuereido, et al, Indoor thermal comfort assesment using different constructive solutions incorporating PCM, *Applied Energy*, vol. 208, pp. 1208-1211, 2017.
- [42] S. Li, et al , Numerical study on thermal performance of PCM Trombe Wall, *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2441-2447, 2019.