

Comparison of thermal conductivity of traditional and PET reinforced adobe masonry units to improve thermal comfort in buildings

Hanco Chire, Luis, Bachiller¹ , Mansilla Cárdenas, Irwin, Bachiller² , Delgado Meneses, Patricia, Magister³  and Ibárcena Ibárcena, Valkiria Raquel, Magister⁴ 

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18210543@utp.edu.pe, U20224233@utp.edu.pe, c16692@utp.edu.pe, c19684@utp.edu.pe

Abstract– The objective of the research was to improve adobe masonry units reinforced with recycled PET to create an ecological material with the addition of aloe that can be applied in buildings in cold climates with thermal discomfort. For this purpose, a basic experimental methodology was used, based on traditional empirical techniques, with the use of a thermal camera to determine thermal conductivity. The results show better behavior of the material created with 10% of Polyethylene terephthalate (PET) clay soil, which is the most efficient because it can absorb more heat energy and transmit heat, as opposed to traditional adobe samples. This research presents a significant contribution by establishing ancestral dosages, little known in the scientific field, from a basic experimentation process.

Keywords-- Adobe, PET, Thermal conductivity.

Comparación de la conductividad térmica de unidades de albañilería de adobe tradicional y reforzado con PET para mejorar el confort térmico en las edificaciones

Hanco Chire, Luis, Bachiller¹, Mansilla Cárdenas, Irwin, Bachiller², Delgado Meneses, Patricia, Magister³ and Ibárcena Ibárcena, Valkiria Raquel, Magister⁴
^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18210543@utp.edu.pe, U20224233@utp.edu.pe, c16692@utp.edu.pe, c19684@utp.edu.pe

Resumen– El objetivo de esta investigación fue mejorar las unidades de mampostería de adobe reforzadas con PET reciclado para crear un material ecológico con adición de aloe que pueda aplicarse en edificios de climas fríos con desconfort térmico. Para ello, se utilizó una metodología experimental básica, basada en técnicas empíricas tradicionales, con el uso de una cámara termográfica para determinar la conductividad térmica. Los resultados muestran un mejor comportamiento del material creado con suelo arcilloso con un 10 % de tereftalato de polietileno (PET), siendo el más eficiente porque puede absorber más energía térmica y transmitir calor, frente a las muestras tradicionales de adobe. Esta investigación presenta una contribución significativa al establecer las dosificaciones ancestrales, poco conocidas en el ámbito científico, a partir de un proceso de experimentación básica.

Palabras clave-- Adobe, PET, Conductividad térmica

I. INTRODUCCIÓN

Las técnicas tradicionales con adobe se han perdido en los últimos años y su uso con otros materiales para conseguir confort en los ambientes arquitectónicos son poco estudiados. Por lo que, [1] menciona que el comportamiento estructural del adobe es deficiente y se debe de aplicar estrategias de modernización de bajo costo que permitan mejorar la resistencia de este ante los movimientos sísmicos. Es de esta manera que algunas investigaciones como [2] resaltan el potencial que tienen los aditivos poliméricos en la industria de la construcción para reducir el consumo de materias primas y mejorar las propiedades físicas de las unidades de albañilería de adobe. Teniendo en cuenta que las botellas de plástico compuestas de PET son una de las fuentes de contaminación más grandes y problemáticas por su alto volumen de producción y su lenta degradación [3] [4]. Por tal motivo, [5] definen la contaminación ambiental como una alteración no deseada en las condiciones del entorno natural, que puede manifestarse en aspectos físicos, químicos o biológicos, ya sea en el suelo, aire y agua, lo cual se hace evidente en la vida vegetal y animal.

El uso del PET como material de construcción y aditivo ha sido empleado de diferentes maneras, por ejemplo [6], [7] y [8] utilizaron desechos plásticos pulverizados con arcilla y

agua con una dosificación de 1:2 a 1:6. De la misma manera, [9] emplearon fibras sintéticas de polietileno reciclado (R-PE) las cuales se obtuvieron de redes de pesca usadas, adicionadas a sedimentos, grava limosa y agua para formar bloques de albañilería. Por otro lado, [10] elaboró una mezcla con partículas PET escamosas y trituradas, las cuales fueron pasadas por un tamiz de 10 mm, a las cuales a parte del polvo de arcilla residual (CBP) y el agua se les añadió un aditivo superplastificante para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, la cual se dejó secar entre 7 a 28 días para un mayor endurecimiento. En cambio, [11] utilizaron los recipientes de plástico PET como unidades de albañilería, las cuales después de ser lavadas se llenan con arena para luego utilizarse en el asentado de muros en reemplazo de ladrillos unidos con mortero para conformar los muros.

Las pruebas de resistencia a la compresión que llevaron a cabo [12] se realizaron con la preparación de las muestras de ladrillos de mampostería después de permitir que los ladrillos se enfriaran al aire libre durante un período de dos días, se llevaron a cabo ciclos de humedecimiento y secado, los ladrillos se ensayaron a una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min, para eso se empleó la máquina de compresión Avery Dennison para llevar a cabo dichas pruebas, antes de colocar los ladrillos en la cámara de pruebas se procedió a una minuciosa limpieza de ambas placas, para luego calcular la resistencia a la compresión de las muestras sin restricciones. De igual manera, [13] hace una evaluación para siete días con muestras del 20% y 30% con aditivos de PET, mostrando mayor resistencia a la compresión y mejorando estos valores de resistencia a los 28 días en la muestra con 20% de adición de PET. Así mismo, [14] fueron más precisos con las pruebas de compresión a los 7, 28, 60 y 90 días; evidenciando que la contracción por secado de las muestras se hizo en diferentes momentos.

De acuerdo con el proceso de fabricación de unidades de albañilería se observa que [15] realizan la clasificación de materiales reciclados de PET en base a los resultados del tamizado y valor del pH; prosiguiendo con el método de compactación Proctor el cual prepara el suelo para verificar

que sea lo más denso y resistente posible, evidenciando los índices de contenido de humedad óptima y la densidad seca máxima en seis mezclas diferentes. Del mismo modo, [16] emplean una metodología de análisis del contenido de humedad en las muestras, para ello los bloques de adobe se mantuvieron en un invernadero durante doce horas evitando así la pérdida de humedad. Por otro lado, [17] emplearon una metodología de corrección del suelo arcilloso utilizado para elaborar los bloques, por lo cual se agregó arena en proporción de 600 gr por cada 1000 gr de suelo arcilloso, lo que permitió tener más trabajabilidad reduciendo el uso del agua y así se redujo drásticamente el agrietamiento, con esto se pudo enfocar el estudio en métodos de prueba que permitían comprobar la fuerza de compresión y tenacidad de los bloques de albañilería.

En el aspecto tecnológico, [4] y [10] utilizaron un microscópico electrónico de barrido (SEM) para poder determinar la porosidad de las muestras, revelando que los bloques de arcilla con adición de partículas PET presentaban flóculos viscosos con arena en su estructura interna lo cual hace más homogénea su estructura. Así mismo, [18] concluyeron que la estructura interna de los elementos de arcilla adicionados con PET posee una estructura irregular y por tal motivo las estructuras de menor tamaño pueden ocupar estos espacios, esto se consiguió a través del uso de un microscopio electrónico de barrido y haciendo un análisis morfológico. De la misma manera, [19] usaron un difractor de rayos X para tener un análisis más exhaustivo de la composición química de los ladrillos de arcilla adicionados con PET, los cuales se les sustrajeron unas muestras pequeñas para su observación con dicho instrumento.

Con respecto a los resultados, [3] mencionan tras someter sus muestras a un ensayo de conductividad térmica empleando una placa calefactora protegida para someter sus muestras al calor, que la conductividad térmica es más baja entre más aumenta el porcentaje de PET presente en la composición interna del ladrillo. Así mismo, [17] indican que la incorporación de fibras de desecho de polímeros reforzados con fibra de vidrio tiene un efecto beneficioso en el adobe, puesto que la resina impregnada en las fibras proporciona una textura más áspera a la mezcla, lo cual permite una mayor adherencia y cohesión del suelo con los ladrillos de adobe reforzados con fibra de vidrio. Finalmente, [20] concluye que el uso del PET como aditivo en la industria de la construcción ayudará a reducir las cantidades de desechos de tipo plástico, los cuales son de lenta degradación, logrando reducir progresivamente el uso de materiales de construcción tradicionales, el consumo de materias primas y recursos no renovables.

Tras una revisión de investigaciones previas acerca del uso del PET como aditivo, se evidencia un consenso acerca del potencial que reside en el reciclaje y utilización del PET (tereftalato polietileno) como aditivo polimérico en forma de partículas y gránulos para mejorar la conductividad térmica en las unidades de albañilería. Por lo que el objetivo general de

esta investigación es comparar la conductividad térmica entre las unidades de albañilería de adobe tradicional y las adicionadas con PET a partir de la identificación de las metodologías óptimas del uso y empleo del PET como aditivo polimérico, elaboración de muestras de adobe al natural y muestras con adición de PET y evaluación de la conductividad térmica en las muestras de adobe adicionadas con partículas PET.

II. METODOLOGÍA

A. Mezcla convencional de adobe (pre experimento 1)

Se efectuó la revisión de métodos teóricos de análisis bibliográfico para la elaboración del adobe tradicional y adobe con adición de PET, para esta investigación se tomó como referencia consultas sobre las técnicas ancestrales a personas que aún elaboran estos materiales y también del manual para la elaboración de adobe estructural del Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la construcción (SENCICO), el cual detalla paso a paso como se debe de hacer las mezclas, proporciones y pruebas empíricas que se pueden realizar a la arcilla para ver su calidad y además una prueba de resistencia que se puede realizar a los ladrillos de adobe ya secos, además de la adición del aloe extraído de la pala de tuna para mejorar la adherencia de la arcilla (Fig. 1).

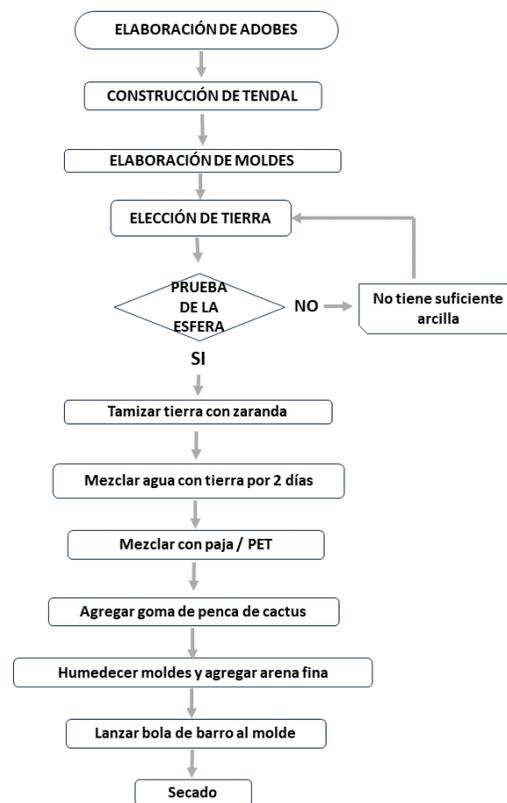


Fig. 1 Diagrama flujo de elaboración de unidades de albañilería de adobe.

Se realizó ensayos con bloques de adobe de 6 cm x 10 cm x 20 cm, para poder experimentar los procesos de fabricación

existentes y determinar un procedimiento de producción de adobe que sea óptimo. Además, se realizó los ensayos con las proporciones propuestas por los autores para determinar los porcentajes de adición de PET que sean más adecuados según el tipo de tierra. Para ello, se decidió emplear un molde de madera para la elaboración de las muestras con las siguientes proporciones para incluir el PET: 5%, 10% y 15%, ya que estas muestras fueron las más estables encontradas en los ensayos preliminares.

B. Preparación de las muestras

En primer lugar, se adquirieron los materiales necesarios para la investigación (arcilla, arena gruesa y arena fina) de un proveedor de calidad que contara con las fichas técnicas respectivas, lo cual permitió reducir tiempo en la investigación al prescindir del estudio granulométrico de cada material. La arena gruesa y fina que se utilizó es de una marca comercial que cumple con la norma ASTM C-33 y la norma técnica peruana NTP 400.037.

En segundo lugar se hicieron las pruebas empírico-analíticas a la arcilla tales como la prueba de “la esfera” para verificar la adherencia de la arcilla, la cual consiste en elaborar 5 esferas de la mezcla de 2 cm de diámetro y dejar secando por dos días bajo sombra, después del cual se hará presión manualmente sobre las esferas entre el pulgar y el dedo índice, si la esfera se rompe indica que la mezcla no tiene la suficiente arcilla, si en cambio la esfera resiste la presión la mezcla es ideal. La segunda prueba de los “bastones” consistió en formar bastones en forma de rollo con la mezcla de 2 cm de diámetro con las palmas de las manos, si los bastones se forman entre 5 cm y 15 cm quiere decir que la mezcla es apropiada y que contiene arcilla y arena adecuadas; en cambio si el bastón se rompe antes que mida los 5 cm de largo significa que la mezcla tiene más arena que arcilla; y por último si el bastón mide más de 15 cm y no se flexiona indica que la tierra tiene más arcilla.

En tercer lugar, para la inclusión de esta metodología experimental de adición de partículas de PET en la elaboración de bloques de adobe se sustituyó la paja tradicional por el PET cortado en cintas de 2.5 a 3 mm en diferentes dosificaciones como se muestra en la Figura 2 y en paralelo se elaboró los ladrillos de adobe en forma tradicional. Para la elaboración del adobe tradicional se utilizó los siguientes materiales: arena gruesa, arena fina, arcilla (greda), paja, pala de *opuntia ficus-indica* (aloe) y PET solo para las muestras de adobe reforzado, el cual se agregó en dosificaciones por porcentajes (5%, 10%, 15%), según [5] la forma, tamaño y modo de combinación varía según las muestras de prueba.



Fig. 2 Incorporación del PET a la mezcla de Adobe según sea la dosificación de cada muestra (5%, 10%, 15%).

En cuarto lugar se elaboró las muestras de arcilla en su formato real, según los siguientes pasos: a) Se preparó la arcilla mezclada con agua y se dejó reposar durante dos días, con una dosificación de 1:6 tal como se aprecia en la Figura 3, a esta técnica ancestral le llaman “hacer dormir al barro”, b) Posterior a ello se hizo la mezcla con arena gruesa en dosificaciones de 1:5 haciendo un previo tamizaje de la arena para evitar que alguna impureza o residuo contamine la mezcla, c) A la mezcla se añadió la paja y se combinó hasta tener una mezcla homogénea y libre de burbujas, d) Se colocó la mezcla en los moldes de 20 cm x 40 cm con su respectivo secado por 4 semanas y se realizó el volteo y cambio de superficie para un secado regular y posterior a ello se apilaron las muestras para un mejor proceso de secado.



Fig. 3 Proceso de maduración del barro dormido

C. Ensayo de conductividad térmica.

La medición de la conductividad térmica en las muestras de adobe se realizó con una metodología experimental, al no tenerse un precedente de este tipo de pruebas para elementos de albañilería de adobe y al no existir una normativa clara que controle las pruebas antes mencionadas. A continuación se detalla esta metodología:

En el laboratorio se ubicó una fuente de calor constante, para este caso se empleó un calentador eléctrico marca Recco de 1800W Nd-187H, el cual fue encendido a su máxima potencia y se dejó calentar por 15 minutos para lograr que el calor se estabilice. Así mismo se tomó la medida del calor emitido por el calentador al paso del tiempo antes mencionado para que su calor se estabilice y además en paralelo se tomó la temperatura de las muestras de adobe con la ayuda de una cámara termográfica marca FLIR modelo C3-X (Figura 4).



Fig. 4 Medición del calor emitido por el calentador eléctrico mediante cámara termográfica.

Previo a esto se hizo una codificación de las muestras (Figura 5) de adobe realizadas para poder hacer la comparación entre ellas, lo cual se observa en la Tabla 1.

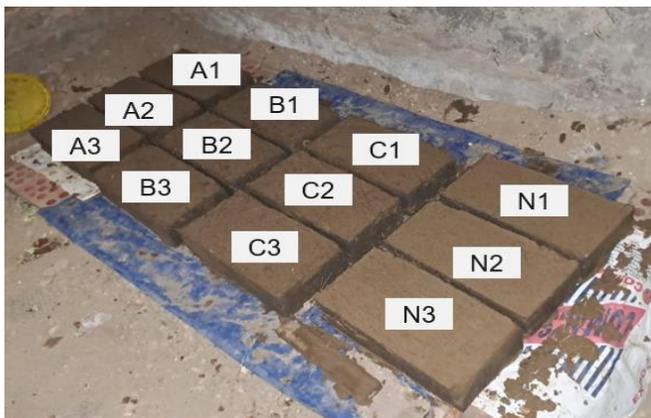


Fig. 5 Codificación de las muestras realizadas.

TABLA I
PORCENTAJE DE ADICIÓN DE PET EN LAS MUESTRAS DE ADOBE

MUESTRA DE ADOBE	CANTIDAD	% ADICIÓN PET
N1	1.00	0%
A1	1.00	5%
B1	1.00	10%
C1	1.00	15%
N2	1.00	0%
A2	1.00	5%
B2	1.00	10%
C2	1.00	15%

Continuando con el experimento, se procedió a ubicar las muestras a 15 cm de distancia de la fuente de calor (calentador eléctrico), posteriormente se dejaron expuestas a dicho calor y al cabo de 3 minutos se realizó la medición del calor con la cámara termográfica en el lado expuesto directamente al calor del calentador el cual se denominó “LA” para medir el calor por radiación obtenido por la muestra. Seguidamente se realizó la medición del calor en el lado opuesto de la muestra el cual se denominó “LB” para medir la cantidad de calor por conducción que la muestra recibió tal como se observa en la Figura 6. Se hizo 3 mediciones en 3 intervalos de 3 minutos a cada una de las muestras de adobe en el siguiente orden: primero la muestra de adobe tradicional (N1), seguidamente la muestra de adobe adicionada con PET al 5% (A1), luego la muestra de adobe adicionada con PET al 10% (B2) y finalmente la muestra de adobe con el 15% de PET (C1). Seguidamente se realizó una segunda ronda de mediciones con las otras muestras N2, A2, B2 y C2 en ese mismo orden.

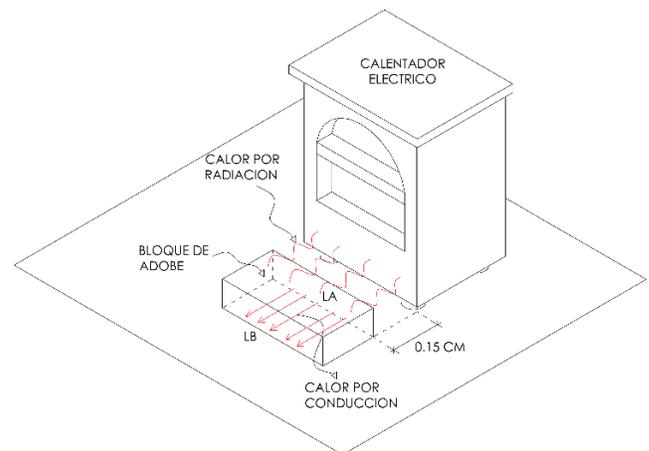


Fig. 6 Esquema del proceso de medición del calor por radiación y conducción obtenidos por las muestras de adobe.

III. RESULTADOS

En la Tabla II, se evidencia la transferencia de calor por radiación en el lado A y la transferencia de calor por conducción en el lado B. En el lado A de la muestra N1, se observa un dato atípico debido a que fue una de las primeras mediciones que probablemente puede deberse a la diferencia de temperatura en el ambiente, a diferencia de las demás muestras.

TABLA II
Tabla de temperatura

MUESTRA DE ADOBE	TEMPERATURA DE ESTUFA ELÉCTRICA PROMEDIO (°C)	TEMPERATURA INICIAL	TEMPERATURA A LOS 3 MINUTOS DE EXPOSICIÓN		TEMPERATURA A LOS 6 MINUTOS DE EXPOSICIÓN		TEMPERATURA A LOS 9 MINUTOS DE EXPOSICIÓN	
			Lado A (°C)	Lado B (°C)	Lado A (°C)	Lado B (°C)	Lado A (°C)	Lado B (°C)
N1	122.00	27.10	58.50	27.60	80.50	27.80	80.00	28.00
A1	122.00	24.50	84.70	25.80	93.80	26.50	102.00	26.80
B1	122.00	25.60	78.50	27.70	84.90	29.50	86.20	28.20
C1	122.00	27.90	83.60	29.00	89.50	32.10	91.30	31.90
N2	122.00	24.50	86.50	26.70	94.40	26.60	96.40	28.00
A2	122.00	27.90	82.00	28.20	84.10	29.06	84.50	29.00
B2	122.00	26.90	84.90	27.30	86.00	26.60	89.90	26.30
C2	122.00	24.30	88.00	26.80	93.80	28.10	98.80	28.00

Se observa que las muestras C2, N2 y A1 cuentan con mayor absorción de temperatura del lado A; sin embargo, las muestras C1, A2 y B1 son las tres primeras muestras de adobe del lado B con mayor temperatura. Por lo tanto, las muestras B1 y B2 son las más eficientes porque tienen menor captación de calor en el lado A y transfieren al lado B mayor energía calorífica (Figura 7).

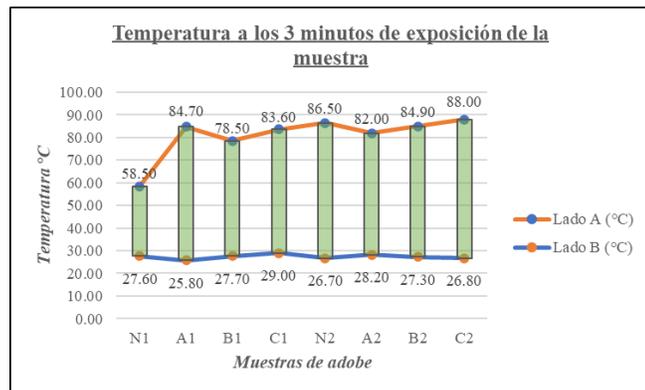


Fig. 7 Gráfico de temperatura a los 3 minutos de exposición de las muestras.

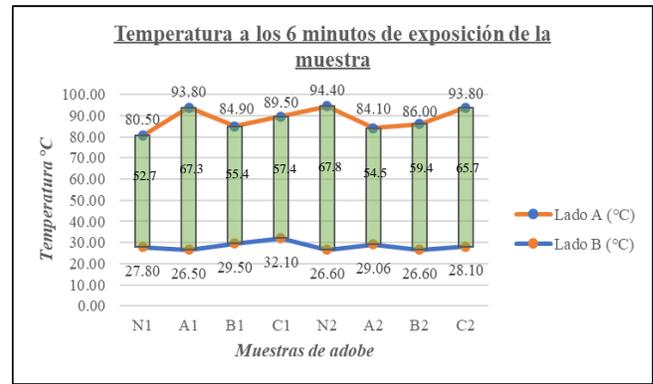


Fig. 8 Gráfico de temperatura a los 6 minutos de exposición de las muestras.

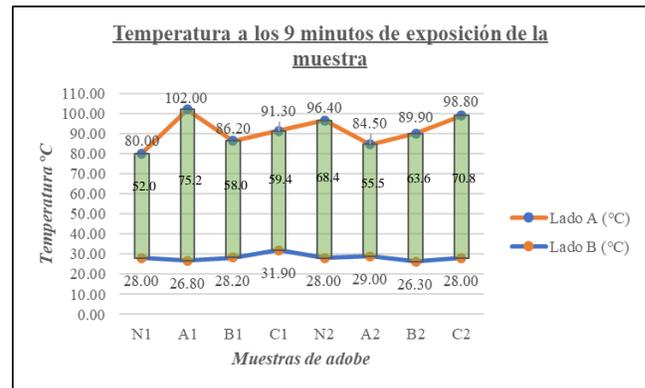


Fig. 9 Gráfico de temperatura a los 9 minutos de exposición de las muestras.

En la Figura 7, 8 y 9 se puede observar que el aumento de temperatura se produce notablemente en el lado A, a diferencia del lado B. Evidenciándose que las muestras B1 y A2 son las más eficientes porque tienen menor captación de calor en el lado A y transfieren al lado B mayor energía calorífica.

Para corroborar que muestras fueron las más eficientes en la transferencia de calor se hicieron los siguientes cálculos para hallar la conductividad térmica de las muestras.

Primero, se realizó la conversión de temperatura de grados centígrados a grados Kelvin bajo la siguiente fórmula:

$$^{\circ}K = ^{\circ}C + 273.15$$

En la Tabla III se muestra la conversión de las temperaturas que se realizó de grados centígrados a grados Kelvin para poder aplicar las formular y verificar las tendencias existentes en cuanto a radiación y conducción en cada una de las muestras.

TABLA III
Tabla de temperatura en Kelvin

MUESTRA DE ADOBE	TEMPERATURA DE ESTUFA ELÉCTRICA (K)	TEMPERATURA A LOS 3 MIN.		TEMPERATURA A LOS 6 MIN.		TEMPERATURA A LOS 9 MIN.	
		Lado A (K)	Lado B (K)	Lado A (K)	Lado B (K)	Lado A (K)	Lado B (K)
N1	395.15	331.65	300.75	353.65	300.95	353.15	301.15
A1	395.15	357.85	298.95	366.95	299.65	375.15	299.95
B1	395.15	351.65	300.85	358.05	302.65	359.35	301.35
C1	395.15	356.75	302.15	362.65	305.25	364.45	305.05
N2	395.15	359.65	299.85	367.55	299.75	369.55	301.15
A2	395.15	355.15	301.35	357.25	302.21	357.65	302.15
B2	395.15	358.05	300.45	359.15	299.75	363.05	299.45
C2	395.15	361.15	299.95	366.95	301.25	371.95	301.15

Segundo, se recurrió a calcular la transferencia de calor por radiación utilizando la Ley de Stefan Boltzmann que a continuación se explica:

Cálculo de la potencia por radiación en el lado A de la muestra de adobe.

$$Q_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A (T_{estufa}^4 - T_{adobe\ lado\ A}^4)$$

Q_{rad} : Potencia radiada neta (W)

ϵ : Constante de emisividad del cuerpo radiante = 1

σ : Constante de Stefan Boltzmann (W/m^2K^4) = $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$

A : Área radiante del objeto emisor (m^2)

T_{estufa}^4 : Temperatura de la estufa (K)

$T_{adobe\ lado\ A}^4$: Temperatura del adobe lado A (K)

TABLA IV
Tabla de potencia por transferencia de calor por radiación

Muestra de Adobe	Potencia a los 3 minutos (W)	Potencia a los 6 minutos (W)	Potencia a los 9 minutos (W)
N1	9.75	6.94	7.01
A1	6.34	4.96	3.63
B1	7.22	6.31	6.12
C1	6.50	5.62	5.35
N2	6.07	4.87	4.55
A2	6.72	6.42	6.37
B2	6.31	6.15	5.56
C2	5.85	4.96	4.16

Tercero, se calculó el flujo de calor por conducción que atraviesa del lado A al lado B de las muestras de adobe, para eso se sustituyó la potencia radiada (W) producto de los resultados de la Tabla IV, en la siguiente fórmula:

Cálculo del flujo de calor por conducción

$$q = \frac{Q_{rad}}{\text{Área}_{adobe\ lado\ A}}$$

q : Flujo de calor (W/m^2)

Q_{rad} : Potencia radiada neta (W)

A : Área del lado A de la muestra (m^2)

TABLA V
Tabla de potencia por transferencia de calor por conducción

Muestra de Adobe	Flujo de calor a los 3 min. (W/m2)	Flujo de calor a los 6 min. (W/m2)	Flujo de calor a los 9 min. (W/m2)
N1	243.75	173.42	175.17
A1	158.41	124.02	90.77
B1	180.38	157.68	152.92
C1	162.39	140.59	133.73
N2	151.81	121.66	113.72
A2	168.12	160.59	159.14
B2	157.68	153.65	139.08
C2	146.24	124.02	104.01

Cuarto, se calculó la conductividad térmica de las muestras de adobe por medio de la Ley de Fourier.

$$q = \frac{k}{e(T_1 - T_2)}$$

∴ Despejando el flujo de calor para hallar la conductividad térmica.

$$k = e \cdot \frac{q}{T_1 - T_2}$$

k : Conductividad térmica (W/m)

e : Espesor de la muestra de adobe (m)

q : Flujo de calor (W/m^2)

T_1 : Temperatura en el lado A de la muestra de adobe (K)

T_2 : Temperatura en el lado B de la muestra de adobe (K)

TABLA VI
Tabla de conductividad térmica

Muestra de Adobe	Conductividad térmica a 3 min(W/mK)	Conductividad térmica a 6 min(W/mK)	Conductividad térmica a 9 min(W/mK)
N1	1.58	0.66	0.67
A1	0.54	0.37	0.24
B1	0.71	0.57	0.53
C1	0.59	0.49	0.45
N2	0.51	0.36	0.33
A2	0.62	0.58	0.57
B2	0.55	0.52	0.44
C2	0.48	0.38	0.29

En la tabla VI, las muestras A2 (5% PET), B2 (10% PET) y B1 (10%) son las que tienen un mayor factor de conductividad térmica constante en los tres periodos que se

midió la temperatura de las muestras. Sin embargo, la muestra C1 (15% PET) es la que mayor temperatura ha transferido del lado A al lado B su conductividad térmica está en cuarto lugar y la muestra de la misma composición C2 (15% PET) disminuye aún más su conductividad térmica. En cambio, las muestras A1 (5% PET) y N2 (0% PET) son las muestras con menor conductividad térmica. En consecuencia, a mayor conductividad térmica de las muestras de adobe (A2, B2 y B1) son mejores conductores del calor; por el contrario, las muestras con menor conductividad térmica (A1 y N2) son más aislantes.

IV. DISCUSIÓN

El adobe es un material versátil pese a las falencias estructurales que presenta como sistema estructural al no existir muchas investigaciones que abordan dicho tema. Al igual que [1], se pudo evidenciar en esta investigación que el adobe es un material con mucho potencial que presenta un bajo costo en su producción y montaje, ya que para su elaboración no se requieren materiales costosos y complicados de obtener. Además, posee gran adaptabilidad para poder trabajar con otros materiales que puedan potenciar sus virtudes, tales como el PET el cual mejora positivamente muchas de sus propiedades, como se pudo apreciar en esta investigación.

Con respecto a los resultados obtenidos en la presente investigación, se pudo verificar que las muestras sometidas al calor producido por el calentador eléctrico muestran gran mejoría con respecto a la absorción del calor ya sea por radiación (del calentador a la muestra) o por conducción (del lado expuesto al calentador al lado opuesto al mismo) lo cual permite evidenciar una mejora en el confort térmico que ofrecen al ser contrastada con el adobe tradicional. Tal como menciona [3] en su investigación, en la presente investigación se comprobó que las muestras con mayor concentración de PET tienen menor conductividad térmica. Sin embargo, cabe aclarar que su metodología es diferente ya que trabajaron con PET triturado, a diferencia de esta investigación que se dispuso al PET en forma de filamentos simulando el uso de la paja de técnica ancestral.

Un factor importante en esta investigación es el reciclaje y utilización del PET como aditivo polimérico en la elaboración de ladrillos de adobe, como se evidencia en el presente artículo el uso del PET como aditivo ofrece una solución al exceso en la producción de residuos de plásticos y el deficiente manejo que se hace de los mismos. Por tal motivo al igual que [3] y [4] se considera que el uso del PET como aditivo en producción de ladrillos de adobe puede ayudar a mitigar el gran problema que significa el exceso de producción de residuos plásticos y el deficiente manejo que se hace de ellos.

En contraposición con lo mencionado por [6], [7] y [8] que establecía porcentajes de 0% a 20% y en proporciones de 1:4,1:6 y 1:8 se pudo establecer en esta investigación que los porcentajes óptimos para el uso del PET como aditivo

polimérico se encuentran entre 5% y 15%, puesto que en este rango el PET tiene una mayor incidencia en la conductividad térmica como se pudo comprobar al finalizar las pruebas de conductividad térmica realizadas con ayuda del calentador eléctrico.

Asimismo, se observó que al ser superior al 15% el PET tiende a hacer que las unidades de albañilería presenten fisuras al generar inestabilidad en su estructura interna y al ser inferior al 5% la variación en comparación al adobe tradicional no es muy significativa. Además, el exceso de porcentaje de adición de PET en el proceso de fabricación de unidades de albañilería de adobe hace más difícil el desmoldado de estos y debilita su estructura interna, también requiere de un mayor gasto de arena fina para el desmoldado lo cual afecta en su presentación y tiende a hacer más irregulares las muestras.

Con respecto a la preparación de las superficies donde se realizó las muestras se recomienda al igual que [15] realizar una preparación adecuada del lugar donde secarán las muestras, así mismo hacer un buen tamizaje y clasificación de los materiales. Por otro lado, al igual que [16] se recomienda controlar la humedad de las muestras y controlar el secado al sol, para poder prevenir el agrietamiento de las muestras por acción del alto porcentaje de incidencia solar.

V. CONCLUSIONES

Al realizar la comparación entre las muestras de adobe tradicional y las muestras de adobe adicionadas con PET (de 5%, 10% y 15%) se observa que las muestras adicionadas con PET tienden a absorber más calor, analizando más específicamente los resultados de las muestras adicionadas en los 3 periodos de tiempo de 3, 6 y 9 minutos, se concluye que la muestra B1 de adobe reforzado con PET al 10% es la más eficiente porque puede absorber mayor energía calorífica que las muestras de adobe tradicional y transmitir más calor.

Las muestras A2 (5% PET), B2 (10% PET) y B1 (10% PET) son las de mayor conductividad térmica, y por el espesor del adobe permite retener el calor ganado evitando pérdidas de calor. Los gráficos de los tres intervalos de tiempo son similares en sus puntos de inflexión y según se amplía la diferencia de tiempo de las muestras, se va haciendo más evidente relación entre absorción y transferencias de energía calorífica.

Una limitante en la realización de este experimento fue el uso del calefactor ya que la fuente de calor no fue constante por acción de su termostato, al no ser instrumento que se pueda calibrar y no tener precisión en sus medidas de calor.

Con respecto al uso del aloe dentro del proceso de producción del adobe, cabe precisar que a pesar de que solo se usa en algunas regiones del Perú, es un gran aporte a la trabajabilidad de la mezcla además mejora la acción conglomerante de la arcilla, por tal motivo se recomienda su uso en la producción de adobe.

Dentro del proceso de producción de los elementos de albañilería de adobe un punto importante a tomar en cuenta en

el secado de dichas muestras es la fuerte radiación que existe en la ciudad de Arequipa, Perú lo cual es un factor para tener en cuenta ya que esto puede provocar una fractura en las muestras si no se las protege de forma adecuada.

Finalmente, se recomienda en futuras investigaciones ampliar la muestra, ya habiendo determinado la cantidad más óptima de inclusión de PET (10%), de tal manera se pueda realizar estadísticas concluyentes en las que se pueda realizar las pruebas de normalidad, comparación de medias y correlaciones.

REFERENCES

- [1] I. Kafodya, F. Okonta, and P. Kloukinas, "Role of fiber inclusion in adobe masonry construction," *Journal of Building Engineering*, vol. 26, p. 100904, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JOBE.2019.100904.
- [2] H. Limami, I. Manssouri, K. Cherkaoui, and A. Khaldoun, "Study of the suitability of unfired clay bricks with polymeric HDPE & PET wastes additives as a construction material," *Journal of Building Engineering*, vol. 27, p. 100956, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2019.100956.
- [3] W. S. Alaloul, V. O. John, and M. A. Musarat, "Mechanical and Thermal Properties of Interlocking Bricks Utilizing Wasted Polyethylene Terephthalate," *Int J Concr Struct Mater*, vol. 14, no. 1, 2020, doi: 10.1186/s40069-020-00399-9.
- [4] A. F. Ikechukwu and A. Naghizadeh, "Conversion of auxiliary wastes for production of masonry bricks: towards conservation of natural clay," *International Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 19, no. 2, 2022, doi: 10.6703/IJASE.202206_19(2).008.
- [5] L. M. S. Segura and J. A. L. Arriaga, Principios básicos de contaminación ambiental. Universidad Autónoma del Estado de México, 2003. [Online]. Available: <https://books.google.com.pe/books?id=pKP2BHi8FVsC>
- [6] J. O. Akinyele, U. T. Igba, and B. G. Adigun, "Effect of waste PET on the structural properties of burnt bricks," *Sci Afr*, vol. 7, p. e00301, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.SCIAF.2020.E00301.
- [7] S. S. Chauhan, B. Kumar, P. Shankar Singh, A. Khan, H. Goyal, and S. Goyal, "Fabrication and Testing of Plastic Sand Bricks," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/691/1/012083.
- [8] V. Kavinkumar, N. Balasubramaniam, P. Gopalakrishnan, and N. Sethuraman, "Development of plastbrick using plastic wastes & PET bottles," *Mater Today Proc*, vol. 68, pp. 2601–2604, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.10.011.
- [9] I. M. G. Bertelsen, L. J. Belmonte, G. Fischer, and L. M. Ottosen, "Influence of synthetic waste fibres on drying shrinkage cracking and mechanical properties of adobe materials," *Constr Build Mater*, vol. 286, p. 122738, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122738.
- [10] M. F. Ahmed, "Effective Use of Waste Plastic As Sand in Metakaolin/Brick-Powder Geopolymer Concrete," *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 473–485, 2023, doi: 10.14525/JJCE.v17i3.09.
- [11] L. Pradeep, S. Pragyan Dash, D. Jivan Pati, and N. Mary Boby, "Determining the feasibility of using PET bottles as construction material in urban context," *Mater Today Proc*, vol. 60, pp. 384–393, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.01.254.
- [12] A. F. Ikechukwu and C. Shabangu, "Strength and durability performance of masonry bricks produced with crushed glass and melted PET plastics," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00542.
- [13] T. R. da Silva *et al.*, "Technological characterization of pet—polyethylene terephthalate—added soil-cement bricks," *Materials*, vol. 14, no. 17, 2021, doi: 10.3390/ma14175035.
- [14] A. Sadrmohtazi, S. Dolati-Milehsara, O. Lotfi-Omran, and A. Sadeghi-Nik, "The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of selfcompacting concrete," *J Clean Prod*, vol. 112, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.107.
- [15] S. Perera, A. Arulrajah, Y. C. Wong, S. Horpibulsuk, and F. Maghool, "Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials," *Constr Build Mater*, vol. 221, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.047.
- [16] F. A. Spósito *et al.*, "Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime," *Journal of Building Engineering*, vol. 32, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101506.
- [17] R. M. Gandia, F. C. Gomes, A. A. R. Corrêa, M. C. Rodrigues, and D. B. Marin, "Physical, mechanical and thermal behaviour of adobe stabilized with the sludge of wastewater treatment plants," *Engenharia Agricola*, vol. 39, no. 6, 2019, doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n6p684-697/2019.
- [18] T. R. da Silva *et al.*, "Technological characterization of pet—polyethylene terephthalate—added soil-cement bricks," *Materials*, vol. 14, no. 17, 2021, doi: 10.3390/ma14175035.
- [19] A. F. Ikechukwu and C. Shabangu, "Strength and durability performance of masonry bricks produced with crushed glass and melted PET plastics," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00542.
- [20] N. Ahmed, "Utilizing plastic waste in the building and construction industry: A pathway towards the circular economy," *Constr Build Mater*, vol. 383, p. 131311, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131311.