

AISLACIÓN TÉRMICA DE ENVOLVENTES DE TIERRA

Cabrera Santiago¹, Anabela Guilarducci², Dianela González³, Mariano Suarez⁴

Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Argentina.

¹spcabrera@outlook.com, ²aguilarducci@frsf.utn.edu.ar, ³dgonzalez@frsf.utn.edu.ar, ⁴msuarez@frsf.utn.edu.ar

Palabras clave: conductividad térmica, transmitancia térmica, construcción con tierra

Resumen

En este trabajo se pretende determinar la conductividad térmica de diferentes elementos constructivos de tierra producidos con materiales característicos del Litoral argentino y evaluar su aptitud para ser empleados en la construcción de envolventes que cumplan con los requerimientos de aislación térmica solicitados por la normativa nacional correspondiente. Para ello se confeccionaron probetas siguiendo las diferentes técnicas de construcción con tierra empleadas en la región (bloque de tierra comprimida, adobe, tapia, quincha y revoques) y se midió su coeficiente de conductividad térmica, con el cual se calculó la transmitancia térmica de diferentes sistemas constructivos de tierra. Los resultados obtenidos indican que las técnicas de construcción con tierra evaluadas presentan, en todos los casos, un mejor desempeño térmico que los tradicionales muros de ladrillo cerámico macizo o bloques de hormigón, siendo la quincha la técnica con mayor capacidad de aislamiento térmico.

1 INTRODUCCIÓN

Frente al contexto de crecimiento continuo de los precios de la energía a nivel mundial y en pos de apoyar los esfuerzos globales de mitigar el calentamiento global, la utilización de envolventes adecuadas a los contextos locales se configura como una estrategia para mejorar la eficiencia energética de los edificios. La elección de envolventes adecuadas presenta beneficios, no sólo en cuanto a los ahorros energéticos de los espacios, la mejora del microclima interior y la reducción de emisiones contaminantes obtenidos, sino también en relación con la viabilidad técnica y económica de un proyecto (Balter et al., 2020).

En este contexto, pueden resaltarse las potencialidades de los muros de cerramiento construidos con tierra, cuya continuidad histórica se debe en gran medida a la abundancia de su materia prima, la economía de sus procesos constructivos, sus cualidades bioclimáticas y a la armonía de su interrelación con el ambiente natural en que se desarrolla (Pacheco-Torgal; Jalali, 2012). Esto lo saben, sustentan y defienden los pueblos con tradiciones locales, especialmente aquellas ligadas a cultos ancestrales con la tierra quienes, con sabiduría popular producen arquitectura adecuándose al clima y costumbres de cada sitio y sociedad, (Fernandes et al., 2019).

Existen numerosas técnicas y sistemas constructivos que emplean tierra como materia prima preponderante (Rotondaro, 2018), sin embargo, éstas pueden clasificarse de manera simplificada dentro de las siguientes categorías:

- Técnicas mixtas: la tierra se emplea como material de relleno y revestimiento, valiéndose de una estructura portante independiente, generalmente construida con madera, siendo las más empleadas en Argentina la quincha, tierra alivianada o paja encofrada y el enchorizado (Esteves; Cuitiño, 2020).
- Técnicas monolíticas: mediante el moldeado directo con las manos o la utilización de encofrados móviles llenos con morteros de tierra compactados o vertidos, se construyen muros monolíticos con capacidad portante. El mayor exponente de estas técnicas es la tapia (Tepale Gamboa, 2016).
- Técnicas de albañilería: aquellas que emplean componentes prefabricados de pequeñas dimensiones, producidos previamente a la construcción de la vivienda. Estos componentes se adhieren entre sí empleando morteros de tierra. Los muros construidos

con bloques de tierra comprimida (BTC) o adobes son ejemplos de estas técnicas (Dorado et al., 2021).

Una de las características más importantes de la tierra como material de construcción se relaciona con sus propiedades térmicas, y es su capacidad de transmitir y acumular calor. Esta capacidad se puede definir en función de 3 propiedades físicas fundamentales: la densidad (ρ), el calor específico (c_p) y la conductividad térmica (λ), a partir de las cuales pueden determinarse la transmitancia térmica de una envolvente (K), directamente vinculada al aislamiento térmico; y la inercia térmica, relacionada con su capacidad de absorber y acumular calor durante las horas de sol y liberarlo en durante la noche (Cuitiño et al., 2020).

El objetivo de este trabajo consiste en determinar el coeficiente de conductividad térmica de diferentes elementos constructivos de tierra producidos con materiales característicos del Litoral argentino, y evaluar su aptitud para ser empleados en la construcción de envolventes que cumplan con los requerimientos de aislación térmica solicitados por la normativa nacional correspondiente.

2 ANTECEDENTES

La medición del coeficiente de conductividad térmica (λ) de diferentes elementos constructivos de tierra ha sido ampliamente estudiado a nivel internacional, resaltándose los artículos publicados por Laborel-Préneron et al. (2018), Saidi et al. (2018) y El Fgaier et al. (2016) en los cuales se determinó el coeficiente de conductividad térmica de adobes; las determinaciones realizadas por Millard y Aubert (2014) sobre bloques de tierra extruidos; y las efectuadas por Cagnon et al. (2014) y Ouedraogo et al. (2020) sobre BTC. Además, son de relevancia las investigaciones realizadas por Mosquera Arancibia (2013) para su tesis doctoral sobre la efectividad de emplear el método de la “aguja caliente” para determinar el λ en adobes y BTC; el estudio realizado por Wieser et al. (2018) en el cual se evaluó la conductividad térmica sobre muestras de quincha, tierra alivianada y morteros de tierra; y la tesis desarrollada por Cabrera Córdova (2019) en la cual se determinó entre otros parámetros, la conductividad térmica de adobes y revoques de tierra.

A pesar de los antecedentes mencionados, en Argentina son pocas las líneas de investigación desarrolladas en pos de cuantificar las propiedades térmicas de los materiales de tierra. En este sentido, se mencionan los trabajos realizados por Costantini Romero et al. (2021) y Costantini Romero y Francisca (2022) en los cuales, se determinó el coeficiente de conductividad térmica de BTC producidos en la ciudad de Córdoba (Argentina) y el realizado por Cuitiño et al (2015) en el que se determinó la transmitancia térmica (K) de diferentes paneles de quincha.

Debe mencionarse que los resultados publicados en las investigaciones referenciadas, a pesar de encontrarse dentro de rangos similares, presentan diferencias significativas motivadas principalmente por el tipo de suelo empleado en la confección de las probetas, la metodología de moldeo de estas y el equipo de ensayo utilizado. En lo que respecta a los equipos y metodologías empleados para la determinación de λ , se han utilizado los denominados métodos de la “caja caliente”, “aguja térmica” y “placas calientes”, los cuales, dados sus principios fundamentales de funcionamiento, no permitiría la comparación directa de resultados entre sí.

Finalmente, es importante destacar los trabajos realizados por el Comité RILEM (Fabbri et al., 2022), Volhard (2016), Cuitiño et al. (2020) y Minke (2005) en los cuales, a pesar de no efectuarse determinaciones directas de la conductividad térmica de los elementos constructivos de tierra, se realiza un análisis profundo de la variación de este coeficiente en función de variables como la técnica de construcción y la densidad de los elementos constructivos.

3 MARCO NORMATIVO

En Argentina son varias las normas que definen los lineamientos de acondicionamiento térmico de las edificaciones. La norma IRAM 11601:2010 establece la densidad aparente y conductividad térmica de los materiales de construcción más empleados en el país, y el procedimiento de cálculo para determinar la resistencia térmica y su inversa, la transmitancia térmica (K) de muros y cerramientos, cuyos valores deberían ser inferiores a los máximos admisibles establecidos por las normas IRAM 11605:2010 e IRAM 11900:2017 para cada región del País, definidas en la norma IRAM 11603:2012.

A pesar del amplio marco normativo, en lo que respecta a las propiedades térmicas de los elementos constructivos de tierra, este conjunto de normas únicamente indica el valor de la conductividad térmica de BTC con densidad de 1800 kg/m^3 . De esta manera, la determinación de la conductividad térmica para diferentes elementos constructivos de tierra producidos con materiales locales es crucial para el desarrollo normativo en Argentina.

4 METODOLOGÍA

4.1 Materiales

La tierra empleada para la fabricación de las diferentes muestras se obtuvo de una cantera sita en la comuna de Monte Vera (Santa Fe, Argentina). En trabajos previos (Cabrera et al., 2022) se identificó al suelo empleado en esta investigación como una “arcilla de baja plasticidad CL” con un contenido de 54% de limo, 32% de arcilla y 14% de arena fina. Asimismo, las semicuantificaciones realizadas por DRX confirman que, desde el punto de vista mineralógico, el mineral preponderante es el cuarzo (65%), seguido por filosilicatos (arcillas) (25%) y feldespatos (9%). Los difractogramas de los agregados orientados de la fracción arcillosa de la tierra indican que los filosilicatos presentes en ella son illita, caolinita y esmectita.

La arena fina empleada en la corrección granulométrica posee una distribución de tamaños uniforme: más del 90% de sus partículas poseen un tamaño comprendido entre 0.5 y 0.1 mm. Además, no se advierten aristas ni formas angulares en sus granos, presentado todos ellos una forma redondeada. Desde el punto de vista mineralógico sus granos están constituidos mayoritariamente (95% en peso) por cuarzo, contando únicamente con un 1% de arcillas.

La arena gruesa, también de sílice y con una distribución de tamaños de entre 2 y 3 mm fue adquirida en la empresa Gravafilt en la ciudad de Paraná (Argentina), quienes la extraen por dragado en la cuenca alta del río Paraná y la clasifican y comercializan con diferentes granulometrías. Esta arena se utilizó únicamente en la confección de las muestras de tapia.

Para la fabricación de las probetas de adobe, quincha y revoque grueso se empleó como fibra vegetal paja de trigo adquirida en las proximidades de la ciudad de Santa Fe (Argentina). A pesar de que la paja empleada en la confección de los diferentes tipos de probetas fue la misma, ésta fue cortada en diferentes longitudes: 2 cm para revoques gruesos, 3 cm para adobes y entre 10 y 12 cm para el relleno de quincha.

4.2 Confección de probetas

Por cada técnica constructiva fueron confeccionadas 3 probetas de $13 \times 13 \times 4$ cm (con excepción de las de revoque fino, de 2 cm de espesor), generando así un total de 18 probetas, cuyas dosificaciones se exponen en la tabla 1.

Las probetas de BTC se confeccionaron cortando con una sierra circular de banco bloques enteros producidos en laboratorio con una prensa de accionamiento manual Altech Geo 50, los cuales, por no estar estabilizados con cemento Portland, no fueron curados, dejándose secar durante 7 días resguardados de la intemperie.

Las probetas de adobe, revoque grueso y revoque fino se elaboraron vertiendo la mezcla húmeda dentro de cada molde, acomodándola de manera tal de no generar vacíos ni oquedades. Luego de 24 horas se realizó el desmolde de las probetas, dejándolas secar por 7 días en condiciones de temperatura y humedad de laboratorio ($24 \text{ }^\circ\text{C} < t < 27 \text{ }^\circ\text{C}$ y $35\% < \text{HR} < 45\%$).

El moldeo de las probetas de tapia se realizó en 3 capas de 2.5 cm de espesor cada una, que luego de la compactación tuvieron 1.3 cm de espesor. Para ello se introdujeron terceras partes del material húmedo dentro del molde y se compactó con 25 golpes de un pisón de madera de 550 g cada capa, alisando finalmente la superficie superior con un papel de lija. Estas probetas fueron desmoldadas de manera inmediata, dejándose secar, al igual que el resto, por 7 días dentro del laboratorio.

Para el moldeo de las probetas de relleno de quincha se sumergió la paja en barbotina (barro de consistencia líquida) y luego de unos segundos se extrajo, se escurrió el líquido excedente y se introdujo la paja recubierta de barbotina dentro del molde, generándose así un entrelazado de fibras embebidas en barbotina (figura 1.c). Luego, se dejaron secar por 7 días y se extrajeron del molde.

Tabla 1: Dosificación empleada en la confección de las probetas

Material	Proporción en % del peso seco				Agua* (%)	Relación agua/tierra
	Tierra	Arena fina	Arena gruesa	Paja		
BTC	70.0	30.0	-	-	11.7	0.17
Adobe	96.5	-	-	3.5	32.6	0.34
Relleno de quincha	93.8	-	-	6.2	60.1	0.64
Tapia	60.0	20.0	20.0	-	11.0	0.18
Revoque grueso	67.5	29.1	-	3.4	23.3	0.34
Revoque fino	35.0	65.0	-	-	16.3	0.47

* % determinado en función del peso seco de la tierra.

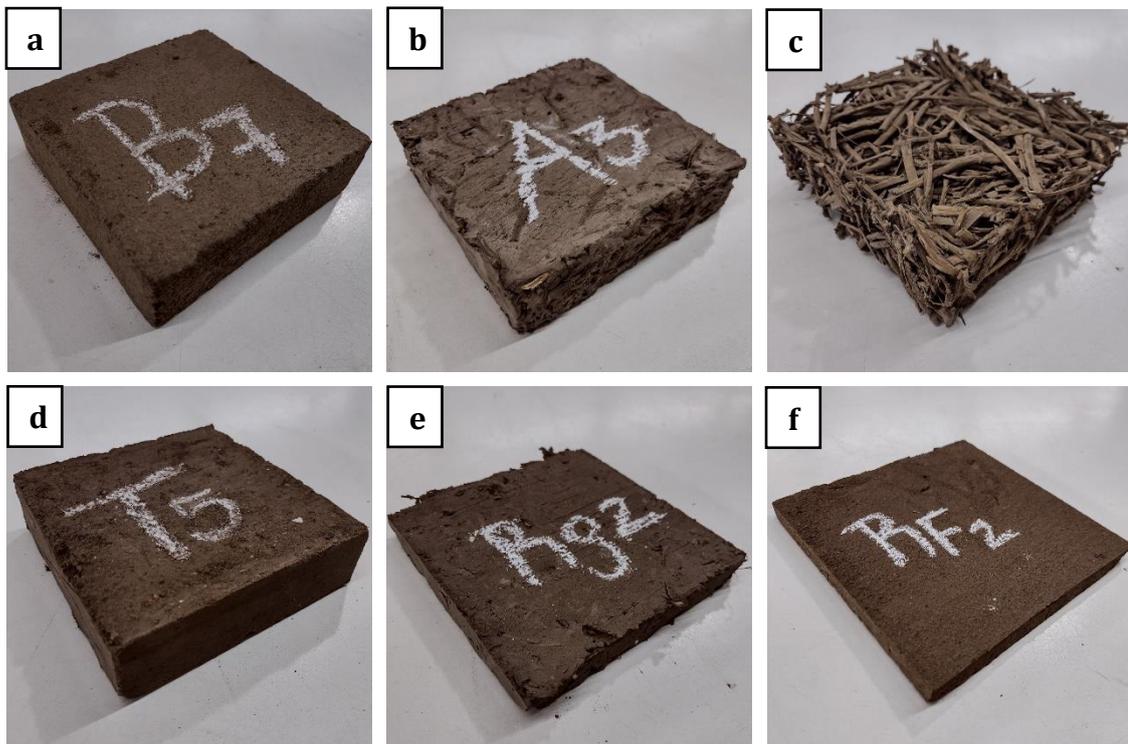


Figura 1: Probetas representativas de las diferentes técnicas constructivas de tierra:
a) BTC, b) adobe, c) relleno de quincha, d) tapia, e) revoque grueso y f) revoque fino

4.3 Determinación de la conductividad y transmitancia térmica

Para cada una de las probetas confeccionadas se determinó en una primeras instancia la densidad aparente seca y luego el coeficiente de conductividad térmica, empleando para ello un equipo medidor de flujo de calor modelo HFM 446 Lambda Medium de la firma alemana Netzsch (figura 2.a), adoptando una temperatura media de ensayo de 17° y una variación de $\pm 10^{\circ}\text{C}$, es decir, una temperatura en la placa superior de 27 °C y una temperatura en la placa inferior de 7 °C, siguiendo el procedimiento estipulado por la norma IRAM 1860:2002. Previo a los ensayos, todas las probetas fueron secadas en estufa a 100 °C hasta lograr la constancia de masa. Dada la irregularidad de la superficie de las probetas, estas fueron ensayadas utilizando un kit complementario, proporcionado por el proveedor del equipo, constituido por un film de silicona y termocuplas adicionales (figuras 2.b y 2.c) cuyo fin es mejorar la interfase de contacto entre las placas térmicas y las superficies rugosas de las caras de las probetas.



Figura 2: a) Equipo HFM 446, b) termocuplas adicionales y c) film de silicona empleados en la determinación del coeficiente de conductividad térmica

Una vez determinado el coeficiente de conductividad térmica de cada tipo de muestra ensayada se calculó el coeficiente de transmitancia térmica (K) de diferentes sistemas constructivos de tierra siguiendo el procedimientos indicado por la norma IRAM 11601:2010; adoptando los valores de resistencias térmicas superficiales interior y exterior propuestos por esta norma. Las fórmulas empleadas para el cálculo de K fueron las indicadas en las ecuaciones 1, 2 y 3:

$$R_i = e_i / \lambda_i \quad (\text{ecuación. 1})$$

$$R_t = R_{ext} + R_i + R_{int} \quad (\text{ec. 2})$$

$$K = \frac{1}{R_t} \quad (\text{ec. 3})$$

Siendo:

- R_i resistencia térmica de cada capa constitutiva del muro, en $\text{m}^2\text{K/W}$
- λ_i coeficiente de conductividad térmica de cada material, en W/mK
- e_i espesor de cada material que compone el muro, en m
- R_t resistencia térmica total del muro, en $\text{m}^2\text{K/W}$
- R_{ext} resistencia térmica superficial exterior, adoptando como valor $0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$
- R_{int} resistencia térmica superficial interior, adoptando como valor $0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$
- K transmitancia térmica total del muro, en $\text{W/m}^2\text{K}$

5 RESULTADOS

En la tabla 2 se exponen los valores medios de densidad aparentes (ρ) y coeficiente de conductividad térmica (λ) obtenidos para cada probeta ensayada, junto con el valor promedio correspondiente, la desviación estándar (S_d) y el coeficiente de variación (C_v). Así mismo, en la tabla 3 se presentan los valores del coeficiente de transmitancia térmica (K) calculados para

diferentes sistemas constructivos de muros que empleen los componentes de tierra analizados en este trabajo, propuestos en función de las practicas constructivos locales. En dicha tabla, la columna denominada "elemento principal" hace referencia al espesor del adobe, BTC, tapia o quincha, según corresponda.

Tabla 2: Densidad aparente y coeficiente de conductividad térmica de las probetas

Material	Densidad				Conductividad térmica			
	ρ_i (kg/m ³)	ρ_{prom} (kg/m ³)	S_d (kg/m ³)	C_v (%)	λ_i (W/mK)	λ_{prom} (W/mK)	S_d (W/mK)	C_v (%)
BTC	1587.28				0.5970			
	1588.17	1595.46	13.4	0.84	0.6113	0.6002	0.010	1.65
	1610.92				0.5923			
Adobe	1353.50				0.4642			
	1363.98	1352.37	12.2	0.90	0.4533	0.4305	0.049	11.44
	1339.62				0.3740			
Quincha	340.86				0.1085			
	478.04	428.83	76.4	17.81	0.1356	0.1305	0.020	15.26
	467.60				0.1473			
Tapia	1633.75				0.5849			
	1697.34	1687.00	48.9	2.90	0.6424	0.6690	0.100	14.96
	1729.91				0.7797			
Revoque grueso	1347.65				0.4866			
	1303.06	1328.52	22.8	1.72	0.4057	0.4842	0.077	15.96
	1333.81				0.5602			
Revoque fino*	1233.28				0.2252			
	1286.49	1259.90	37.6	2.99	0.2816	0.2534	0.040	15.77

* Solo pudieron realizarse dos mediciones sobre esta serie

Tabla 3: Cálculo del coeficiente de transmitancia térmica de diferentes sistemas constructivos de tierra

Paquete constructivo	Espesores de cada capa (cm)						K (W/m ² K)
	R. fino exterior	R. grueso exterior	Elemento principal	R. grueso interior	R. fino interior	Total	
BTC (12,5 cm)	-	-	12.5	-	1.0	13.5	2.471
BTC (25 cm)	1.0	2.0	25.0	2.0	1.0	31.0	1.385
BTC con cámara de aire*	1.0	2.0	25.0 + 12.5	-	-	0.44	0.973
Adobe	1.0	2.0	30.0	2.0	1.0	36.0	1.042
Tapia 30 cm con revoques	1.0	2.0	30.0	2.0	1.0	36.0	1.326
Tapia vista	-	-	55.0	-	1.0	56.0	0.982
Quincha	1.0	2.0	15.0	2.0	1.0	21.0	0.568

* BTC con cámara de aire: muros independientes de BTC de 25 y 12.5 cm cada uno, separados entre ellos una distancia de 3.5 cm.

6 DISCUSIÓN

6.1 Sobre la determinación del coeficiente de conductividad térmica

Como puede apreciarse en la tabla 2, existe una correlación entre la densidad de los elementos constructivos y su coeficiente de conductividad térmica, siendo el relleno de quincha, cuya densidad se encuentra en el orden de los 400 kg/m³, el que presenta el coeficiente de conductividad térmica más bajo, de aproximadamente 0.13 W/mK, comparable con el de los hormigones celulares de densidad similar (IRAM 11601:2010), pero significativamente mayor al de los materiales aislantes convencionales como la lana de vidrio, el poliestireno expandido o la espuma de poliuretano (Navacerrada et al, 2021). Después del relleno de quincha, el elemento constructivo con menor coeficiente de conductividad térmica es el adobe con un λ_{prom} de 0.43 W/mK, seguido por el BTC con un λ_{prom} de 0.60 W/mK y finalmente la tapia con un λ_{prom} de 0.67 W/mK.

Se remarca la dispersión en los resultados de las muestras de relleno de quincha y de tapia lo cual puede asociarse a la mayor variabilidad en las densidades de cada muestra, propias del proceso de confección de estas: relleno manual con gran volumen de oquedades por el entrelazamiento de las fibras de paja en el relleno de quincha y compactación dinámica para la tapia.

En lo que respecta a las muestras de revoque grueso, tanto su densidad como λ son similares a los de las muestras de adobe. Esta similitud se atribuye a que, independientemente de los materiales empleados (paja para los adobes y arena + paja para el revoque grueso) la relación agua/tierra de ambos, principal causante de la porosidad y densidad aparente de los elementos constructivos de tierra (Laborel-Préneron et al., 2018) son iguales, de 0.34. Del mismo modo, las muestras de revoque fino con una relación agua/tierra de 0.47 -la mayor después de la del relleno de quincha- presentan, luego de las muestras de relleno de quincha, la menor densidad y λ promedio.

En la figura 3 pueden compararse los resultados experimentales obtenidos en esta investigación (puntos coloreados) con los recopilados y publicados por Volhard (2016) y Cuitiño et al. (2020) para diversos elementos constructivos de tierra (línea punteada). En ella puede apreciarse como, a pesar de la dispersión en los resultados alcanzados en este trabajo, la correlación exponencial entre la densidad de los elementos constructivos de tierra y su coeficiente de conductividad térmica es similar a la determinada por los autores citados. Esto permite pensar que, independientemente de las características mineralógicas de la tierra, la cantidad y tipo de arena y fibras vegetales utilizadas en la estabilización, el principal determinante del coeficiente de conductividad térmica de estos elementos constructivos es su densidad aparente final.

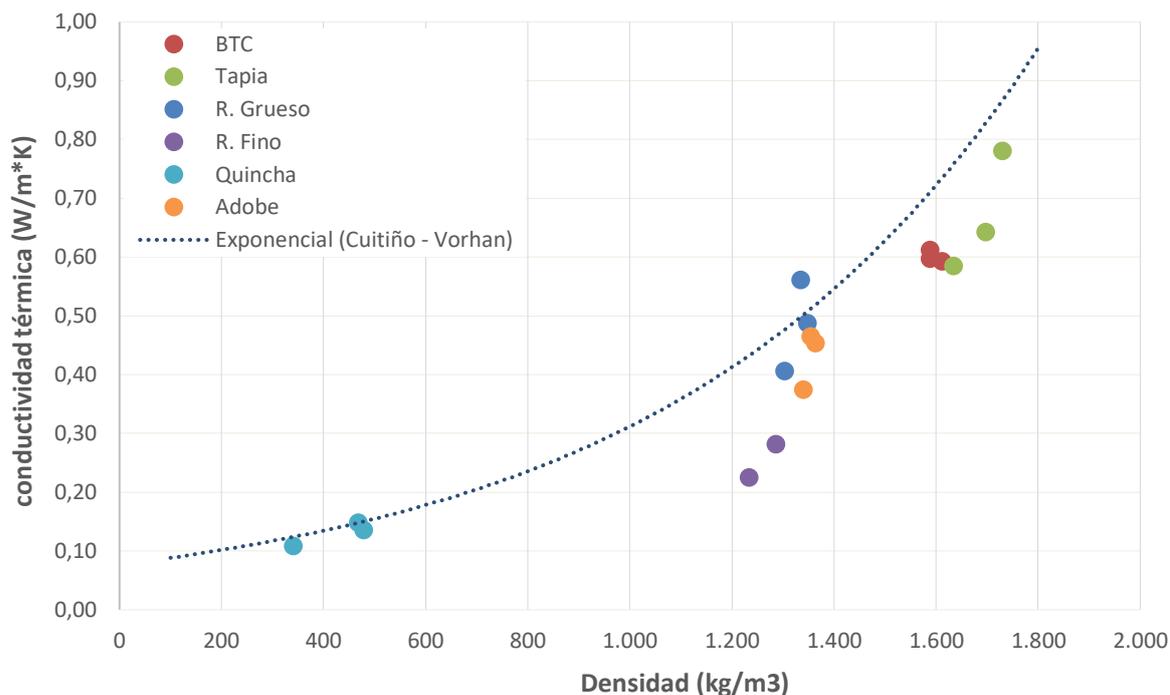


Figura 3: Correlación entre la densidad de los elementos constructivos de tierra ensayados (puntos coloreados) y su coeficiente de conductividad térmica, junto a la curva de ajuste exponencial entre ambas variables construida por Cuitiño et al. (2020) y Volharn (2016).

6.2 Sobre la transmitancia térmica

La normativa argentina IRAM 11605:2010 establece 3 niveles de confort higrotérmicos en invierno y verano para las diferentes zonas bioclimáticas del país en función de las temperaturas medias exteriores. De esta manera, para el litoral argentino (zona bioclimática IIb) los valores de transmitancia térmica para cada nivel de confort son los siguientes:

- Nivel A: 0.38 W/m²K
- Nivel B: 1.00 W/m²K
- Nivel C: 1.85 W/m²K

En función de los valores del coeficiente de transmitancia térmica determinados en la Tabla 3 para diferentes sistemas constructivos de tierra, para cumplimentar con el nivel de confort higrotérmico B—nivel mínimo solicitado por la Secretaría de Vivienda (Argentina)—, la alternativa más adecuada es el muro de quincha revocado que, con un espesor total de 21 cm presenta un K de 0.57 W/m²K.

Empleando muros de adobe de 30 cm con revoques gruesos y finos sobre ambas caras puede alcanzarse un K muy cercano al solicitado para el nivel de confort B (1.04 W/m²K) con un espesor total de muro de 36 cm. Por su parte, para alcanzar el nivel de confort B con un muro de BTC, la mejor alternativa es utilizar muros dobles (25 + 12.5 cm) con una cámara de aire interior de 4 cm y revoques únicamente en la cara exterior del muro, una práctica habitual en la región (Dorado et al., 2021), generándose un muro cuyo espesor final es de 44 cm. De la misma manera, empleando la técnica de tapia a la vista (solo con revoque fino interior) deben emplearse muros de 56 cm de espesor.

A pesar de los elevados espesores de los muros de adobe, BTC y tapia para alcanzar el nivel de confort B, debe considerarse que, tal como se muestra en la tabla 4, con excepción de los muros construidos con ladrillos huecos y bloques de hormigón celular, ninguno de los sistemas constructivos denominados “tradicionales” alcanza este nivel de aislamiento sin la utilización de cámaras de aire y espesores totales de muro superiores a 50 cm.

Tabla 4: Cálculo del coeficiente de transmitancia térmica de diferentes sistemas constructivos (a partir de IRAM11601:2010)

Material	Espesor (cm)					Total	K (W/m ² K)
	Revoque fino exterior	Revoque grueso exterior	Elemento principal	Revoque grueso interior	Revoque fino interior		
Ladrillo común 25 cm	1.0	2.0	25.0	2.0	1.0	31.0	1,505
Ladrillo común con cámara de aire	1.0	2.0	25 + 25	2.0	1.0	56.0	0,924
Ladrillo hueco 18 cm	1.0	2.0	18.0	2.0	1.0	24.0	1.390
Ladrillo hueco con cámara de aire	1.0	2.0	18 + 12	2.0	1.0	36.0	0.927
Bloque de hormigón 20 cm	1.0	2.0	20.0	2.0	1.0	36.0	2.226
Bloque de hormigón con cámara de aire	1.0	2.0	20 + 20	2.0	1.0	36.0	1.540
Hormigón celular (600 kg/m ³)	1.0	2.0	15.0	2.0	1.0	21.0	0.843

* Todos los revocos son cementicios, no de tierra.

7 CONCLUSIONES

La evaluación de los resultados obtenidos en esta investigación permite arribar a las siguientes conclusiones:

- Existe una correlación directa entre el coeficiente de conductividad térmica y la densidad aparente de los elementos constructivos confeccionados con tierra, arena y fibra vegetal del centro este de la provincia de Santa Fe. Esto coincide con lo informado por diferentes investigadores del contexto nacional e internacional.
- La técnica de construcción con tierra con mayor capacidad de aislamiento térmico es la quincha, cumpliendo de manera holgada los requerimientos estipulados por la normativa argentina vigente con un paquete de 21 cm de espesor.
- Los muros de adobe presentan, después de la quincha, el mejor nivel de aislación térmica, seguidos por los muros dobles de BTC y finalmente los de tapia.
- Las técnicas de construcción con tierra presentan en todos los casos un mejor desempeño térmico que los tradicionales muros de ladrillo cerámico macizo o bloques de hormigón, requiriéndose menores espesores para lograr iguales niveles de aislación térmica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balter, J.; Ganem, C.; Barea, G. (2020). Mejoras en el desempeño energético de edificios en verano mediante la integración de envolventes ventiladas en fachadas norte y cubiertas. El caso de Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 10(2), 94–105. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.07>
- Cabrera Córdoba, C. (2019). Transmitancia térmica de sistemas constructivos en tierra [Universidad de Azuay]. In Proyecto Final de Arquitectura. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9268>
- Cabrera, S.; Elert, K.; Guilarducci, A.; Margasin, A. (2022). The effect of local pozzolans and lime additions on the miner-ological, physical and mechanical properties of compressed earth blocks in Argentina. *Revista de La Construcción*, 21(2), 248–263. <https://doi.org/10.7764/RDLC.21.2.248>
- Cagnon, H.; Aubert, J. E.; Coutand, C.; Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208–217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>
- Costantini Romero, B.; Francisca, F. (2022). Construcción con bloques de suelo cemento como alternativa sostenible para envolvente edilicia. *Hábitat Sustentable*, 12, 114–125. <https://doi.org/https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.08>
- Costantini Romero, B.; Francisca, F.; Giomi, I. (2021). Hygrothermal properties of soil–cement

construction materials. *Construction and Building Materials*, 313(October), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125518>

Cuitiño, M. G.; Esteves, A.; Maldonado, G.; Rotondaro, R. (2015). Análisis de la transmitancia térmica y resistencia al impacto de los muros de quincha. *Informes de La Construcción*, 67(537).
<https://doi.org/10.3989/ic.12.082>

Cuitiño, M. G.; Rotondaro, R.; Esteves, A. (2020). Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra. *Revista de Arquitectura*, 22(1), 138–151. <https://editorial.ucatolica.edu.co/index.php/RevArq/article/view/2348>

Dorado, P.; Cabrera, S.; Rolón, G. (2021). Contemporary difficulties and challenges for the implementation and development of compressed earth block building technology in Argentina. *Journal of Building Engineering*.

El Fgaier, F.; Lafhaj, Z.; Chapiseau, C.; Antczak, E. (2016). Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks. *Journal of Building Engineering*, 6, 86–92.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.02.011>

Esteves, J. M.; Cuitiño, M. G. (2020). El sistema constructivo de la quincha en zonas rurales del Norte de Mendoza (Argentina). *Estoa*, 9(17), 93–102. <https://doi.org/10.18537/est.v009.n017.a08>

Fabbri, A.; Morel, J.-C.; Aubert, J.-E.; Bui, Q.-B.; Gallipoli, D.; Reddy, B. V. V. (2022). Testing and characterisation of earth-based building materials and elements. State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE. RILEM. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1>

Fernandes, J.; Peixoto, M.; Mateus, R.; Gervásio, H. (2019). Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. *Journal of Cleaner Production*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>

IRAM (2002). Norma IRAM 1860: Materiales aislantes térmicos. Método de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario, mediante el aparato de medición del flujo de calor.

IRAM (2010). Norma IRAM 11601: Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.

IRAM (2012). Norma IRAM 11603: Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina.

IRAM (2010). Norma IRAM 11605: Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos.

IRAM (2017). Norma IRAM 11900: Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética.

Labrel-Préneron, A.; Magniont, C.; Aubert, J. E. (2018). Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. *Energy and Buildings*, 178, 265–278.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>

Millard, P.; Aubert, J. E. (2014). Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties. *Construction and Building Materials*, 63, 56–61.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.001>

Minke, G. (2005). Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Uruguay: Fin de siglo.

Mosquera Arancibia, P. (2013). Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida. Universidad Politécnica de Madrid.

Navacerrada, M. Á.; de la Prida, D.; Sesmero, A.; Pedrero, A.; Gómez, T.; Fernández-Morales, P. (2021). Comportamiento acústico y térmico de materiales basados en fibras naturales para la eficiencia energética en edificación. *Informes de La Construcción*, 73(561), e373. <https://doi.org/10.3989/ic74558>

Ouedraogo, K. A. J.; Aubert, J.-E. E.; Tribout, C.; Escadeillas, G.; Escadeillas, G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, 236, 117578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>

Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>

Rotondaro, R. (2018). Construir con tierra: Tecnología y arquitectura del siglo XX. Notas CPAU.

<https://www.revistanotas.org/revistas/41/2295-construir-con-tierra-tecnologia-y-arquitectura-del-siglo-xxi>

Saidi, M.; Soukaina, C.; Belkacem, Z.; Seidiki, E. (2018). Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. *Construction and Building Materials*, 167, 566–577. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063>

Tepale Gamboa, B. A. (2016). La tierra vertida compactada como sistema tecnificado para la autoconstrucción de vivienda en zonas rurales [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/76043>

Volhard, F. (2016). Construire en terre allègée. *Acte Sud - Craterre*.

Wieser, M.; Onnis, S.; Meli, G. (2018). Conductividad térmica de la tierra alivianada con fibras naturales en paneles de quincha. 18° Seminario Iberoamericano de arquitectura y construcción con tierra. Guatemala, USAC-CII; PROTERRA, p. 199-208 <https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/06/18-SIACOT-Guatemala-2018.pdf>

AGRADECIMIENTO

Los autores del artículo agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe (UTN FRSF) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por aportar los recursos que posibilitaron el desarrollo de esta investigación.

AUTORES

Santiago Cabrera: Ingeniero Civil y Doctor en Ingeniería por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe “UTN FRSF” (Argentina). Actualmente es codirector del Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra de la UTN FRSF; codirige la Red Argentina de Construcción con Tierra PROTIERRA e integra la Red Iberoamericana PROTERRA.

Anabela Guillarducci: Licenciada en Química y Doctora en Química por la Universidad Nacional del Litoral. Directora del Departamento de Investigación de Materiales del Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda, de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe.

Dianela González: Ingeniera Civil, investigadora del Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda, de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe.

Mariano Suárez: Ingeniera Civil e investigador del Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda, de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe.

Santiago Cabrera: Ingeniero Civil y Doctor en Ingeniería por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe (Argentina). Actualmente es codirector del Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra de la UTN FRSF, codirector de la Red Argentina de Construcción con Tierra PROTIERRA e integrante de la Red Iberoamericana PROTERRA.