

Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra

Comparative analysis of thermal aspects and mechanical resistance of building materials and elements with earth

María Guadalupe Cuitiño-Rosales

Universidad Nacional de Cuyo. San Rafael (Argentina)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
San Rafael (Argentina)

Rodolfo Rotondaro

Universidad de Buenos Aires. (Argentina)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. (Argentina)

Alfredo Esteves

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía. Mendoza (Argentina)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. (Argentina).

María Guadalupe Cuitiño-Rosales

Ingeniera civil, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Rafael (Argentina).

Doctora en ciencias exactas con especialización en energías renovables, Universidad Nacional de Salta (Argentina).

Investigador asistente de CONICET.

 <https://orcid.org/0000-0002-0021-5648>

gcuitino@mendoza-conicet.gob.ar

Rodolfo Rotondaro

Arquitecto, Universidad Nacional de Mar del Plata (Argentina).

Magíster del Centro Internacional de la Construcción con Tierra (CRATerre) (Francia).

Doctor en arquitectura, Universidad Nacional de Tucumán (Argentina).

Investigador científico de CONICET

 <https://orcid.org/0000-0001-9861-8340>

rodolforotondaro@gmail.com

Alfredo Esteves

Ingeniero Industrial, Universidad Nacional de Cuyo.

Doctor en arquitectura, Universidad de Mendoza (Argentina).

Investigador científico de CONICET.

 <https://orcid.org/0000-0001-5212-9293>

aesteves@mendoza-conicet.gob.ar

Cuitiño Rosales 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 (Bogotá)*, 22(1), 138-151. <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2348>



dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2348

Resumen

Se analizan las características térmicas y de resistencias mecánicas de materiales y elementos constructivos elaborados con suelos naturales estabilizados. La metodología parte de la recopilación bibliográfica de fuentes primarias, secundarias e información de ensayos propios, sobre la densidad, la conductividad térmica y las resistencias a la compresión, a la flexión y al corte correspondientes al adobe, los bloques de tierra comprimida (BTC), la tapia y la quincha, según diferentes autores. Además, se consideraron los valores establecidos por normas argentinas IRAM referidas al acondicionamiento térmico de edificios. Se elaboraron comparaciones entre sí y con algunos materiales industrializados, tales como los bloques de hormigón, los ladrillos cerámicos huecos y los ladrillos cocidos macizos. A partir de este análisis, se concluyó que la revisión bibliográfica no es suficiente para obtener una estandarización de los valores de conductividad y transmitancia térmica de los materiales y los elementos constructivos naturales. Así mismo, a partir de las comparaciones de valores se pudo observar cómo se relacionan la densidad de los materiales y la de los morteros, según las distintas técnicas, con el comportamiento térmico y las resistencias mecánicas.

Palabras clave: adobe; arquitectura sostenible; bahareque; bloque de tierra comprimida-BTC; materiales vernáculos de construcción; propiedades térmicas; quincha; resistencia mecánica; tapial

Abstract

This article analyzes the thermal characteristics and mechanical resistance of some construction materials and elements that use stabilized natural soils. The methodology includes a bibliographic compilation of primary and secondary sources and information from in-house tests on density, thermal conductivity and resistance to compression, flexion and cutting for adobe, CEB, rammed earth and wattle and daub. In addition, the data are considered in relation to values for the thermal conditioning of buildings established by Argentine IRAM standards. Comparisons are made among earthen construction methods alongside some industrialized materials such as concrete blocks, hollow ceramic bricks, and solid fired bricks. From this analysis, the authors conclude that the literature review is insufficient for obtaining a standardization of thermal conductivity and transmittance values in natural building materials and elements. Furthermore, the comparative evaluation demonstrates how the density of materials and mortars used in different techniques are related to thermal behavior and mechanical resistance.

Keywords: adobe; sustainable architecture; bahareque; compressed earth block (CEB); vernacular building materials; thermal properties; quincha; mechanical strength; rammed earth; wattle; daub

Recibido: febrero 18 / 2018

Evaluated: diciembre 7 / 2018

Aceptado: junio 10 / 2019

Introducción

Este trabajo se encuentra dentro del marco del proyecto de investigación Plurianual PIP No. 11220150100570CO titulado *Tecnologías Sociales en el Hábitat Urbano con Población Pobre*. Dicho trabajo ha sido financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y por la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de Buenos Aires, en conjunto con el proyecto *Investigación y Desarrollo de Tecnología de Quincha Optimizada para Viviendas de Localidades Áridas y Semiáridas Frías de Argentina*, también financiado por CONICET.

Es cada vez mayor el número de profesionales de la construcción que realizan proyectos habitacionales y urbanísticos incorporando la sustentabilidad, con el fin de integrar el ambiente exterior y la obra arquitectónica. La sustentabilidad consiste en la adaptación del entorno de los seres humanos a un factor limitante: la capacidad del entorno para asumir la presión humana de manera que sus recursos naturales no se degraden irreversiblemente (Alavedra, Domínguez, Gonzalo & Serra, 1997, p. 42).

Dentro de las actividades industriales, la actividad de la construcción es la mayor consumidora, junto con la industria asociada, de recursos naturales, como la madera, los minerales, el agua y la energía. De la misma forma, los edificios, una vez construidos, siguen siendo una causa directa de contaminación, por las emisiones que generan, y así producen un impacto ambiental sobre el territorio, por el consumo que hacen tanto de energía como del agua, necesarios para su funcionamiento (Alavedra et al., 1997, p. 42).

Durante las etapas de fabricación de los materiales de construcción y de los productos derivados, se produce, generalmente, un alto impacto ambiental. Dicho impacto tiene su origen en la extracción de los recursos naturales necesarios para el proceso de fabricación y en el consumo de energía requerido durante cada etapa del proceso. A raíz de ello, se generan emisiones tóxicas a la atmósfera, las cuales resultan contaminantes, corrosivas y altamente perjudiciales para la salud. Dicho proceso se repite tanto en la operación como en el uso del edificio, hasta su disposición final, reducido en partes esenciales que permitirán su reciclado o su reúso para una obra nueva.

Lo que se pretende con la aplicación de los criterios de la construcción sostenible es la construcción de edificios con una disminución de materiales industrializados, y así evitar, siempre y cuando sea posible, el uso de sustancias que al final de su ciclo de vida originen residuos peligrosos o difícilmente separables en sus partes esenciales. Los principales efectos que los materiales utilizados en la construcción provocan sobre el ambiente incluyen: consumo energético, producción de residuos sólidos, incidencia negativa en el efecto invernadero, perjuicio a la capa de ozono y otros factores de contaminación ambiental (Cáseres, 1996, pp. 7-8;; Wassof, 2014).

La tierra es, hasta donde se conoce, el más antiguo de los materiales de construcción que ha empleado la humanidad, y representa actualmente una solución a la demanda de viviendas de bajo costo (Vega, Andrés, Guerra, Morán, Aguado & Llamas, 2011, p. 3021). Aun hoy, el 30% de la población mundial vive en casas de tierra (Freire & Tinoco, 2015, p. 18). Esta alternativa se basa en muchas razones, entre las cuales se pueden mencionar: la gran disponibilidad de esta materia prima en la naturaleza, su reducida contaminación y sus bajas emisiones de CO₂ durante sus etapas de fabricación y de transporte (Piattoni, Quagliarini & Lenci, 2011, p. 2067), así como su nula generación de residuos, tanto en la etapa de construcción como en la de demolición; así mismo, una de sus más importantes propiedades es la respuesta térmica, que es esencial para el confort y para reducir el uso de sistemas auxiliares de calefacción o refrigeración durante toda la vida útil del edificio.

Los sistemas constructivos con tierra más comunes son el adobe, la quincha, la tapia y el BTC. En dichos sistemas constructivos naturales, la mayor parte de la energía correspondiente a la producción proviene del sol, debido a que la forma de secado es al aire libre y al sol, sin necesidad de recurrir al secado en hornos, como es el caso del ladrillo cocido. Todo ello permite reducir el consumo de energías no renovables y las emisiones correspondientes.

Una característica importante de los ambientes de una vivienda para su buen funcionamiento y su comodidad es el logro de un diseño confortable para sus ocupantes. En este sentido, los materiales utilizados en la envolvente edilicia son fundamentales, por integrar los elementos que



This article is available in English on the website of *Revista de Arquitectura (Bogotá)*
<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2348>

Comparative analysis of thermal aspects and mechanical resistance of building materials and elements with earth



separan el ambiente interior del exterior. La elección de dichos elementos depende de distintos factores, tales como la tecnología que es posible utilizar, su respuesta estructural, su ciclo de vida y, además, la estética.

Dado que el material tierra tiene un comportamiento heterogéneo, no puede ser caracterizado para lograr una respuesta homogénea, como puede ser en el caso del hormigón. En el caso de la tierra, la respuesta va a depender de la composición de cada muestra de suelo y de cada lugar (Minke, 2005, p. 16); por tal motivo, los elementos constructivos elaborados a partir de los distintos suelos presentan diversas respuestas térmicas, mecánicas y físicas.

En el presente trabajo se expone una recopilación de datos aportados por normas y proyectos de investigación, referidos a variables del comportamiento térmico y de la resistencia mecánica y estructural de los materiales de construcción con tierra. Algunos de dichos valores han sido resultado de ensayos experimentales realizados en acreditadas instituciones alrededor del mundo. Estos se refieren a propiedades de diferentes tecnologías de construcción con tierra, como es el caso del adobe, la tapia, la quincha y los BTC, entre otras. Se han tomado como referencia de comparación algunos de los materiales empleados en la construcción tradicional, tales como el ladrillo cocido común, el ladrillo cerámico hueco y el hormigón. A partir de ese análisis se establecen algunas reflexiones, con el fin de determinar las características más importantes de los materiales de construcción con tierra y la relación entre ellas.

Metodología

Se utilizó el método de análisis comparativo tanto para las propiedades térmicas como para la resistencia mecánica. Con tal fin, se hizo una recopilación de antecedentes bibliográficos de publicaciones de varios autores, y a los cuales se adicionaron los datos aportados por las normas reglamentarias y los obtenidos de forma experimental por los autores del presente trabajo. En primera instancia, se definieron las propiedades térmicas y mecánicas que van a ser evaluadas en el desarrollo del artículo. Luego se elaboraron cuadros comparativos, que permitirán visualizar para cada sistema constructivo natural, como el adobe, el barro macizo, el BTC y la quincha, las propiedades térmicas y las densidades obtenidas por diversos autores, respecto a los mismos datos para los sistemas empleados en la construcción tradicional, como el ladrillo macizo, el ladrillo cerámico hueco y el hormigón *in situ*.

A partir de la Norma IRAM, se analizarán los valores máximos admisibles de transmitancia térmica en muros para Argentina y cuáles serían los espesores de muros necesarios en los sistemas de construcción con barro, para que observen el

nivel mínimo de confort térmico de acuerdo con la zona bioambiental.

Finalmente, el mismo procedimiento comparativo se hizo con las resistencias mecánicas para los sistemas constructivos en barro y tradicional, para así poder observar los valores de resistencias al corte, a la flexión y a la compresión simple obtenidos por cada autor o cada norma reglamentaria.

Para elaborar las conclusiones se tuvo en cuenta el análisis de los resultados comparativos sobre los aspectos térmicos y de resistencias mecánicas obtenidos en la revisión bibliográfica, al igual que reflexiones propias sobre las condiciones potenciales de desarrollo de la construcción con tierra en Argentina.

Resultados

Características térmicas y mecánicas de los materiales

A continuación se presentan las definiciones que ligan a cada propiedad medida con esfuerzos o flujos de energía, y que dan lugar a los valores indicados en las tablas correspondientes.

Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas se refieren a la mayor o la menor capacidad de transmitir calor o acumularlo, y así dar lugar a la inercia térmica de una construcción. Dichas capacidades se pueden definir como: densidad, calor específico y conductividad térmica, que se refieren al material. También están la transmitancia térmica, la capacidad calorífica, la inercia térmica y el retardo, que se refieren a los elementos constructivos, como son los cerramientos horizontales (techos), los cerramientos verticales transparentes (paños fijos, ventanas y puertas-ventanas) y los cerramientos verticales opacos (muros y puertas). El significado de estas propiedades térmicas se indica en los siguientes apartados.

Propiedades térmicas referidas al material

- **Densidad (kg/m^3):** es la masa por unidad de volumen de un cuerpo. La mayor o la menor densidad de los materiales de construcción influyen en su capacidad aislante, como se analizará más adelante. Cabe destacar que la densidad también afecta a las propiedades mecánicas.
- **Conductividad térmica λ [W/mK]:** es la cantidad de calor que se transmite en una dirección, por unidad de tiempo y de superficie, cuando el gradiente de temperatura en esa dirección es unitario.

Propiedades térmicas referidas al elemento

- **Transmitancia térmica K [W/m²K]:** es la cantidad de calor que transmite un cerramiento en estado de régimen, por metro cuadrado

de superficie (perpendicular al flujo de calor), por unidad de tiempo y por gradiente unitario de temperatura entre los ambientes interior y exterior.

- **Inercia térmica:** es la capacidad que tiene la masa de los materiales para absorber y acumular calor durante las horas de sol, para luego ser liberado a fin de acondicionar el ambiente interior (generalmente, por las noches). Esto contribuye a lograr un mejor confort térmico, al reducir las variaciones de temperatura interior, en comparación con las temperaturas exteriores. El proceso de transferencia de energía no es instantáneo, sino que existe un retraso en el tiempo para que se transfiera el calor por conducción de un lado del muro al otro; esto es conocido como *inercia térmica*. En la figura 1 se presentan los conceptos de *retraso térmico*, que es el tiempo transcurrido desde cuando la parte de calor absorbida por el muro llega a la cara opuesta, y *amortiguamiento*, el cual es la diferencia de energía que hay entre la cara expuesta del muro y la interior (Gutiérrez & Gallegos, 2015, p. 61).

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se refieren a las variables más importantes para los materiales de construcción o la tecnología constructiva. Dichas propiedades son: la resistencia a la compresión simple, la resistencia a la tracción y la resistencia al corte. Se entiende por *resistencia a la compresión simple* la capacidad de los materiales para resistir cargas de aplastamiento antes de llegar a la rotura. En el caso de la *resistencia a la tracción*, esta es la capacidad de los materiales para resistir cargas que tienden a traccionarlo antes de llegar a la rotura. La *resistencia al corte* hace referencia a la capacidad para resistir cargas de cizallamiento. Estas resistencias tienen una misma expresión; lo que cambia en cada caso es la fuerza que se le imprime al elemento (Gieck, 2005, p. 136).

Una vez definidos los conceptos de las propiedades térmicas y las mecánicas, se procede al análisis comparativo de cada una de ellas respecto a los materiales utilizados tanto en la construcción con tierra como en la construcción tradicional, de acuerdo con los resultados publicados por diferentes autores.

Densidades y propiedades térmicas de algunos materiales y componentes de la construcción con tierra e industrializados

En la tabla 1 se muestran la densidad, la conductividad térmica y la transmitancia térmica de diferentes mezclas de barro y de algunos elementos empleados en la construcción con tierra como el adobe, el barro alivianado, el barro macizo, el BTC y la quincha. La tabla 2 incluye los valores correspondientes de la densidad, la conductividad térmica, el espesor y la trans-

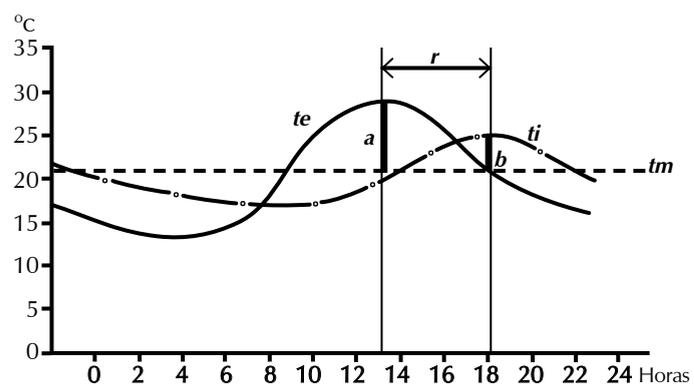
mitancia térmica de paredes de ladrillo cocido común macizo, de ladrillo cerámico hueco y de hormigón macizo fabricado *in situ*.

Se observa que los muros construidos con tierra tienen densidades cuyos valores varían entre 750 kg/m^3 para el barro alivianado y los 2000 kg/m^3 para el barro macizo; si se los compara con los materiales industrializados, sus densidades pueden oscilar entre los 1300 kg/m^3 para el ladrillo macizo común y los 2400 kg/m^3 para el hormigón fabricado *in situ*.

En correspondencia con los valores de la densidad de estos materiales, se pueden apreciar los valores de transmitancia térmica y de conductividad térmica, aportados por varios autores. Existen algunas diferencias entre la conductividad térmica de las construcciones de tierra y la convencional. En el primer caso se parte de valores de $0,30 \text{ W/mK}$ para el barro alivianado, de $0,95 \text{ W/mK}$ para el adobe y de $1,60 \text{ W/mK}$ para el barro macizo, con espesores variables desde los $0,074 \text{ m}$ para la quincha hasta los $0,35 \text{ m}$ del adobe.

En el segundo caso se parte de valores de $0,29 \text{ W/mK}$ para el caso de la pared de ladrillo hueco hasta los $2,32 \text{ W/mK}$ para el ladrillo macizo, con espesores de $0,18 \text{ m}$.

En la figura 2 se pueden apreciar valores de conductividad térmica, en escala logarítmica, de los materiales utilizados comúnmente en la construcción tradicional. El poliestireno expandido es el de menor conductividad térmica, y el cobre, el de mayor conductividad térmica. En la misma figura 2, se graficó el rango dentro del cual se hallan encuadrados los sistemas constructivos con tierra, y que varían entre los $0,46 \text{ W/mK}$ y los $1,00 \text{ W/mK}$, lo cual muestra la poca variabilidad de la conductividad térmica en las tipologías constructivas con tierra respecto a otros materiales utilizados comúnmente en la construcción tradicional.



r = retardo térmico
 b/a = amortiguación
 te = temperatura exterior
 ti = temperatura interior
 tm = temperatura media

Figura 1. Curvas de retardo térmico de un muro

Fuente: Fuentes Freixanet (2009, p. 122).

Elemento/material	Autores	Densidad ρ [kg/m ³]	Conductividad térmica I [W/mK]	Espesor [m]	Transmitancia térmica K [W/m ² K]
Adobe	Evans, Schiller y Garzón (2012, p. 93)	1500	0,58	0,35	-
	Evans (2007), p. 10			0,15	2,89
	Espinoza, et al. (2009), p.208		0,85	0,38	2,23
	Bestraten, Hormias y Altemir (2011), p. 7	1200	0,46	0,3	1,43
	Heathcote (2011), p. 119	1650	0,82	-	2,73
	Arancibia (2013), p. 223	1600	0,95	-	-
	Daudon et al. (2014), p. 250	1600	0,81	-	-
	Moevus, Anger y Fontaine (2012), p. 7	1200-1700	0,46-0,81	-	-
Barro alivianado	Hays y Matuk (2003), p. 245	1600	0,73	-	-
		1400	0,59	-	-
	Minke (2005), p. 57	1350	0,53	0,14 (tierra aligerada)	2,1
		1100	0,3	-	-
		1000	0,4	-	-
		800	0,3	-	-
		750	0,2	-	-
		750	0,2	-	-
Yuste (2014), p. 36	750	0,2	-	-	
Barro macizo	Minke (2005), p. 71	2000	1,2	-	-
		1800	0,95	-	-
		1600	0,8	-	-
		1400	0,6	-	-
		1200	0,5	-	-
	Bestraten et al. (2011), p. 10	1400-2000	0,60 a 1,60	--	-
Bloques de tierra comprimida (BTC)	Blasco et al. (2002), p. 5	1625	0,79	0,14	2,84
				0,29	1,84
	Arias et al. (2007), p. 5	1700	-	0,14	1,53
	Mas y Kirschbaum (2012), p. 81	-	-	0,15	2,77
	Heathcote (2011), p. 120	1750	0,93	-	-
	Bestraten et al. (2011), p. 7	1700	0,81	-	-
	Moevus et al. (2012), p. 7	1700/ 2200	0,81/0,93	--	-
Quincha	Hays et al. (2003), p. 315	1289	0,17	-	-
	Evans et al. (2012), p. 95	1900	-	0,15	1,69
	Fernández y Esteves (2004), p. 122	600	-	0,074	2,32
	Arias et al. (2007)	-	--	0,3	1,9
	Heathcote (2011), p. 120	2000	1,20	-	-
	Cuitiño et al. (2015), p. 8	400	-	0,094	2,64
	Moevus et al. (2012), p. 7	600-800	-	-	0,10-0,45

Tabla 1. Propiedades térmicas de algunos materiales y elementos de construcción con tierra, según distintos autores y espesores

Fuente: elaboración propia (2019).

Elemento/material	Autores	Densidad ρ [kg/m ³]	Conductividad Térmica λ [W/mK]	Espesor [m]	Transmitancia térmica K [W/m ² K]
Pared de ladrillo cocido macizo	Blasco et al. (2002), p. 5	1305	2,32	0,18	2,7
	Arancibia (2013), p. 70	1800	0,85	0,30	1,93
	IRAM 11601, p. 16	1800	0,87	0,12	-
	Evans (2007), p. 11	-	-	0,15	2,77
Pared de ladrillo cerámico hueco	Evans (2007), p. 11	-	-	0,10	2,36
	Muñoz et al. (2015), p. 34	-	0,29	0,12	-
Hormigón en masa in situ	Arancibia (2013), p. 70	2400	1,63	-	-
	Muñoz et al. (2015), p. 34	-	1,4	0,10	-

Tabla 2. Propiedades térmicas de algunos materiales y elementos de la construcción tradicional, según distintos autores y espesores
Fuente: elaboración propia (2018).

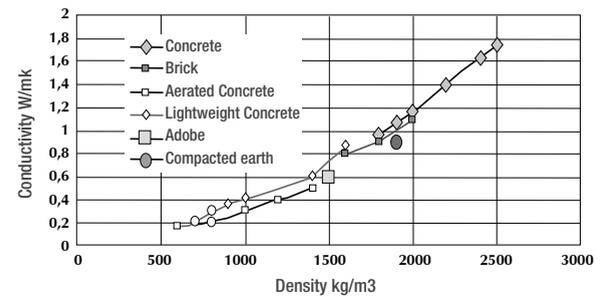
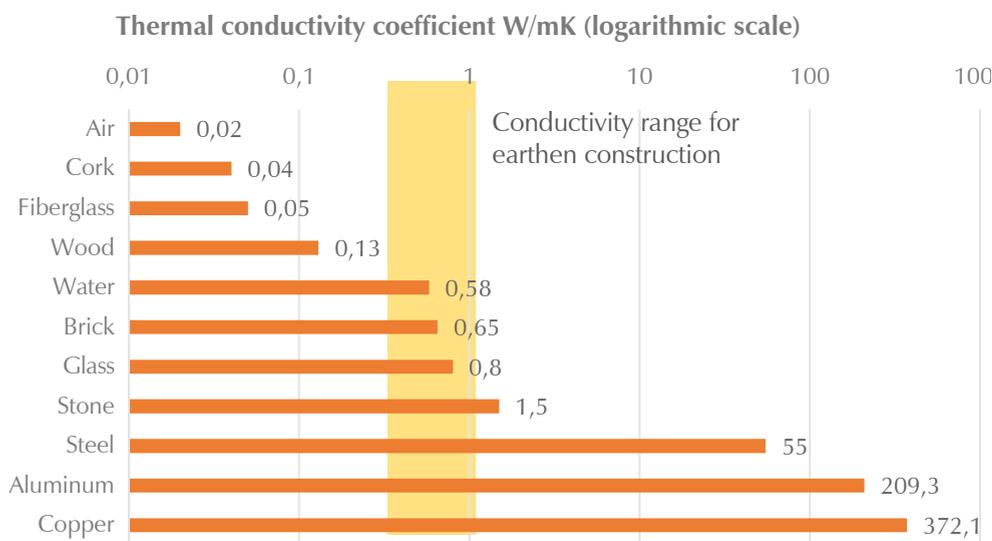


Figura 2. Comparación de las conductividades térmicas de los materiales de construcción en W/mK (escala logarítmica)
Fuente: elaboración propia, con base en Edison (2018).

Figura 3. Relación densidad-conductividad
Fuente: Evans (2004), p. 15.

Si se analiza la relación entre la densidad y la conductividad térmica de los materiales (figura 3), se puede observar cómo los materiales con bajas densidades tienen valores bajos de conductividad térmica. Esto se debe a que tienen una menor compactación del material y una mayor existencia de huecos con aire, y ello da por resultado un material más ligero y aislante respecto a uno denso y muy compacto. En el caso del hormigón liviano y celular, se puede ver esta relación, donde a mayor densidad, mayor conductividad. En el caso del adobe y de la tierra compactada, la densidad es relativamente constante, por lo que hay poca variabilidad en la conductividad; sin embargo, en el caso de la tierra aligerada y la quincha, las densidades son bajas, debido a la presencia de una mayor cantidad de aire y a la técnica manual de construcción que se emplea para la materialización de los muros (tabla 1).

Otro aspecto, analizado por varios autores, es el retraso térmico de los distintos sistemas constructivos. En la tabla 3 se observa el retraso térmico comparativo entre un muro de adobe y un

muro de tierra compactada, localizado en la zona Bioambiental IIIb, con espesores mínimos, según la Norma IRAM 11.605 (IRAM 11605, 1996, p. 16), de 25 cm y 35 cm, respectivamente, y que dan un retraso térmico de 8,4 horas y 11,4 horas, ambos con una transmitancia térmica similar. En ninguno de los casos se corre riesgo de condensación superficial e intersticial.

De forma similar, se analiza comparativamente la respuesta térmica del adobe respecto a los materiales tradicionales, como el hormigón, el ladrillo y la piedra (figura 4). Se aprecia que en todos los materiales existe una interrelación lineal entre el espesor del muro y el retraso térmico, donde el adobe se encuentra en una instancia intermedia entre el hormigón y el ladrillo. Si se realiza un estudio más riguroso, es común trabajar con muros de ladrillo de 0,20 m de espesor, lo cual da un retraso térmico de 6 hs. En cuanto al hormigón, para el mismo espesor el retardo es de 5 hs, pero en el adobe es característico construir muros con espesores de 0,30 m, lo cual da un retardo de 9 hs; es decir, si el pico máximo de temperatura exterior es al medio día, toda esa

energía absorbida será entregada al ambiente interior alrededor de las 21 hs, que es cuando es más necesaria para lograr el confort. Obviando las pérdidas desde la superficie exterior del elemento hacia el aire exterior, se considera, así mismo, que la absorción solar de la superficie exterior se considera uniforme, lo cual indica un valor constante para todos los casos.

Análisis de los valores máximos admisibles de transmitancia térmica para muros en Argentina

Con el fin de optimizar los cerramientos verticales de las viviendas, se utilizaron las normas IRAM 11.603 (2012) e IRAM 11.605 (1996), para considerar el valor máximo admisible $K_{max adm}$

de transmitancia térmica K en muros para cada zona bioambiental de Argentina (figura 5).

Posteriormente se coteja si el cerramiento, tomando en cuenta su transmitancia térmica indicada en las tablas 1 y 2, se verifica en las distintas zonas bioclimáticas, materializadas en las capitales de cada provincia a través de su temperatura exterior de diseño (invierno). La norma IRAM 11.605 indica 3 niveles de confort higrotérmico, que tienen que ver con la no existencia de condensación superficial, de acuerdo con la Norma IRAM 11.625 cuando las temperaturas interiores del aire se mantienen en determinados valores, donde Nivel A: Recomendado; Nivel B: Medio, y Nivel C: Mínimo. Para el presente estudio se ha considerado el Nivel C, que considera una temperatura de 18° C y hasta 4° C de diferencia entre la temperatura interior de diseño y la temperatura superficial interior del cerramiento.

En la tabla 4 se muestran los valores de $K_{max adm}$ para cada ciudad de provincia de Argentina, en función de la temperatura exterior de diseño (TED), de acuerdo con los valores de la Norma IRAM 11.603.

En la tabla 5 se presentan los valores máximos de K en función de la zona bioambiental definida en la norma IRAM 11.603 y el nivel de confort térmico. Las localidades ubicadas en zona bioambiental V y VI no requieren enfriamiento.

Tomando en cuenta el Nivel C de confort y los valores máximos admisibles de transmitancia térmica K para la época de invierno, en la tabla 6 se observa cuáles son los materiales aptos térmicamente para ser utilizados en la construcción de los cerramientos de los edificios, según las diferentes zonas bioclimáticas de la Argentina establecidas en la norma IRAM 11.603.

Para el análisis se consideraron los casos más comunes utilizados en la construcción tradicional, correspondientes a los muros de ladrillo de 0,20 m de espesor, con mampuestos de espesores de 0,18 m y con revoques en ambas caras de 0,01 m. Para los bloques de hormigón se los consideró sin revoque, y en ambos casos se utilizaron los valores de resistencias superficiales interior 0,13 m²K/W y exterior 0,04 m²K/W.

Para el muro de ladrillo revocado se obtuvo un valor de $K = 2,58 W/m^2K$, según lo cual resulta que dicho valor no verifica para ninguna zona bioambiental. Si se aumenta su espesor a 0,30 m, el valor de K disminuye a 2,03 W/m²K, verificando solamente para verano en las zonas bioambientales IIIa, IVa y IVb, que corresponden a zonas muy cálidas y a cálidas (figura 4). En el caso del muro de bloque de hormigón con relleno de lana de vidrio, se tiene un espesor de 0,19 m, que verifica para todas las zonas bioambientales; esta es la opción óptima para el invierno.

Material	Adobe	Tierra compactada
Espesor mínimo, Norma IRAM 11.605,C (1996)	25 cm	35 cm
Transmitancia térmica	1,71 W/m ² K	1,79 W/m ² K
Atraso térmico	8,4 horas	11,4 horas
Admitancia	4,3 W/m ² K	4,9 W/m ² K
Condensación superficial (IRAM 11.625, 2000)	No	No
Condensación intersticial (IRAM 11.625, 2000)	No	No

Tabla 3. Retraso térmico de un muro de adobe, comparado con el de un muro de tierra compactada

Fuente: Evans (2004, p. 15)

Figura 4. Curvas de retraso térmico de diferentes materiales de construcción

Fuente: Evans (2007, p. 10).

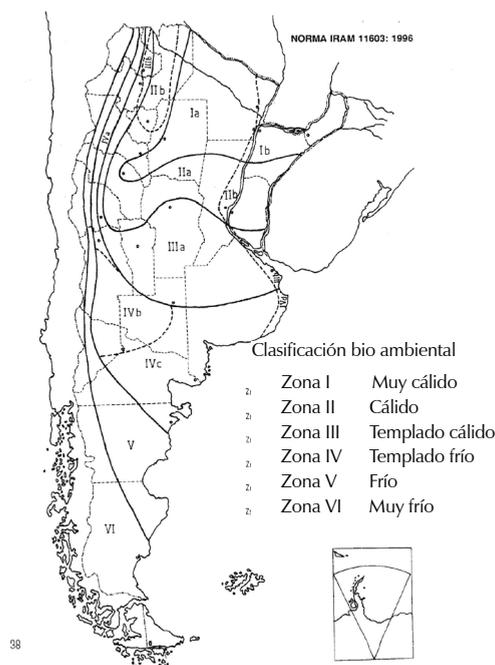
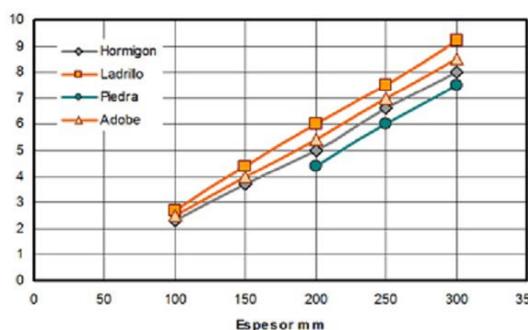


Figura 5. Zonas bioambientales de la Argentina

Fuente: IRAM 11603 (1996, p. 38).

Provincia	Temp. ext. de diseño (invierno)	Zona Bioambiental	Valores de $K_{max adm}$ para invierno	Valores de $K_{max adm}$ para verano
		Figura 4	Nivel mínimo(C)	Nivel mínimo(C)
Buenos Aires	3,10	IIIa	1,85	2,0
Catamarca	1,30	IIa	1,85	1,8
Córdoba	1,30	IIIa	1,85	2,0
Corrientes	7,60	Ib	1,85	1,8
Resistencia-Chaco	5,90	Ia	1,85	1,8
Paraná-Entre Ríos	3,50	IIb	1,85	1,8
Formosa	7,70	Ia	1,85	1,8
Jujuy	0,20	IIb	1,85	1,8
La Rioja	0,40	Ia	1,85	1,8
Posadas-Misiones	6,90	Ib	1,85	1,8
Santiago del Estero	2,10	IIa	1,85	1,8
Tucumán	2,20	IIb	1,85	1,8
Oliveros-Santa Fé	1,30	IIb	1,85	1,8
Orán-Salta	4,9	IIb	1,85	1,8
Cdro. Rivadavia-Chubut	-1,10	V	1,74	--
Santa Rosa-La Pampa	-2,70	IIIa	1,61	2,0
Mendoza	-1,00	IVa	1,75	2,0
San Juan	-1,50	IIIa	1,71	2,0
San Luis	-0,70	IIIa	1,78	2,0
Neuquén	-7,3	IVb	1,33	2,0
Río Gallegos-Santa Cruz	-12,4	VI	1,11	--
Bariloche-Río Negro	-11,4	VI	1,15	--
Ushuaia-Tierra del Fuego	-8,6	VI	1,23	--

Tabla 4. Valores de transmitancia térmica máxima admisible $K_{max adm}$ para cada provincia de Argentina
Fuente: IRAM 11.603, (2012).

Estimaciones del espesor del muro exterior según la técnica empleada para las construcciones con tierra

A partir del análisis realizado según diferentes autores y normas, se tomaron cinco técnicas de construcción con tierra: el adobe, el BTC, la tapia, la quincha y la paja encofrada, y se estimó el ancho mínimo de un muro exterior portante o autoportante necesario para que verifiquen los valores de K del nivel de confort C (tabla 7) adecuados para la los muros exteriores de una vivienda localizada en el Gran Buenos Aires, correspondiente a la zona bioambiental IIIb (zona templada cálida con amplitudes térmicas pequeñas durante todo el año). Para el caso del adobe y del BTC, los espesores de los muros en el exterior varían entre 0,35 m y 0,43 m. Para la tapia es necesario trabajar con espesores de muros de 0,40 m. En cuanto a la quincha y la paja encofrada, que tienen mayor capacidad aislante —por la

Zona bioambiental	Para muros		
	Nivel A	Nivel B	Nivel C
I y II	0,45	1,10	1,80
III y IV	0,50	1,25	2,00

Tabla 5. Valores máximos de transmitancia térmica en función de la zona bioambiental y el nivel de confort higrotérmico
Fuente: IRAM 11605 (1996, p. 7).

caña, en el caso de la quincha, y por el aire contenido entre la paja, en el caso de la paja encofrada—, ambas permiten disminuir los espesores de trabajo, que en la quincha es de 0,28 m para los muros exteriores. Así mismo, en el caso de la quincha, se ha analizado que, en el caso extremo de la localidad de Río Gallegos, el espesor del muro de quincha debe ser de 0,27 m para mantenerse dentro del nivel C de la norma, y, en caso de ser factible, se puede lograr un nivel B, con un espesor de 0,13 m totales, pero incorporando 2 cm de poliestireno expandido (Cuitiño, Esteves & Rotondaro, 2014). En el caso de la

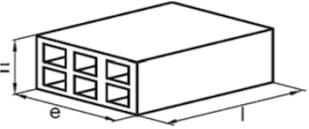
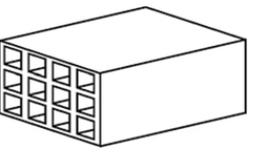
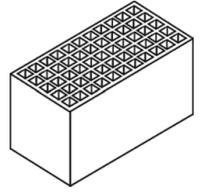
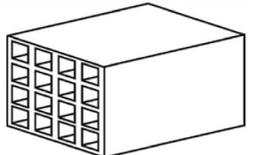
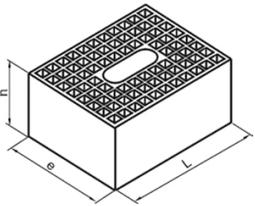
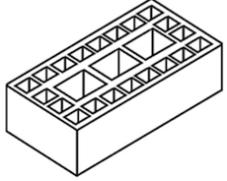
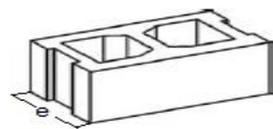
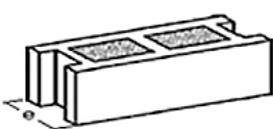
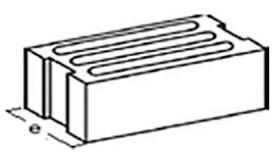
Tipo de mampuesto	Representación gráfica	Verificación
Ladrillo cerámico macizo $e = 0,20 \text{ m}$ $K = 2,58 \text{ W/m}^2\text{K}$		No verifica en ninguna zona bioambiental
Bloque cerámico 6 huecos $e = 0,20 \text{ m}$ $P = 168 \text{ kg/m}^2$ $K = 1,85 \text{ W/m}^2\text{K}$		Verifica para las zonas bioambientales Ia, IIa, IIIa, Ib y IIb
Bloque cerámico 9 huecos $e = 0,20 \text{ m}$ $P = 125 \text{ kg/m}^2$ $K = 1,66 \text{ W/m}^2\text{K}$		Verifica para todas las zonas bioambientales, menos las IIIa, IVb y VI
Bloque cerámico térmico $e = 0,25 \text{ m}$ $P = 135 \text{ kg/m}^2$ $K = 0,83 \text{ W/m}^2\text{K}$		Verifica para todas las zonas bioambientales
Bloque cerámico 16 huecos $e = 0,20 \text{ m}$ $P = 136 \text{ kg/m}^2$ $K = 1,51 \text{ W/m}^2\text{K}$		Verifica para todas las zonas bioambientales, menos las IVb y VI
Bloque cerámico portante $e = 0,20 \text{ m}$ $P = 151 \text{ kg/m}^2$ $K = 1,88 \text{ W/m}^2\text{K}$		No verifica en ninguna zona bioambiental
Bloque de hormigón 3 huecos $e = 0,20 \text{ m}$ $D = 1900 \text{ kg/m}^3$ $K = 2,70 \text{ W/m}^2\text{K}$		No verifica en ninguna zona bioambiental
Bloque de hormigón 2 huecos $e = 0,195 \text{ m}$ $D = 1460 \text{ kg/m}^3$ $K = 2,08 \text{ W/m}^2\text{K}$		No verifica en ninguna zona bioambiental
Bloque de hormigón con relleno de lana de vidrio $e = 0,20 \text{ m}$ $D = 1770 \text{ kg/m}^3$ $K = 1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$		Verifica para todas las zonas bioambientales
Bloque de hormigón multicámaras $e = 0,19 \text{ m}$ $D = 2200 \text{ kg/m}^3$ $K = 1,66 \text{ W/m}^2\text{K}$		Verifica para todas las zonas bioambientales, menos la zona VI

Tabla 6. Verificación de la transmitancia térmica de diversos materiales en las zonas bioambientales

Fuente: elaboración propia, con base en IRAM 11.601 (2002, p. 14).

paja encofrada, el espesor de muro requerido es de 0,25 m. Observando estos valores, se puede concluir que para el Gran Buenos Aires los cerramientos con alguna de estas cinco técnicas son una opción térmica aceptable al cerramiento de ladrillo cerámico de 0,35 m de espesor.

Resistencia mecánica de materiales y componentes de muros de cerramiento

Existe una reiterada discriminación de las construcciones con tierra, debido a la falta de conocimiento respecto a las características mecánicas de los materiales, los componentes y los sistemas constructivos empleados. Muchos autores han llevado a cabo ensayos en piezas de adobe, BTC y tapia, principalmente, para determinar la resistencia a esfuerzos de compresión simple, corte y flexión. Este comportamiento es de suma importancia al momento de diseñar y construir. En la etapa de evaluación de la resistencia de los elementos constructivos, es cuando cobran relevancia la técnica de elaboración del sistema constructivo, los materiales y las proporciones utilizadas.

La Norma Peruana de Adobe E.080 (Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción, 2000) define el adobe como un “bloque macizo de tierra sin cocer, el cual puede contener paja u otro material que mejore su

estabilidad frente a agentes externos y atenúe las fisuras por contracción de secado”. En el caso del BTC, el proceso es más controlado, debido a que se utiliza una prensa para generar la presión de compactación, a diferencia del mampuesto de adobe, que no se fabrica con compactación del mortero. Esta compresión implica un aumento de la densidad del bloque, lo que le confiere mejores capacidades mecánicas.

La tapia difiere de los anteriores componentes en el hecho de que consiste en un encofrado móvil dentro del cual se va comprimiendo la tierra estabilizada por capas, mediante un pisón, y de ese modo se construye el muro por partes. En las tablas 8, 9, 10 y 11 se presentan valores de resistencia a la compresión, a la flexión y a la tracción obtenidos por diversos autores, a partir de ensayos normalizados en distintos países y de datos propios.

Para el caso del adobe, la resistencia a la compresión varía entre 3 kgf/cm² y 21 kgf/cm²; son muy bajas sus resistencias a la tracción y al corte: 3,16 kgf/cm². El BTC mejora la respuesta, al obtenerse con él valores que van desde 17 kg/cm² hasta 121,8 kg/cm². La oscilación responde al contenido de cemento en la mezcla: a medida que aumenta el porcentaje agregado de cemento, aumenta la resistencia a la compresión y a la flexión. Finalmente,

Técnica/tipo de muro	Espesor de muro exterior (m)	
	Portante	Autoportante
Adobe (densidad entre 1500 y 1600 kg/m ³)	Simple	0,40
	Doble	0,43
BTC de 0,14 x 0,29 x 0,096 m (densidad entre 1700 y 2000 kg/m ³)	Simple	0,35
	Doble	0,43
Tapia (densidad entre 1800 y 2000 kg/m ³)	0,40	0,40
Quincha (densidad entre 700/900 kg/m ³)		0,28
Paja encofrada apisonada (densidad entre 500/700 kg/m ³)		0,25

Tabla 7. Estimaciones del espesor mínimo del muro exterior necesario para verificar nivel de confort higrotérmico C en zona bioclimática IIIb (área central de la Provincia de Buenos Aires).
Fuente: elaboración propia (2018).

Adobe			
País	Autor	Resistencias kgf/cm ²	
El Salvador	Pons (2018), p.1	Compresión adobe (unidad)	3-5
Estados Unidos	McHenry (1996), p. 184	Compresión adobe (unidad) (laboratorio)	21
Uruguay	Mazzeo et al. (2007), p. 71	Compresión adobe (unidad)	11
Bélgica	Houbén y Guillaud (1984), p. 148	Compresión adobe (unidad)	20
Red PROTERRA	Rotondaro (2011), p. 23	Compresión adobe (unidad)	12
Colombia	Rivera (2012), p. 176	Compresión adobe (unidad) flexión-módulo de rotura	30,4 4,10

Tabla 8. Valores de resistencias mecánicas del adobe.
Fuente: elaboración propia (2018).

Bloque de Tierra Comprimido (BTC)			
País	Autor	Resistencias kgf/cm ²	
Argentina	Gatani (2002), p. 211	Compresión unidad-prensa	121,8
		Compresión unidad-impacto	76,8
Argentina	Arias et al. (2006), p.3 * *Ponencias, Comisión 4	Compresión unidad	f'u 50, f'um 70
		Compresión mortero 1:1:2 cem-arena-suelo	50
		Compresión mampostería a 28 días	50
Uruguay	Etchebarne, Piñero y Silva (2006), p. 16	Compresión unidad	17 / 20 40
		Compresión	6%*: 42,22; 8%*: 48,56; 10%: 60,78
Argentina	Sánchez et al. (2008), p.194	Compresión unidad	6%*: 55,98; 8%*: 56,50; 10%*: 89,28
		Compresión unidad seco	6%*: 75,79; 8%*: 78,32; 10%*: 91,33
México	Roux, Espuna y García (2008), p. 217	Compresión unidad húmedo	6%*: 54,34; 8%*: 37,50; 10%*: 61,73
		Flexión 10 días	6%*: 10,30; 8%*: 11,23; 10%*: 14,05
		Compresión 28 días	39,8
Colombia	Bedoya-Montoya, M. (2018), p. 67	Compresión suelo solo	2,7
		6% cal:	8,2
Brasil	De Souza et al. (2008), p. 175	6% cem:	24,7
		10% cem:	40

* Porcentaje de agregado de cemento

Tabla 9. Valores de resistencias mecánicas del BTC

Fuente: elaboración propia (2018).

Tapia			
País	Ejemplo/autor	Resistencias kgf/cm ²	
Brasil	Neves (2006), p. 4	Compresión	adopta mín. 10
Argentina	Luciano et al. (2006), p. 9	Compresión	1-5* 196; 1-6*: 136; 1-8*: 104
		Con 8,5 % hum.	1-10*: 72; 1-12*: 60; 1-15*: 56
Argentina	Arias et al. (2006), p.10	Compresión	1:8*: 65

* Suelo-cemento

Tabla 10. Valores de resistencias mecánicas de compresión del tapial

Fuente: elaboración propia (2018).

la tapia tiene una resistencia variable, de acuerdo con la conformación de la mezcla de arena-arcilla y con el espesor de muro construido; así, con ella se obtienen valores de entre 46 kgf/cm² y 196 kgf/cm². En el caso de otros materiales y componentes, como el ladrillo común cocido, en la tabla 12 se observan para este valores de compresión desde 17,5 kgf/cm² hasta 78 kgf/cm². Para para el bloque hueco de hormigón, dichos valores oscilan entre los 45,5 kgf/cm² y los 130 kgf/cm². De acuerdo con estos datos, se puede decir que el adobe tiene valores muy bajos de resistencia mecánica, por lo cual sería necesario reforzar la construcción para mejorar su comportamiento estructural. El BTC y la tapia presentan una mejor respuesta que el adobe en cuanto a los valores de resistencias mecánicas normalizadas, y se los puede encuadrar entre el

ladrillo común cocido y el bloque de hormigón; sin embargo, a pesar de su mejor respuesta, se debe tener en cuenta que en el caso de los sistemas manufacturados se trata de espesores de 0,18 m, y en el de los sistemas de construcción con tierra se trata de espesores de entre 0,30 m y 0,90 m.

Discusión

En el trabajo se hizo un análisis comparativo de algunas características del comportamiento térmico y mecánico de diversos materiales de construcción y elementos elaborados con suelos naturales estabilizados, respecto a las propiedades de algunos materiales industrializados convencionales. Se pudo observar la dificultad de homogeneizar los valores en los casos de las técnicas del adobe, la tierra

País	Ejemplo/autor	Resistencia al corte (kgf/cm ²)	
Colombia	Yamin et al. (2007), p. 297	Muro adobe esp. 0,20 m	3,16
Argentina	Cuitiño, Maldonado y Esteves (2014), p. 241	Muro quincha esp. 0,10 m	1,33
Argentina	Norma INPRES CIRSOC 103-III (2016)	Ladrillo común cocido macizo	41,6-31,2
Resistencias a compresión simple (kgf/cm ²)			
	Gatani (2002), p. 211	Ladrillo común cocido	78
	Cuitiño et al. (2014), p. 244	Muro ladrillón 0,18m	25,49-17,89
		Ladrillo macizo portante	50
Argentina	Norma INPRES CIRSOC 103 (2016, p. 23)	Bloque de hormigón portante	130
		Bloque hueco cerámicos portantes	130
	Reglamento CIRSOC 501 (2007, p. 27)	Ladrillo macizo portante E-I-N	25,0/22,5/17,5
		Bloque hueco de hormigón portante E-I-N	65,0/58,5/45,5
		Bloque hueco cerámicos portantes E-I-N	65,0/58,5/45,5
Chile	Valdez y Rapimán (2007), p. 87	Bloque de hormigón portante	68-80

(E): Resistencia elevada; (I): Resistencia intermedia; (N): Resistencia normal

aligerada y la tapia; este comportamiento tiene que ver con la diversidad de densidades; también, con la variabilidad de los materiales y de los morteros que habitualmente se emplean en su fabricación.

Se pudo observar, además, que la conductividad térmica varía de forma exponencial respecto a la densidad, la cual se modifica de acuerdo con el agregado de fibra vegetal y el grado de compactación. Es decir, a mayor compactación disminuye la porosidad, o porcentaje de aire contenido en el interior, y de esta forma disminuye también la aislación y aumenta la conductividad térmica: a mayor densidad del elemento constructivo, mayor valor de conductividad. Este comportamiento es, probablemente, el origen de las diferencias, a veces notables, entre los valores de conductividad térmica o de transmitancia térmica, de acuerdo con los resultados obtenidos mediante ensayos normalizados llevados a cabo por diferentes autores. Resumiendo el comportamiento térmico, en la tabla 12 se muestra, independientemente de los autores, entre qué intervalos oscilan los valores de densidad, conductividad y transmitancia térmica, datos resumidos de las tablas 1 y 2.

Se observa que los valores de densidad encontrados para los materiales de las técnicas constructivas con tierra con morteros de baja densidad de fibras y con suelos estabilizados compactados tienen valores de entre 1200 kg/m³ y 2200 kg/m³, dado que no es posible trabajar con densidades menores, pues hacerlo implica la existencia de mucho aire incorporado en los morteros.

En el caso de los materiales industrializados más utilizados en la construcción convencional

en Argentina, se observa que se trabaja con densidades superiores, que están entre los 1305 kg/m³ y los 2400 kg/m³.

Respecto a la Norma IRAM 11.605, se puede concluir que para lograr el nivel C de confort ambiental en la zona IIIb, correspondiente a la Provincia de Buenos Aires, esta es de 1,85 W/m² K, y se observó que con la tecnología convencional hay que trabajar con muros de ladrillos cocidos comunes macizos de 0,35 m de espesor, y en el caso del bloque cerámico hueco y del bloque cerámico portante se necesita un muro de 0,20 m de espesor, para lograr ese nivel de aislación. Comparativamente, los espesores necesarios estimados para los muros exteriores de adobe y de BTC oscilan entre 0,35 m y 0,43 m; en la tapia se necesita un muro de 0,40 m; en el caso de la quincha, espesores de 0,28 m, y para la paja encofrada, de 0,25 m.

El otro aspecto analizado es el comportamiento de la resistencia mecánica, principalmente a la compresión simple, dado que es una de las propiedades mecánicas más importantes de los materiales y los componentes de construcción con tierra. En el caso de la resistencia a compresión simple, el intervalo de variación es de entre 3 kgf/cm² y 21 kgf/cm² para el adobe, exceptuando un solo valor de 30,4 kgf/cm² en la tabla 9, en el que son muy bajas las resistencias a la tracción y al corte. La resistencia a la compresión simple mejora en el caso del BTC, con valores entre 17 kg/cm² y 121,8 kg/cm², comparables con los del ladrillo común cocido, que pueden oscilar entre 17,5 kgf/cm² y 70 kgf/cm², y los del bloque hueco de hormigón, que se encuentran entre los 45,5 kgf/cm² y los 130 kgf/cm².

Tabla 11. Valores de resistencias de corte y compresión simple de materiales y componentes de construcción con tierra e industriales (Reglamento CIRSOC 501)

Fuente: Elaboración propia (2018).

Material	Densidad kg/m ³	Conductividad térmica W/mK	Transmitancia térmica W/m ² K
Adobe	1200-1700	0,46-0,95	1,43-2,89
BTC	1625-2200	0,79-0,93	1,53-2,84
Barro macizo	1200-2000	0,50-1,60	-
Quincha	400-2000	0,17-1,20	0,45-2,64
Ladrillo cocido común	1305-1800	0,87-2,32	1,93-2,70
Hormigón en masa	2400	1,40-1,63	-

estos cambios podrían contribuir con el mejoramiento de las ofertas de construcción del hábitat, con una franca orientación hacia arquitecturas y construcciones sustentables, y aportar para reducir el déficit habitacional.

Es posible que en este incremento de construcciones con tecnología de tierra hayan influido las características y las propiedades inherentes a sus comportamientos tanto mecánicos como térmicos, como la capacidad aislante, la facilidad de construcción, el uso de materiales locales naturales y su bajo costo económico relativo.

De la misma forma, es relevante el aspecto estructural de algunas de las técnicas de construcción con tierra, si se acompañan con la calidad de diseño y de ejecución de obra (en el sentido del ancho de muro, los refuerzos y la esbeltez). Se incluye dentro de esta reflexión si es una zona sísmica, dado que dicha tecnología brinda la posibilidad de trabajar en construcciones con tierra con estructuras livianas, flexibles y resistentes.

La mayor aceptación y el mayor interés en la construcción con tierra son un incentivo para seguir investigando sobre el aprovechamiento de las propiedades y las características térmicas y de resistencias mecánicas que caracterizan a las distintas formas de construir empleando suelos naturales modificados y edificaciones de mejor confort ambiental y estabilidad estructural.

Conclusiones

A modo de reflexión final y considerando los resultados de esta investigación, aun tomando en cuenta las particularidades y el comportamiento poco estandarizable de los diferentes materiales, los morteros y los elementos constructivos, en el caso de Argentina la proyección del desarrollo de la arquitectura y la construcción con tierra tiene gran relevancia en el campo de la vivienda. Esta proyección se fundamenta en que a lo largo de las últimas décadas se registra un incremento en la producción de viviendas y de edificios públicos con esta tecnología en todas las regiones del país, desde las de mayor vulnerabilidad sísmica hasta las de menor. En un futuro cercano,

Tabla 12. Rangos de valores de densidad, conductividad y transmitancia térmica de componentes y materiales de la construcción con tierra y otros industriales

Fuente: elaboración propia (2018).

Referencias

- Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E., & Serra, J. (1997). La construcción sostenible: el estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, 451(49), 41-47. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1997.v49.i451.936>
- 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* (Tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: <http://oa.upm.es/21903/>
- Arias, E., Latina, S. M., Alderete, C., Mellace, R. F., Sosa, M., & Ferreira, I. (2007). *Comportamiento Térmico de Muros de Tierra en Tucumán*, (pp. 1-8). Buenos Aires, Argentina: ANPCYT, Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. Recuperado de: https://fci.uib.es/digitalAssets/177/177906_4.pdf
- Arias, L., Alderete, C., Mellace, R., Latina, S., Sosa, M., & Ferreyra, I. (2006). Diseño y Análisis Estructural de Componentes Constructivos de Tierra Cruda. *Memorias Vº Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra (Vº SIACOT)*. Mendoza: CRICYT CONICET. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4529876>
- Bedoya-Montoya, C. (2018). Construcción de vivienda sostenible con bloques de suelo cemento: del residuo al material. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 20(1), 62-70. <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.1.1193>
- Bestraten, S., Hormias, E., & Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 63(523), 5-20. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.046>
- Blasco, I., Albarracín, O., Hodalgo, E., Dubós, A., Pereyra, A., Flores, M., & Merino, N. (2002). Construcción de salón comunitario en suelo-cemento. *Ier Seminario – exposición -Consorcio Terra cono-sur. La tierra cruda en la construcción del hábitat*, (p. 10).
- Cáseres Teran, J. (1996, octubre). Desempeño Sostenible. *Revista Tracte* (66), 7-8.
- Cuitiño, G., Esteves, A., & Rotondaro, R. (2014). Análisis del comportamiento térmico de muros de quincha. Castellanos Ochoa, M. N. (Comp.) *Arquitectura de Tierra: Patrimonio y sustentabilidad en regiones sísmicas*. 14º SIACOT - Seminario Ibero-Americano de Arquitectura y Construcción con Tierra (pp. 184-192). Tucumán.
- Cuitiño, 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), e063. 1-11 doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.082>
- Cuitiño, G., Maldonado, G., & Esteves, A. (2014). Analysis of the mechanical behavior of prefabricated wattle and daub walls. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, 10, 5
- Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 203-210. Recuperado de: <https://www.mendoza-conicet.gov.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2009/2009-t005-a026.pdf>
- Etchebarne, R., Piñero, G., & Silva, J. (2006). Proyecto Terra Uruguay. Montaje de prototipos de vivienda a través de la utilización de tecnologías en tierra: adobe, fajina y BTC. *Construcción con Tierra*, 2, 5-20. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/151807285.pdf#page=5>
- Evans, J., Schiller, S., & Garzón, L. (2012). Desempeño térmico de viviendas construidas con quincha. *Construcción con tierra*, 5, 93-102. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/151807279.pdf#page=125>
- Evans, J. (2004). Construcción en tierra: Aporte a la habitabilidad. *1er Seminario de Construcción con Tierra*, 12-17.
- Evans, J. (2007). Actualización de la construcción con tierra. *Construcción con tierra* 3, 7-15.
- Fernández, E., & Esteves, A. (2004). Conservación de energía en sistemas autocons-

- truidos. El caso de la Quincha mejorada. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8(1) 121-125. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/81714>
- Freire, D., & Tinoco, J. (2015). *Estudio de una propuesta de mejoramiento del sistema constructivo adobe* (Tesis de grado). Ecuador: Universidad de Cuenca. Recuperado de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/22773>
- Fuentes Freixanet, V. A. (2009). Modelo de análisis climático y definición de estrategias de diseño bioclimático para diferentes regiones de la República Mexicana. Tesis de Doctor en Diseño. Azcapotzalco: Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco División de Ciencias y Artes para el Diseño. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/128736412.pdf>
- Gatani, M. (2002). Producción de ladrillos de suelocemento. ¿Una alternativa eficiente, económica y sustentable? *Actas I Seminario Exposición La tierra cruda en la construcción del hábitat* (pp. 203-212). San Miguel de Tucumán: Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de Tucumán.
- Gieck, K. (2005). Manual de fórmulas técnicas. México: Alfaomega.
- Gutiérrez, R., & Gallegos, D. (2015). Construcción sustentable, Análisis de retraso térmico a bloques de tierra comprimida. *Contexto*, 9(11). 59-71. Recuperado de: <http://contexto.uanl.mx/index.php/contexto/article/view/49>
- Hays, A., & Matuk, S. (2003). Recomendaciones para la elaboración de normas técnicas de edificación con técnicas mixtas de construcción con tierra. En *Técnicas mixtas de construcción Proyecto XIV .6 Proterra Habyted*
- Subprograma XIV-Viviendas de Interés Social. (pp. 121-352). Salvador: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Heathcote, K. (2011). The thermal performance of earth buildings. *Informes de la Construcción*, 63(523), 117-126. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.024>
- Houbén, H., & Guillaud, H. (1984). *Earth construction*. Brussels: CRATERRE/PGC/CRA/UNCHS/AGCD.
- INPRES CIRSOC 103 parte III. Norma (2016). *Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes*. 75. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- INPRES CIRSOC 501. Norma (2007). *Reglamento argentino de estructuras de mampostería*. 64. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- IRAM 11.601. Norma (2002). *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo*. 52. Buenos Aires, Argentina.
- IRAM 11.603. Norma (2012). *Condicionamiento térmico de edificios Clasificación bioambiental de la República Argentina*. 43. Buenos Aires, Argentina.
- IRAM 11.625. Norma (2000). *Aislamiento térmico de edificios – Verificación de sus condiciones higrotérmicas*. 41. Buenos Aires, Argentina.
- IRAM 11605. Norma (1996). *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos*. 27. Buenos Aires, Argentina.
- Luciano, F., Brade, M., Garay, E., Mercanti, N., & Tirner, J. (2006). Proyecto, diseño y construcción de componentes de viviendas con suelo-cemento monolítico en la provincia de corrientes. V *Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra - I Seminario Argentino de Arquitectura y Construcción con Tierra*. Mendoza, Argentina: AHTER-CRIATIC. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4531585>
- Mas, J. M., & Kirschbaum, C. F. (2012). Estudios de resistencia a la compresión en bloques de suelo-cemento. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 77-84. Recuperado de: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2012/2012-t005-a010.pdf>
- Mazzeo, J., Lasus, O., Calone, M., Sanguinetti, J., Ferreiro, A., Márquez, J., & Mato, L. (2007). *Proyecto hornero: prototipo global de experimentación construcción con materiales naturales*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/9469>
- McHenry Jr, P. (1996). *Adobe. Cómo construir fácilmente*. México: Trillas.
- Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción. (2000). *Norma Técnica de edificación E.080*. 16. Lima, Perú. Recuperado de: <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=3478>
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción con tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual* (2. ed.) Kassel, Alemania: Fin de Siglo.
- Moëvus, M., Anger, R., & Fontaine, L. (2012). Hygrothermo-mechanical properties of earthen materials for construction: a literature review. *Terra*, 12, 1-10. Recuperado de: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01005948>
- Muñoz, N., Thomas, L., & Marino, B. (2015). Comportamiento térmico dinámico de muros típicos empleando el método de la admitancia. *Energías Renovables Y Medio Ambiente (ERMA)*, 36. 31-39. Recuperado de: <http://www.ekeko.org/ojs8/index.php/ERMA/article/view/125>
- Neves, C. (2006). O uso do solo-cimento em edificações. A experiencia do CEPED. V *Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra - I Seminario Argentino de Arquitectura y Construcción con Tierra*, (pp. 1-11). Mendoza, Argentina: AHTER-CRIATIC. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4529722>
- Piattoni, Q., Quagliarini, E., & Lenci, S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Construction and Building Materials*, 2067-2075. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.039>
- Pons, G. (2018). *Características generales del adobe como material de construcción*. Recuperado de: <http://ecosur.org/index.php/es/ecomateriales/adobe/712-caracteristicas-generales-del-adobe-como-material-de-construccion>
- Rivera Torres, J. (2012). El adobe y otros materiales de sistemas constructivos en tierra cruda: caracterización con fines estructurales. *Apuntes. Revista de Estudios sobre patrimonio cultural*, 25(2). 164-181. Recuperado de: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/revApuntesArq/article/view/8763>
- Rotondaro, R. (2011). *Adobe: Técnicas de construcción con tierra*. Brasil: PROTERRA
- Roux G, R., Espuna M, J., & Garcia I, V. (2008). Influencia del cemento portland en las características de resistencia de compresión simple y permeabilidad en los BTC. *Seminário Ibero-americano de Construção com Terra-II Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil* (pp. 210-219). Brasil: UTN Rafaela.
- Sánchez, M., Begliardo, H., Casenave, S., & Schuck, J. (2008). Elaboración de bloques de suelo-cemento con barros de excavación para pilotes. *Seminário Ibero-americano de Construção com Terra-II Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil* (pp. 190-197). Brasil: UTN Rafaela.
- Valdez, G., & Rapimán, J. (2007). Propiedades físicas y mecánicas de bloques de hormigón compuestos con áridos reciclados. *Información Tecnológica*, 18(3), 81-88. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v18n3/art10.pdf>
- Vega, P., Andrés, J., Guerra, M., Morán, J., Aguado, P., & Llamas, B. (2011). Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3020-3023. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.02.003>
- Wassouf, M. (2014). *Passivhaus - de la casa pasiva al estándar*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Yamín Lacouture, L., Phillips Bernal, C., Reyes Ortiz, J., & Ruiz Valencia, D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 20(2). 286-377. Recuperado de: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/revApuntesArq/article/view/8984>
- Yuste, B. (2014). *Arquitectura en tierra. Caracterización de los tipos edificatorios* (Tesis de Máster de Arquitectura, Energía y Medio Ambiente). Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de: https://www.aie.webs.upc.edu/maema/wp-content/uploads/2016/07/26-Beatriz-Yuste-Miguel-Arquitectura-de-tierra_COMPLETO.pdf

