

# CONSTRUCCIÓN CON BLOQUES DE SUELO CEMENTO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA ENVOLVENTE EDILICIA<sup>1</sup>

Recibido 23/05/2022  
Aceptado 23/06/2022

## CONSTRUCTION WITH SOIL-CEMENT BLOCKS AS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE FOR BUILDING ENVELOPES

### **Adriana Belen Costantini-Romero**

Arquitecta, Profesora Asistente, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-5164-0601>  
[belen.costantini@unc.edu.ar](mailto:belen.costantini@unc.edu.ar)

### **Franco M. Francisca**

Doctor en Ciencias de la Ingeniería e Ingeniero Civil, Profesor, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-6965-9036>  
[franco.francisca@unc.edu.ar](mailto:franco.francisca@unc.edu.ar)

**1** Investigación financiada por los proyectos CONICET: "Optimización sustentable de barreras ambientales compuestas para la aislación de residuos incorporando sistemas de recuperación de calor" #11220150100298co; y foncyt: "Optimización del comportamiento de barreras ambientales compuestas para la aislación de residuos mediante la adición de escorias de acería" # PICT-2019-1289.



## RESUMEN

Los materiales alternativos, como los bloques de suelo estabilizado con cemento (BSEC), brindan nuevas oportunidades para realizar envolventes amigables con el medio ambiente. Los materiales de construcción realizados con suelo son fáciles de obtener y abundantes en la naturaleza, además de que su uso minimiza los impactos ambientales y mejora el comportamiento térmico de las edificaciones. En este trabajo se analizan las propiedades térmicas de los BSEC con el objeto de evaluar la eficiencia de los bloques para la construcción de envolventes. Se determina, mediante ensayos experimentales, que los porcentajes de cemento deberían ubicarse entre 3% y 9% para la fabricación de BSEC adecuados para mamposterías no portantes. El contenido de humedad debería ser inferior al 20%, a fin de evitar aumentos significativos en la conductividad térmica. A través de termografía pasiva se define también la resistencia térmica de los muros y las resistencias superficial interior y exterior mediante. Las distintas composiciones de muros con BSEC de una vivienda experimental en condiciones reales de uso se monitorearon durante época invernal y, a partir de ello, se establecieron transmitancias térmicas para los muros desde 1,219 W/m<sup>2</sup>K a 1,599 W/m<sup>2</sup>K. Los resultados obtenidos permitieron determinar la eficiencia relativa de los distintos tipos de envolventes para evitar pérdidas de calor.

### Palabras clave

ladrillos sustentables, termografía pasiva en viviendas, reducción de pérdidas de calor, conductividad térmica, resistencia térmica superficial.

## ABSTRACT

Alternative materials, such as cement-stabilized earth blocks (CSEB), provide new opportunities to make environmentally friendly envelopes. Earth-based construction materials are easy to obtain, abundant in nature, and their use minimizes environmental impacts and improves the thermal performance of bricks. In this work, the thermal properties of CSEB are analyzed, to evaluate their efficiency for building envelopes. It is experimentally determined that cement percentages are between 3% and 9% for the manufacturing of CSEB for non-bearing masonry. The moisture content should be less than 20%, to avoid significant increases in thermal conductivity. Wall thermal resistivity and inner and outer thermal resistance are also determined by means of passive building thermography measurements. The different CSEB wall compositions of experimental dwellings under real use conditions were monitored during the winter, and from this, thermal transmittances were established for the walls of 1,219 W/m<sup>2</sup>K to 1.599 W/m<sup>2</sup>K. The results obtained allow determining the relative efficiency of each building envelope type in avoiding heat losses.

### Keywords

sustainable bricks, passive thermography in buildings, reduction of heat losses, thermal conductivity, surface thermal resistance.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad las edificaciones son responsables de un gran porcentaje de consumo energético en todo el mundo. El programa ambiental de las Naciones Unidas indica que, en efecto, las edificaciones representan más del 40% del consumo de energía en el mundo (United Nations Environment Programme [UNEP], 2009). Este gasto de energía genera entre un 25 y un 30% de las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> y constituye, por lo tanto, entre el 10 y 12% de la contribución humana al cambio climático por el calor retenido en la atmósfera. Frente a este escenario, toda mejora tecnológica y utilización de materiales alternativos de construcción que posea la capacidad de disminuir las pérdidas y ganancias de calor en edificaciones tiene un impacto potencial muy alto en la reducción de emisiones de gas de efecto invernadero y del consecuente calentamiento global.

Según el Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina, se podría decir que aproximadamente un tercio de la energía que se genera en ese país es consumido por las edificaciones y un poco menos de la mitad de esa energía se pierde en la demanda de acondicionamiento térmico (INTI, 2005). De esta cantidad, casi la mitad se utiliza para satisfacer la demanda de calefacción y refrigeración, y más del 30% del resto se disipa por techos con mala calidad de aislación térmica, lo que produce escapes de calor en invierno y sobrecalentamiento en verano.

En Argentina son varias las normas que definen los lineamientos de acondicionamiento térmico de edificaciones (IRAM N° 11549, 11601, 11603, 11604, 11605, 11507-4, 11900, 11659-1 y 11659-2). Estas normas establecen los valores térmicos, entre otros parámetros de diseño, para los materiales de construcción más utilizados. Entre los parámetros más importantes para el flujo de calor destacan la densidad  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), la conductividad térmica  $\lambda$  (W/mK), el calor específico  $c_p$  (J/kgK) y el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua  $\mu$  (adimensional). A partir de ellos, es posible caracterizar los materiales de construcción con el objeto de obtener la transmitancia térmica  $K$  (W/m<sup>2</sup>.K), o su inversa, la resistencia térmica  $R$  (m<sup>2</sup>.K/W). Es importante considerar que las determinaciones térmicas se hacen en régimen estacionario, por lo cual el parámetro de mayor relevancia es la conductividad térmica  $\lambda$  del material (Damfeu, Meukam y Jannot, 2016; Ouedraogo, Aubert, Tribout y Escadeillas, 2020).

Los mecanismos de transferencia de calor son la conducción, convección y radiación. Las envolventes tradicionales de las edificaciones se realizan, en su mayoría, con materiales sólidos de porosidades medias o bajas, los cuales se encuentran sometidos a cambios de temperatura ambiente. Las normativas que regulan los cerramientos de viviendas están principalmente basadas en el control de transmisión de calor en los

cerramientos, por lo que consideran prioritario la definición de la masa y material de la envolvente (Dao, Ouedraogo, Millogo, Aubert y Gomina, 2018).

En las últimas décadas se ha producido un aumento significativo en el interés por conseguir nuevos materiales para envolventes con el propósito de hacer más eficiente las edificaciones desde el punto de vista energético. Los bloques de suelo-cemento compactados (BSEC) constituyen una de las alternativas exploradas por tratarse de materiales de bajo costo, cuya fabricación es amigable ambientalmente ya que su utilización minimiza las emisiones de dióxido de carbono generadas por la industria de la construcción tradicional. Los BSEC se fabrican con suelo local y el agregado de algún aditivo (generalmente, cemento y/o cal hidratada) y agua, lo que provee cohesión a la mezcla y resistencia mecánica a los mampuestos. Esta mezcla se somete a elevadas presiones por compresión mecánica y, a diferencia de otros mampuestos, no tiene ningún tipo de proceso de cocción (Nagaraj, Sravan, Arun y Jagadish, 2014; Costantini, Francisca y Giomi, 2021; Allen, 2012; Sekhar y Nayak 2018). Luego, se realiza un curado durante por lo menos 28 días. Estos bloques son una alternativa ecológica económica y eficiente para edificaciones (Dahmen y Muñoz 2014; William, Goodhew, Griffiths y Watson, 2010).

La industrialización y construcción con BSEC está limitada por la escasa normalización en esta materia. Existe normativa que aborda la selección adecuada de suelos y la construcción de BSEC con lineamientos de principios y formas para construir en países como España, Francia, Nueva Zelanda, Estados Unidos, y varias regiones de África. Todas estas normas establecen recomendaciones y directivas del proceso de producción de los BSEC (AENOR, 2008). A pesar de las ventajas del uso de suelo local y de la escasez de regulaciones en muchos países, el uso de BSEC para la construcción de envolventes se ha incrementado notoriamente en la actualidad (Costantini, Carro Pérez y Francisca, 2016). Estudios recientes demostraron que los BSEC con distintos tipos de suelos y un adecuado contenido de aditivos estabilizantes superan la resistencia mecánica requerida por las normativas de construcción tradicional para mampuestos sismorresistentes (AENOR, 2008; Balaji, Mani y Venkatarama Reddy, 2016; Sittou, Zeinali, Heidarian y Story, 2018).

El flujo de calor a través de los BSEC es considerado, por lo general, como conducción pura, pero también se produce transferencia de calor por radiación y por convección. En los medios porosos, tales como los suelos compactados, el modo principal de transferencia de calor es la conducción a través de las partículas sólidas (Yagi y Kunii 1957; Yun y Santamarina, 2008; Borbón, Cabanillas y Pérez, 2010; Mozejko y Francisca, 2020), dado que la conductividad térmica de los minerales es mayor a la del agua y el aire que se encuentran en los

poros entre partículas. Es por ello que entre los factores que controlan la conductividad térmica de un material formado por partículas, se encuentra el contacto entre dichas partículas, la densidad (o porosidad) y el grado de humidificación (o contenido de humedad) (Costantini *et al.*, 2021). Asimismo, existen otros factores secundarios que influyen, en menor medida, en la transferencia de calor a través de los medios porosos, tales como la mineralogía de las partículas, el tamaño de partículas y la presión aplicada (Reuelta, García-Calvo, Carballosa y Pedrosa, 2021).

En el caso de suelos cementados es necesario considerar, además, las propiedades termofísicas del material estabilizante incorporado, el tiempo de curado y la capacidad calorífica y conductividad térmica del mismo (Costantini *et al.*, 2021). En los BSEC, el flujo de calor se genera principalmente a través de los sólidos (partículas de suelo y cementante), ya que el calor se transmite más fácilmente por conducción que a través del aire de los poros. A medida que la porosidad aumenta (por ejemplo, en BSEC con menor densidad o perforados), la conductividad térmica disminuye, pero comienzan a tener relevancia los fenómenos de convección y radiación (Muñoz, Thomas y Marino, 2015; Balaji y Mani, 2019).

El uso de técnicas como la termografía permite calificar la eficiencia energética de las construcciones, detectar problemas constructivos, puentes térmicos, falta de estanqueidad y pérdidas de calor, mediante contrastes térmicos en función de los cuales se puede diferenciar patologías y defectos específicos (Sharlon, 2008; Fox, Coley, Goodhew y de Wilde, 2014). Experiencias reportadas en la literatura especializada han demostrado la aptitud de los análisis termográficos para cuantificar la eficiencia de sistemas de aislación, detectar caminos preferenciales de flujo de calor, detección de pérdidas de aire y mapeos de contenido de humedad (Grinzato, Vavilov y Kauppinen, 1998). Una de las principales ventajas de la termografía en viviendas es que permite medir temperaturas superficiales de manera no invasiva. A partir de estas mediciones es posible realizar análisis cualitativos, diferenciando zonas en las edificaciones y diferentes materialidades (Revillas, 2011). Esto facilita, a su vez, cuantificar las pérdidas de calor a través de una envolvente y definir el coeficiente de transmitancia térmica de cada uno de los muros que constituyen una edificación (Sekhar y Nayak, 2018; Muñoz *et al.*, 2015).

Concretamente, el propósito de este trabajo es evaluar el comportamiento térmico de bloques de suelo-cemento compactados utilizados para la construcción de envolventes en una vivienda experimental. En tal sentido, se analizan distintos tipos de muros en la vivienda con el fin de determinar la transmitancia térmica de cada composición con BSEC y las resistencias térmicas superficiales (interior y exterior) para determinar la eficiencia de cada envolvente.

## METODOLOGÍA

En primera instancia, se caracteriza la conductividad térmica de los bloques de suelo cemento en laboratorio y se definen las propiedades térmicas de los materiales de construcción, utilizadas para el análisis de resultados. En seguida, se presenta el monitoreo de una edificación mediante hobos y cámara termográfica, determinando variaciones de temperaturas y puentes térmicos con un análisis cualitativo y cuantitativo de temperaturas superficiales de las envolventes. Se realiza, posteriormente, un análisis de las normativas argentinas (IRAM) y los requerimientos de confort adecuados para envolventes edilicias. A partir de ello, se analizan los valores admisibles de resistencias superficiales y de transmitancia térmica en muros, determinando los valores mínimos para alcanzar el confort térmico de acuerdo con la zona bioambiental. Así, se calculan las resistencias térmicas superficiales para poder definir las pérdidas de calor en cada tipología de envolventes configurada con bloques de suelo cemento, en condiciones reales de uso y época invernal.

### MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica de los mampuestos de suelo-cemento que constituyen la envolvente se efectúa a través de un sensor de aguja marca East 30 Sensors. El procedimiento experimental y los detalles metodológicos de esta técnica se enmarcan en la norma ASTM D-5334. Previo al ensayo de los ladrillos, se calibra la aguja de medición y se comparan los valores medidos con la conductividad térmica de materiales con propiedades conocidas. Para la calibración, se utiliza una agua destilada y glicerina líquida; proceso del que resulta, en el caso del primer material, un valor de 0,595 W/(m K), para un valor teórico de 0,607 +/-0,03, y del segundo, un valor de 0,293 W/(m K), para un valor teórico de 0,292 +/-0,003. Cabe destacar que los errores porcentuales son inferiores a +/- 3%.

Los BSEC son prismas machihembrados, de 25 cm de largo, 12,5 cm de ancho y 7 cm de alto. Tienen dos orificios de 7 cm de diámetro dispuestos de manera transversal que son usados para las instalaciones en el interior del muro. Para medir la conductividad térmica de los BSEC se introduce el sensor de aguja, de acero inoxidable de 1 mm de diámetro y 60 mm de longitud en un orificio perforado en los bloques. El orificio se realiza con un diámetro ligeramente superior al del sensor, de manera de poder introducir la aguja. La posición del orificio se selecciona cuidadosamente para evitar que la presencia de las cámaras de aire produzca efectos de borde que pudieran afectar los resultados medidos.

Una vez inserta el agua, se le aplica la corriente continua mediante un generador de voltaje Agilent E3645A, la cual produce su calentamiento ya que en el interior de la aguja se encuentra alojado un hilo conductor. El calor generado se disipa a través del medio en contacto con la

aguja, mientras una termocupla de 0,01°C de precisión en el centro de la aguja detecta los cambios de temperatura con el transcurso del tiempo. Esta medición se lleva a cabo con un multímetro Agilent 34410A. A partir de los cambios de temperatura en función del tiempo, se realiza un análisis inverso para calibrar la solución de la ecuación de flujo de calor axisimétrico y así determinar la conductividad térmica del material que rodea la aguja. La Figura 1 presenta un resultado tipo donde puede observarse el incremento de temperatura provocado por el calentamiento de la aguja en función del tiempo y el sector de la curva utilizado para aproximar la solución teórica a los resultados experimentales, siguiendo los lineamientos sugeridos en la norma ASTM D 5334.

El tiempo de monitoreo de temperaturas oscila entre los 60 y los 120 segundos, durante el cual se debe cuidar que el incremento de temperatura del sensor no supere los 3°C. Todos los ensayos se efectúan en condiciones controladas de temperatura y humedad de 24°C y 50%, respectivamente. Cada ensayo se repitió un mínimo de 6 veces, para luego adoptar como valor representativo el promedio de las mediciones.

### ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

La adquisición de imágenes se realizó mediante una cámara termográfica TESTO 871, con una resolución IR de 240 x 180 pixels, campo de visión de 35° x 26°/ 0,5m, resolución espacial 1,6 mrad, sensibilidad térmica 90 mK, frecuencia de la medición 9Hz, rango de temperatura de -30°C a 650°C, y precisión 2 °C, ±2 % del valor medido.

Durante las mediciones se adoptó como configuración de la cámara una emisividad igual a 0,95 y una compensación de la temperatura reflejada de fondo de 20°C, de acuerdo a las recomendaciones de la guía de la termografía infrarroja (Revillas, 2011). Las imágenes termográficas se tomaron en 4 momentos diferentes del día, con clima nublado para evitar la radiación solar directa en las imágenes exteriores de la vivienda. A partir de estas imágenes, se determinó la temperatura superficial promedio diaria de cada tipo de muro. El mismo procedimiento permitió obtener imágenes del interior en un tiempo mínimo de diferencia y así conocer la diferencia de temperatura interior-exterior en periodos cercanos de tiempo (no superiores a 1 minuto). Tras el análisis y procesamiento de los termogramas, se determinó la resistencia superficial de los muros, empleada para el cómputo del flujo de calor y resistencia térmica de los mismos.

Para el cómputo de la resistencia térmica superficial se emplearon las propiedades de la superficie, la emisividad, la velocidad del aire a lo largo de la superficie y las temperaturas de la superficie, del aire ambiente y de las superficies circundantes. De esa forma, la resistencia térmica superficial  $R_s$  en superficies planas resultó (AENOR, 2008):

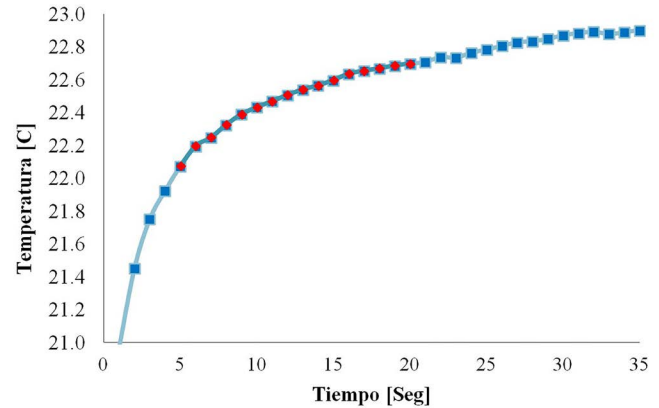


Figura 1. Respuesta tipo de cambio de temperatura de la aguja en función del tiempo durante la medición de conductividad térmica. Fuente: Elaboración de Francisca y Costantini Romero.

$$R_s = 1/(h_c + h_r) \dots\dots\dots(1)$$

Donde  $h_c$  es el coeficiente de convección y  $h_r$  es el coeficiente de radiación. El coeficiente de convección, en el caso de flujo de calor horizontal, resultó igual a 2,5 W/(m²K) en la superficie interior y 20 W/(m²K), en la exterior, según norma IRAM (1996). Por otro lado, el coeficiente de convección se determinó de la siguiente manera:

$$h_r = \epsilon h_{r0} \dots\dots\dots(2)$$

Donde  $\epsilon$  es el coeficiente de emisividad y  $h_{r0}$  es el coeficiente de radiación para un cuerpo negro, siendo:

$$h_{r0} = 4 \sigma T_m^3 \dots\dots\dots(3)$$

Donde  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  es la constante de Stefan-Boltzmann y  $T_m$  es la temperatura media termodinámica de la superficie y sus alrededores. Según las ecuaciones (1) a (3),  $R_s$  resultó:

$$R_s = 1/(h_c + \epsilon 4 \sigma T_m^3) \dots\dots\dots(4)$$

### VIVIENDA EXPERIMENTAL

La metodología propuesta se aplicó al estudio de las fachadas de la planta alta de una vivienda experimental ubicada en la ciudad de Alta Gracia, en la provincia de Córdoba, Argentina, la que se muestra en la Figura 2. La vivienda cuenta con doble altura y sólo la planta alta se encuentra construida con mampostería de bloques de suelo-cemento compactados (BSEC). La particularidad de esta vivienda es que, en toda la planta superior, construida con sistema tradicional o húmedo, se utilizaron diferentes tipos de revestimientos en los muros de la envolvente. El destino de esta vivienda es de uso residencial.



Figura 2. Vivienda experimental: a) fachada Este; b) fachada Oeste. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

La evaluación del comportamiento térmico de la edificación fue llevada a cabo con el registro continuo de temperatura y humedad durante 7 días del mes de agosto: desde el viernes 9 de agosto, al viernes 16 de agosto de 2019. En este periodo las tendencias de los resultados obtenidos fueron similares.

La Figura 3 exhibe la planta alta de la vivienda en estudio con la posición de los sensores instalados y la descripción y ubicación de los muros en estudio. Como puede apreciarse, los sensores de temperatura y humedad se encuentran en la sala principal, en una de las habitaciones y el exterior de la vivienda. El monitoreo de las condiciones ambientales se realizó mediante la instalación de HOBOtemp y el almacenamiento y registro de los datos con un RH logger. Se colocaron 2 HOBO en el interior de la vivienda a una altura de 1,50 m del piso y uno en el exterior, lo que permitió obtener la temperatura real del entorno con registros de valores cada 60 minutos.

Las temperaturas registradas oscilaron entre los 2°C y los 32°C, mientras que las humedades relativas exteriores lo hicieron entre el 15 y el 75%. La Tabla 1 presenta esquemas y una descripción de la configuración de cada uno de los muros analizados en la vivienda experimental.

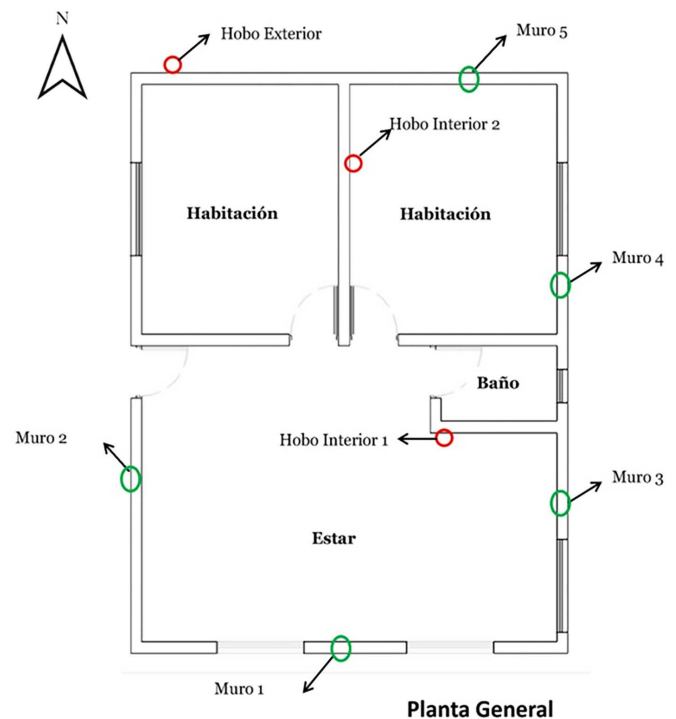


Figura 3. Planta general de la vivienda con disposición de hobos y designación de muros. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

## RESISTENCIA TÉRMICA Y FLUJO DE CALOR

El flujo de calor por unidad de área [W/m<sup>2</sup>] a través de una envolvente edilicia puede calcularse como:

$$q = K (T_e - T_i) \dots\dots\dots(5)$$

Donde K [W/(m<sup>2</sup> K)] es la transmitancia térmica de la mampostería, y T<sub>e</sub> y T<sub>i</sub> [K] corresponden a la temperatura exterior e interior, respectivamente. Como son envolventes exteriores, el valor de K se obtiene por medio de la resistencia al paso del calor R, teniendo en cuenta que se trata de un problema de flujo de calor perpendicular a las capas del muro, de lo que resulta:

$$R = 1/K = R_{si} + \sum_i e_i / \lambda_i + R_{se} \dots\dots\dots(6)$$

Siendo e<sub>i</sub> [m] el espesor de cada capa componente del muro; λ<sub>i</sub> [W/(m K)], la conductividad térmica del material de cada capa del muro; R<sub>si</sub> [m<sup>2</sup> K/ W], la resistencia térmica superficial interna; y R<sub>se</sub> [m<sup>2</sup> K/ W], la resistencia térmica superficial externa.

En la ecuación [6], la conductividad térmica de cada capa se obtuvo de la normativa vigente en Argentina, IRAM 11601. En el caso de los BSEC, esta se calculó a partir de las mediciones de λ del material, de la geometría (12,5 cm x 25 cm x 7 cm) y las 2 cámaras de aire de 7 cm de diámetro ubicadas de manera simétrica y equidistante de las paredes del bloque. Para el caso del aire, se consideró λ<sub>aire</sub> = 0,165 W/mK, valor obtenido de la norma IRAM [4].

Muro	Tipo de Muro	Esquema y descripción
Muro 1	suelo cemento revocado	
Muro 2	suelo cemento	
Muro 3	suelo cemento con porcelanato	
Muro 4	suelo cemento con placa de yeso	
Muro 5	suelo cemento con placa de yeso y poliestireno.	

Tabla 1. Principales características de los muros ensayados. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS BSEC

Los valores de conductividades se obtuvieron a partir de ensayos en 10 BSEC. Estas mediciones permitieron definir la conductividad térmica de la fracción sólida de los BSEC, es decir, del suelo-cemento compactado. A partir de estas mediciones, se calculó un promedio y una desviación estándar para el suelo cemento compactado:  $\lambda = 0,347 \pm 0,021$  W/mK. Luego, se determinó analíticamente la conductividad térmica equivalente del BSEC teniendo en cuenta la geometría del bloque y la presencia de las cámaras de aire mostradas. De esta manera, se obtuvo, para los BSEC, una conductividad térmica de  $\lambda_{BSEC} = 0,283$  W/mK.

La diferencia entre la conductividad térmica del material que constituye el bloque (suelo cemento compactado) y la del bloque mismo ( $\lambda = 0,347$  W/mK en el primer

caso y  $\lambda_{BSEC} = 0,283$  W/mK en el segundo caso) refleja la importancia de los orificios y los puentes térmicos, ya que prácticamente todo el flujo de calor en los BSEC estaría transitando a través de los nervios, a pesar de que el 46% de la sección transversal se encuentra interrumpida por las cámaras de aire.

### RESISTENCIAS SUPERFICIALES INTERIOR Y EXTERIOR

Las resistencias superficiales se calculan a partir de las temperaturas interiores y exteriores de la superficie de cada muro seleccionado. La Figura 4 expresa termogramas de los muros exteriores de la vivienda experimental. Los termogramas muestran las diferencias de temperaturas de los diferentes materiales de construcción diferenciando los puentes térmicos y destacando las pérdidas o ganancias térmicas a través de la envolvente. La emisividad de los distintos materiales (principalmente en el interior) demuestra que las  $R_{se}$  deberían ser distintas para calcular la conductividad térmica de cada tipología de muro.

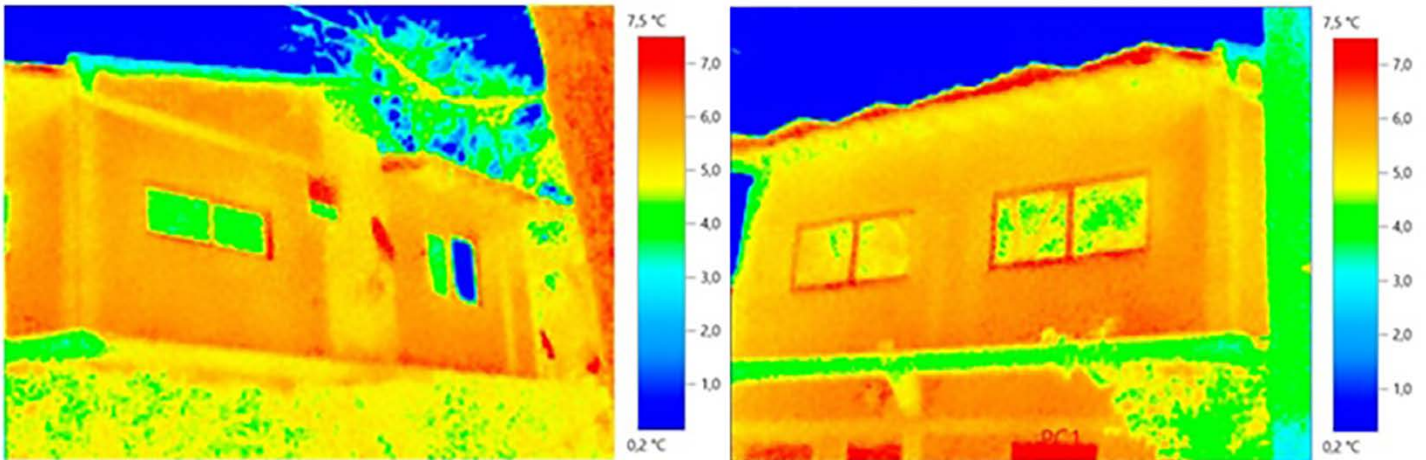


Figura 4. Imágenes termográficas exteriores. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

Las resistencias térmicas superficiales interiores y exteriores se obtuvieron a partir de la ecuación (4), considerando las temperaturas medias  $T_m$  superficiales determinadas a través de los termogramas y los coeficientes de emisividad  $\epsilon$  establecidas en la normativa AENOR (2008) para los distintos tipos de superficie. Los resultados alcanzados para cada tipo de muro se exponen en las Tablas 2 y 3.

Los valores obtenidos se encuentran muy próximos a los recomendados en la normativa de Argentina, donde se establece para la resistencia térmica superficial interna y externa los siguientes valores:  $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  y  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ , respectivamente. En ambos casos, estos valores corresponden a muros verticales con flujo de calor horizontal. Se observa, además, que la variación a lo largo del día resulta despreciable para todos fines prácticos. Es importante subrayar la importancia de determinar experimentalmente los valores de  $R_{si}$  y  $R_{se}$ , a fin de tener mayor información sobre la eficiencia energética de los cerramientos y, por lo tanto, de las edificaciones. La adopción de valores normalizados no sería recomendable y podría inducir en desviaciones significativas en las pérdidas de calor estimadas para las viviendas.

### FLUJO DE CALOR

El flujo de calor se define considerando la composición y tipología de cada uno de los 5 muros de la envolvente de la vivienda en estudio, las  $R_{si}$  y  $R_{se}$  promedio calculadas en las Tablas 2 y 3 y la conductividad térmica de los BSEC determinada de manera experimental. Los resultados, en este sentido, se presentan en la Tabla 4. En los mismos se advierte que la transmitancia térmica de los muros decrece a medida que se incorporan elementos aislantes como cámaras de aire, poliestireno o yeso, incorporando o aumentando la resistencia térmica del conjunto. Los muros 4 y 5, con transmitancia  $K = 1,219 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $1,251 \text{ W/m}^2\text{K}$ , no sólo son los más resistentes

Muro	Superficie del muro	Hora del día				Rsi (m²K/W) Promedio
		00:00	06:00	12:00	18:00	
Muro 1	Barnizado ( $\epsilon=0,85$ )	0,147	0,148	0,146	0,142	0,146
Muro 2	Barnizado ( $\epsilon=0,90$ )	0,142	0,143	0,141	0,136	0,141
Muro 3	Barnizado ( $\epsilon=0,95$ )	0,137	0,138	0,136	0,132	0,136
Muro 4	Barnizado ( $\epsilon=0,80$ )	0,153	0,154	0,152	0,147	0,152
Muro 5	Barnizado ( $\epsilon=0,93$ )	0,139	0,140	0,138	0,133	0,138

Tabla 2. Resistencia térmica superficial interior ( $R_{si}$ ) para cada tipo de muro. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

Muro	Superficie del muro	Hora del día				Rse (m²K/W) Promedio
		00:00	06:00	12:00	18:00	
Muro 1	Barnizado ( $\epsilon=0,85$ )	0,041	0,041	0,040	0,040	0,041
Muro 2	Barnizado ( $\epsilon=0,85$ )	0,042	0,041	0,041	0,041	0,041

Tabla 3. Valores de Resistencia superficial exterior ( $R_{se}$ ) para cada tipo de muro. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.



Muro	Capa del elemento	Espesor (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	K (W/m <sup>2</sup> K)
Muro 1	Rsi	-	-	0,1460	1,499
	2- Ladrillo	0,1300	0,283	0,3662	
	3- Revoque Interior	0,0200	0,960	0,0208	
	Rse	-	-	0,0410	
	Espesor total	0,15	Resistencia Total	0,6672	
Muro 2	Rsi	-	-	0,1410	1,599
	2- Ladrillo	0,1300	0,283	0,3662	
	Rse	-	-	0,0410	
	Espesor total	0,13	Resistencia Total	0,6414	
Muro 3	Rsi	-	-	0,136	1,473
	2- Ladrillo	0,13	0,283	0,3662	
	3- Mortero	0,005	0,160	0,031	
	4- Porcelanato	0,008	0,700	0,011	
	Rse	-	-	0,041	
	Espesor total	0,143	Resistencia Total	0,679	
Muro 4	Rsi	-	-	0,152	1,219
	2- Ladrillo	0,13	0,283	0,3662	
	3- Cámara Aire	0,02	0,165	0,125	
	4- Placa de yeso	0,015	0,347	0,043	
	Rse	-	-	0,041	
	Espesor total	0,165	Resistencia Total	0,821	
Muro 5	Rsi	-	-	0,138	1,251
	2- Ladrillo	0,13	0,283	0,3662	
	3- Poliestireno	0,02	0,170	0,118	
	4- Placa de yeso	0,015	0,347	0,043	
	Rse	-	-	0,041	
	Espesor total	0,165	Resistencia total	0,799	

Tabla 4. Valores de transmitancia térmica para cada tipología de mampostería. Fuente: Elaboración de Francisca y Costantini Romero.

térmicamente, sino que también alcanzan los valores que establece la norma IRAM para ser recomendados en la construcción eficiente en la condición de verano, donde la normativa establece un valor máximo de 1,80 W/m<sup>2</sup>K. Para la estación invernal, en cambio, ninguna de las envoltentes debería superar el mínimo valor exigido de 1,00/m<sup>2</sup>K, ya que las exigencias son más rigurosas.

Las cámaras de aire incorporadas en la mampostería, materializadas a través de las placas de yeso, mejoran el comportamiento térmico de los muros, disminuyendo en hasta casi un 25% el flujo de calor. El descenso en K es significativo comparado con el de un muro simple de mampostería de BSEC. En los muros con la cámara de aire y yeso, y con agregado de poliestireno y yeso se observaron mejoras de eficiencia considerables. Los resultados de la presente investigación proporcionan, como se ve, una base de datos experimental para la validación de modelos de transferencia de calor en muros. Estos resultados demuestran las ventajas de utilizar suelo como material de construcción sostenible.

## CONCLUSIÓN

En el trabajo expuesto se evaluaron las propiedades térmicas de los ladrillos de suelo-cemento compactado como una alternativa sostenible para la construcción de envoltentes en edificaciones. En ese marco, se examinaron las principales propiedades térmicas de los ladrillos y su aplicación en una vivienda experimental donde la planta alta se construyó con muros de suelo-cemento compactado con diferentes tecnologías constructivas para los cerramientos. Se analizaron las pérdidas de calor para cada alternativa y, finalmente, se determinaron las ventajas de la adopción de ladrillos de este tipo para la construcción de fachadas de alta eficiencia térmica. Las principales conclusiones del estudio se resumen de la siguiente manera:

- El análisis de las transmitancia térmica de cinco tipos de muros estructurados de formas diferentes contruidos utilizando bloques de suelo cemento compactado permite afirmar que los ladrillos utilizados son una excelente alternativa para materializar construcciones con un bajo impacto ambiental, ya que su uso minimiza las pérdidas y ganancias de calor interior durante el invierno y verano, respectivamente.
- La termografía pasiva resultó ser un método no invasivo y de bajo costo mediante el cual es posible detectar las temperaturas superficiales de cada muro. Así, se obtienen de manera directa las resistencias térmicas superficial interior y exterior de un muro envoltente, lo que da lugar al desarrollo de un diseño adecuado para el acondicionamiento térmico de una edificación. Contar con una medición directa de las resistencias térmicas

superficiales permite aumentar la precisión en la determinación de pérdidas de calor en edificaciones determinando experimentalmente la conductividad térmica del material de los mampuestos y las resistencias superficiales Rsi y Rse de los revestimientos de la envoltente.

- La transmitancia térmica de cada tipología de muro varía en función de las resistencias al paso del calor que ofrece cada mampostería. Para los distintos muros evaluados, se obtuvieron valores entre 1,219 y 1,599 W/m<sup>2</sup>K, los cuales se encuentran en un rango adecuado para la condición de verano, de acuerdo a la normativa argentina. El método de análisis desarrollado en este trabajo puede ser aplicado a viviendas materializadas con otras técnicas constructivas y en diferentes ubicaciones, pero siempre teniendo la reserva de comparar las transmitancias térmicas obtenidas con las regulaciones locales.
- Las resistencias superficiales varían con cada tipo de material y a lo largo del día, por lo que se recomienda su determinación directa en lugar de la adopción de valores únicos normalizados. Respecto a los muros ensayados, los valores obtenidos oscilaron entre 0,138 m<sup>2</sup>K/W y 0,152 m<sup>2</sup>K/W, para la resistencia interna, y 0,041 m<sup>2</sup>K/W, para la resistencia externa. La adopción de valores adecuados a la realidad permite adecuar los diseños de envoltentes y uso de materiales con el fin de ahorrar energía en el acondicionamiento térmico de viviendas. Igualmente, cabe relevar que el procedimiento propuesto y desarrollado en esta investigación es aplicable a cualquier tipología constructiva y a edificaciones en cualquier región bioclimática en cualquier país. Se recomienda adoptar el procedimiento propuesto aquí y comparar los resultados obtenidos con la normativa local de cada país.
- Los resultados alcanzados demuestran la importancia de disponer de determinaciones cuantitativas de flujo de calor luego de construida una vivienda. Ello permite tener en cuenta de manera directa y concreta el lugar de emplazamiento en el cómputo de consumo energético para acondicionamiento térmico, como también diseños ajustados a las necesidades reales de acondicionamiento, a fin de lograr el confort térmico en las construcciones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa “La Primera Ladrillos” por la provisión de los bloques para su ensayo y por el acceso a la vivienda experimental para su estudio. A.B. Costantini Romero agradece la beca Doctoral del CONICET. Los autores agradecen al CONICET y SECyT-UNC por el financiamiento recibido para las investigaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AENOR (2008). *Norma española UNE 41410. Bloques de Tierra Comprimida para Muros y Tabiques. Definiciones especificaciones y métodos de ensayo*. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0042285>

Allen, G. T. R. (2012). *Strength Properties of Stabilized Compressed Earth Blocks with Varying Soil Compositions*. Tesis doctoral. University of Colorado.

Balaji, N. C., Mani, M. (2019). Error Analysis on Thermal Conductivity Measurements of Cement-stabilized Soil Blocks. *Earthen Dwellings and Structures* (pp. 333-343). Singapore: Springer. DOI: [https://10.1007/978-981-13-5883-8\\_29](https://10.1007/978-981-13-5883-8_29)

Balaji, N. C., Mani, M. y Venkatarama Reddy, B. V. (2016). Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 70(1), 40-54. DOI: <https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00032>

Borbón, A. C., Cabanillas, R. E. y Pérez, J. B. (2010). Modelación y simulación de la transferencia de calor en muros de bloque de concreto hueco. *Información tecnológica*, 21(3), 27-38. DOI: [doi:10.1612/inf.tecnol.4223it.09](https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4223it.09)

Costantini, A. B., Carro Pérez, M. E. y Francisca, F. M. (2016). Evaluación del comportamiento térmico de una edificación reemplazando el material de la envolvente por suelo-cemento. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20, 33-43.

Costantini, A. B., Francisca, F. M. y Giomi, I. (2021). Hygrothermal properties of soil-cement construction materials. *Construction and Building Materials*, 313, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125518>.

Dahmen, J. y Muñoz, J. F. (2014). Earth masonry unit: sustainable CMU alternative. *International Journal of GEOMATE*, 6(2 SERL 12), 903-910.

Damfeu, J. C., Meukam, P. y Jannot, Y. (2016). Modeling and estimation of the thermal properties of clusters aggregates for construction materials: The case of clusters aggregates of lateritic soil, sand and pouzzolan. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 407-416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.044>

Dao, K., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J. E. y Gomina, M. (2018). Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials*, 158, 84-96. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001)

Fox, M., Coley, D., Goodhew, S. y de Wilde, P. (2014). Thermography methodologies for detecting energy related building defects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 296-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>

Grinzato, E., Vavilov, V. y Kauppinen, T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, 29(1), 1-9. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00039-X)

INTI (2005). Ahorro y certificación energética: la envolvente de los edificios. *Saber cómo*, (27), 4.

Mozejko, C. A. y Francisca, F. M. (2020). Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. *Construction and Building Materials*, 239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117901>

Muñoz, N., Thomas, L. P. y Marino, B. M. (2015). Comportamiento térmico dinámico de muros típicos empleando el método de la admitancia. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 36, 31-39.

Nagaraj, H. B., Sravan, M. V., Arun, T. G. y Jagadish, K. S. (2014). Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 54-61.

Norma IRAM N° 11601, (1996). Aislamiento térmico de edificios. Propiedades térmicas de los materiales para la construcción. Método de cálculo de la resistencia térmica total. [www.iram.org.ar](http://www.iram.org.ar).

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

Revillas, S. M. (2011). *Guía de la Termografía Infrarroja*. Madrid: Asociación Española de Termografía Infrarroja.

Revuelta, D., García-Calvo, J. L., Carballosa, P. y Pedrosa, F. (2021). Evaluation of the influence of the degree of saturation, measuring time and use of a conductive paste on the determination of thermal conductivity of normal and lightweight concrete using the hot-wire method. *Materiales de Construcción*, 71(344), e260-e260. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2021.03621>

Sekhar, D. C. y Nayak, S. (2018). Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 166, 531-536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>

Sharlon, M. R. (2008). *Active Thermography: An Overview of Methods and Their Applications in Use Today*. Orlando, Florida.

Sitton, J. D., Zeinali, Y., Heidarian, W. H. y Story, B. A. (2018). Effect of mix design on compressed earth block strength. *Construction and Building Materials*, 158, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.005>

United Nations Environment Programme [UNEP] (2009). Recuperado de <https://www.unenvironment.org/resources/annual-report/unep-2009-annual-report>

Williams C., Goodhew S., Griffiths R. y Watson, L. (2010). The feasibility of earth block masonry for building sustainable walling in the United Kingdom. *Journal of Building Appraisal*, 6(2), 99-108.

Yagi S. y Kunii D., (1957) Studies on Effective Thermal Conductivity in Packed Bed *AIChE Journal*, 3(3), 373-381. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690030317>

Yun, T. S. y Santamarina, J. C. (2008). Fundamental study of thermal conduction in dry soils. *Granular matter*, 10(3). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-007-0051-5>