

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## ANÁLISIS DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA DE LAS PAREDES Y COBERTURAS PARA CONSTRUCCIONES UTILIZANDO HORMIGÓN LIGERO CON VERMICULITA Y EPS

\*Adilson Schackow<sup>1</sup>  
Carneane Effting<sup>1</sup>  
Ana Mirthes Hackenberg<sup>1</sup>  
Ana Beatriz Rozza Bortot<sup>1</sup>  
Ana Karoliny Ferrari<sup>1</sup>  
Vitor Bolonhesi Oliveira<sup>1</sup>

## ANALYSIS OF THE THERMAL TRANSMITTANCE OF WALLS AND ROOFS FOR CONSTRUCTIONS USING LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH VERMICULITE AND EPS

Recibido el 26 de julio de 2017; Aceptado el 6 de septiembre de 2018

### Abstract

*The thermal performance of buildings is important to make a more economic and comfortable building, thereby improving the quality of life. An analysis of thermal comfort in a building involves the materials used to compose its walls and roof. This work developed a comparison of thermal resistance and thermal transmittance of walls with conventional concrete blocks and lightweight concrete with vermiculite and EPS (expanded polystyrene). It were also evaluated the calculations related to the roofs. The thermal transmittance and the thermal capacity of the walls and roofs were analyzed according to NBR 15220 and National (Brazilian) Program for Energy Conservation - Procel, considering the levels A (most efficient), B, C, D and E. For conditioned rooms only roofs with vermiculite concrete are adapted to the requirements of Procel at level B (thermal transmittance  $<1.5 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$ ). It was calculated the thermal transmittance to classify according to the requirements for external walls (thermal transmittance  $<3.7 \text{ W} / \text{m}^2$ , according Procel). It was concluded that the roofs (concrete) and walls (blocks) that used lightweight concrete have provided better thermal performance for the building when compared to hedges and walls that will use ordinary concrete.*

**Keywords:** *lightweight concrete, thermal comfort, thermal conductivity, vermiculite, expanded polystyrene.*

<sup>1</sup>Universidad del Estado de Santa Catarina. Departamento de Ingeniería Civil. Programa de posgrado en Ingeniería Civil. 89.219-710. Joinville, Brasil.

\*Autor correspondente: Universidad del Estado de Santa Catarina. Departamento de Ingeniería Civil. Programa de posgrado en Ingeniería Civil. 89.219-710. Joinville, Brasil. Email: [adilson.schackow@udesc.br](mailto:adilson.schackow@udesc.br)

## Resumo

El desempeño térmico de construcciones es un factor importante para hacer más confortable y económica una vivienda, mejorando la calidad de vida. Un análisis del confort térmico en un edificio comprende los materiales utilizados para componer su envoltorio. Este trabajo desarrolló una comparación de la resistencia térmica y de la transmitancia térmica de paredes con bloques de hormigón convencional, y hormigón ligero con vermiculita y con EPS (poliestireno expandido). También fueron evaluados los cálculos relacionados a la cobertura. La transmitancia térmica y la capacidad térmica de las paredes y de las coberturas fueron analizadas de acuerdo con la norma NBR 15220 y el Programa Nacional (Brasileño) de Conservación de Energía Eléctrica – Procel, considerando los niveles A (más eficiente), B, C, D y E. Para ambientes acondicionados solamente las coberturas de hormigón con vermiculita se adecuan a los requisitos previos del Procel en el nivel B (transmitancia térmica  $< 1.5\text{W/m}^2\text{K}$ ). Fue calculada la transmitancia térmica para clasificar según las exigencias para paredes externas (transmitancia térmica  $< 3.7\text{W/m}^2$ , según Procel). Se concluyó que las coberturas y paredes (bloques) que utilizaron hormigón ligero han proporcionado mejor desempeño térmico a la construcción cuando comparadas con las coberturas y paredes (bloques) que utilizaron hormigón ordinario.

**Palabras clave:** hormigón ligero, confort térmico, conductividad térmica, vermiculita, poliestireno expandido.

## Introducción

Se estima que las construcciones contribuyen para el consumo de 40-45% de la energía de un país occidental (Zhong *et al.*, 2009; Mustafaraj *et al.*, 2014). Esto ha motivado estudios acerca de la eficiencia energética de los edificios (Dai *et al.*, 2009; Yang, Li y Yao, 2010; Mobasher *et al.*, 2011; Kong, Lu y Wu, 2012; Ji *et al.*, 2014) y hace que la búsqueda de avances en esta cuestión sea cada vez más urgente.

El desperdicio de energía eléctrica es bastante elevado en Brasil. Gran parte de la energía producida en el país es consumida no solamente en la operación y mantenimiento de edificaciones, sino también en los sistemas artificiales para proporcionar un bienestar a los habitantes y usuarios. Para eso, el PROCEL se preocupa por el uso eficiente de energía.

La crisis en el sector de energía eléctrica no es reciente. En 2011, Brasil ha pasado por uno de los peores regímenes pluviométricos de las últimas décadas, culminando en una política de racionamiento. El consecuente aumento de los precios de la energía eléctrica y la disminución del nivel de embalses del sistema eléctrico sacudieron a la sociedad. Impulsados por esa crisis, comenzó una revaluación de las prácticas de uso. La población fue obligada a crear nuevas soluciones que resolviesen los problemas y la creciente degradación ambiental. Con eso, una de las estrategias que adquiere relevancia está relacionada con la eficiencia energética a través del uso consciente de materiales en la construcción civil.

El aumento de la resistencia térmica de las paredes exteriores mediante el uso de aislamiento térmico es actualmente el más eficaz medio de reducir la carga de transmisión de calor (Al-Sanea, Zedan y Al-Hussain, 2013). Las pérdidas de calor de los edificios son una de las principales fuentes

de desperdicio de energía, y así un ahorro energético considerable se puede obtener mediante el uso de materiales de aislamiento adecuados en los edificios (Bolatturk, 2006).

El hombre es un ser homeotermo, es decir, la temperatura interna del organismo tiende a permanecer constante independientemente de las condiciones del clima, pero siempre existen cambios térmicos entre el hombre y el medio. Por otra parte, el confort térmico es el equilibrio del calor producido por el cuerpo con el calor que pierde para el ambiente a su alrededor, y una sensación de bienestar relacionada con la temperatura (Szokolay, 1987; Lamberts *et al.*, 1997). Dentro de este contexto, la construcción civil busca alternativas en los métodos constructivos que mejoren ese aspecto.

El PROCEL, Programa Nacional (Brasileño) de Conservación de Energía Eléctrica, en 2003, inició un estudio que promueve el uso racional de la energía eléctrica en edificaciones, rotulándolas. El Reglamento Técnico de la Calidad del Nivel de Eficiencia Energética de Edificios Comerciales, de Servicios y Públicos (RTQ-C) (Procel Edifica, 2013) contiene los elementos necesarios para clasificación del nivel de eficiencia energética del edificio. En China, por ejemplo, un estudio (Dai *et al.*, 2009) afirma que el consumo de energía en los edificios públicos de gran escala es alto, alrededor de 70-300 kWh / m<sup>2</sup>, que es 10-20 veces más alto que el de los edificios residenciales. Entre estos edificios, el consumo de energía de edificios del gobierno, escuelas, hoteles y restaurantes es alto.

Entre las variables que influyen en el confort y en el uso racional de una construcción, se puede citar el cierre de la estructura. Con el aumento gradual de la temperatura de la capa externa existirá una diferencia entre las dos capas, resultando en un cambio de calor entre ellas. Por conclusión, el flujo de calor dependerá de la conductividad térmica del material ( $\lambda$ ), que es una capacidad de conducir determinada cantidad de calor por unidad de tiempo (Halliday, Resnick y Walker, 1997). Si la conductividad térmica es alta, más grande es la transferencia de calor, si es baja, más pequeña será la conducción entre las superficies externa e interna. Otro factor importante es la espesura del cierre, que permite la resistencia térmica (R), que es la propiedad del material de resistir el paso del calor (Halliday, Resnick y Walker, 1997). Un tercer término es la transmitancia térmica (U), que incorpora la conductividad térmica de una estructura con la transferencia de calor debido a la convección y a la radiación (Halliday, Resnick y Walker, 1997). A partir de esos conceptos, se empezó el trabajo evaluando el primer prerrequisito (envoltorio) exigido por el reglamento RTQ-C (Procel Edifica, 2013), para edificios comerciales.

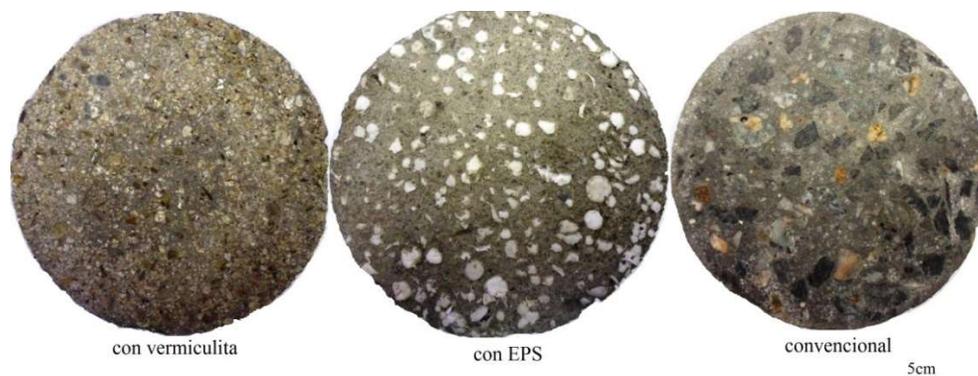
Hay varias investigaciones sobre el confort térmico de los edificios relacionados con respecto a los materiales de las paredes y coberturas (Aste, Angelotti y Buzzetti, 2009; Mobasher *et al.*, 2011; Al-Sanea, Zedan y Al-Hussain, 2013; Memon, 2014; Rossi y Rocco, 2014). Este estudio difiere de otros por considerar el uso de paredes y coberturas construidas con hormigón ligero desarrollado utilizando vermiculita, EPS (expanded polystyrene) y aditivo incorporador de aire y súper

plastificante. No se han publicado estudios que han comparado la transmitancia térmica de estos materiales (hormigón ligero con EPS y vermiculita y hormigón convencional) y conlleven a un índice de eficiencia energética (A a D, más eficiente hasta menos eficiente) utilizando un método especificado por Procel.

Los constructores están cada vez más interesados en proyectos sostenibles (Bedoya y Dzul, 2015) que también puedan incluir el uso de hormigón ligero en sus proyectos. Este interés se presenta desde el volumen decreciente de muchos elementos de soporte de carga, como en las propiedades térmicas superiores y en el menor peso del hormigón ligero comparado con el hormigón convencional (Chen y Liu, 2013).

### Materiales y métodos

Para la resolución del trabajo fueron utilizados hormigón ligero fabricado con vermiculita, hormigón ligero con EPS y hormigón convencional (Figura 1). En el primero, se empleó agregado ligero en lugar del arena convencional (55 y 65 % del volumen), cemento Portland, tipo CPII-Z32 - NBR 16697 (ABNT, 2018), como agregado fino la vermiculita superfina suministrada por la empresa Refratários de Santa Catarina Ltda. y arena mediana de río.



**Figura 1.** Aspecto visual del hormigón ligero con vermiculita, hormigón ligero con EPS y hormigón convencional.

Las mezclas de los hormigones fueron definidas con base en las mezclas comerciales, que describen la proporción entre el peso del cemento y el volumen del agregado ligero utilizado en 1 kg por 4 litros y la proporción entre el peso del agua y el peso del cemento (factor agua/cemento) en 0.8. Se ha optado entonces por la fabricación de una mezcla base con las mismas proporciones entre el peso del cemento y el volumen del agregado ligero (Campitelli, 2004), sin embargo, con una alteración en el factor agua/cemento debido a la utilización del súper plastificante Glenium® 160 SCC que actúa como dispersante del material cementicio, y el Micro Air®, que es un incorporador de aire.

A partir de los datos de la mezcla estándar se alteraron dos factores: la cantidad de agregado ligero (porcentaje del volumen de agregado ligero en relación al volumen de hormigón) y la cantidad de aditivo incorporador de aire (porcentaje de masa en relación a la cantidad de cemento). Todas las mezclas fueron hechas dos veces para la eliminación de posibles errores experimentales.

Para la confección de los hormigones con vermiculita como agregado ligero fue necesario que la cantidad de vermiculita a ser utilizada quedase sumergida durante 24 horas para su expansión. Después de ese período el agregado ligero fue tamizado para la retirada del exceso de agua y entonces la cantidad necesaria para cada mezcla fue medida con el auxilio de un contenedor graduado. Fueron confeccionados dos tipos de hormigón ligero, V1 y V2, de acuerdo con la Tabla 1. Tras ensayos, se obtuvieron los resultados de la Tabla 2, que fueron utilizados para el cálculo posterior.

**Tabla 1.** Mezclas de los hormigones ligeros con vermiculita (para 1 m<sup>3</sup> de hormigón).

Mezcla	Cemento (kg)	Vermiculita (litros)	Arena (kg)	Agua (kg)	Aditivo súper plastificante (g)	Aditivo incorporador de aire (g)
V1	3.23	8.80	15.55*	1.15	32.30**	32.30
V2	2.59	10.35	12.46*	1.18	25.90**	25.90

\*Fue corregida la humedad de la arena en el momento de la fabricación del hormigón.

\*\*Correspondiente a 1% de masa de cemento.

**Tabla 2.** Propiedades del hormigón ligero con vermiculita.

Mezcla	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	Volumen de vermiculita (%)
V1	1130	0.50	55
V2	1130	0.34	65

El segundo hormigón fue producido con EPS (55 y 65 % del volumen). El EPS usado fue obtenido a través de reciclaje, por ejemplo, de embalajes de productos electrónicos. Fueron confeccionados dos tipos de hormigón: el E1 y E2, de acuerdo con la Tabla 3.

Tras diversos ensayos se obtuvieron los resultados de la Tabla 4, mismos que fueron utilizados para el cálculo posterior. Existe más información acerca de la producción del hormigón utilizado y sobre las características de los componentes basados en el trabajo de Schackow *et al.*, (2014).

**Tabla 3.** Mezclas de los hormigones ligeros con EPS (para 1m<sup>3</sup> de hormigón).

Mezcla	Cemento (kg)	Vermiculita (litros)	Arena (kg)	Agua (kg)	Aditivo súper plastificante (g)	Aditivo incorporador de aire (g)
E1	3.23	8.81	15.71*	1.84	32.32**	32.32
E2	2.60	10.40	12.64*	2.36	25.99**	25.99

\*Fue corregida la humedad de la arena en el momento de la fabricación del hormigón.

\*\*Correspondiente a 1% da masa de cemento.

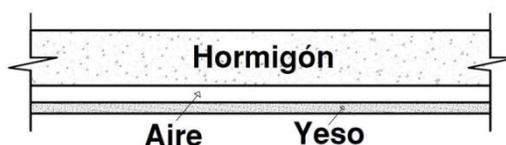
**Tabla 4.** Propiedades del hormigón ligero con EPS.

Mezcla	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	Volumen de EPS (%)
E1	1070	0.56	55
E2	1070	0.50	65

### Cálculos realizados

#### **Cobertura**

La cobertura elegida posee 100 mm de hormigón, 30 mm de aire y 20 mm de yeso, conforme Figura 2.



**Figura 2.** Cobertura elegida.

Para V1, tenemos:

$$\rho_{V1}(\text{kg/m}^3) = 1130$$

$$\rho_{\text{yeso}}(\text{kg/m}^3) = 900$$

$$\text{Espesor (e) del V1} = 0.10\text{m}$$

$$\text{Espesor (e) Cámara de aire no ventilada} = 0.03\text{m}$$

$$\text{Espesor (e) del revestimiento de yeso} = 0.02\text{m}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del V1} = 0.5 \text{ W/m.K}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ 1 del yeso} = 0.35 \text{ W/m.K}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ 1 del aire} = 0.026 \text{ W/m.K}$$

Se empieza con el cálculo de la resistencia térmica, que es la capacidad del material (en el caso, la cobertura) para retener calor. Para el cálculo de la resistencia térmica ( $R_t$ ) de la cobertura, tenemos la Ecuación 1.

$$R_t = \frac{e_{\text{hormigón}}}{\lambda_{\text{hormigón}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{yeso}}}{\lambda_{\text{yeso}}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Según la Tabla 5, NBR 15220-2 (ABNT, 2008), tenemos que  $R_{\text{ar}} = 0.18$ .

**Tabla 5.** Resistencia térmica de cámaras de aire no ventiladas, con ancho mucho más grande que el espesor (Procel Edifica, 2013).

Naturaleza de la superficie de la cámara de aire	Espesor "e" de la cámara de aire (cm)	Resistencia térmica $R_t$		
		Dirección del flujo de calor		
		Horizontal ⇒	Ascendente ↑	Descendente ↓
Superficie de alta emisividad $e > 0.8$	$1.0 \leq e \leq 2.0$	0.14	0.13	0.15
	$2.0 < e \leq 5.0$	0.16	0.14	0.18
	$e \geq 5.0$	0.17	0.14	0.21
Superficie de baja emisividad $e < 0.2$	$1.0 \leq e \leq 2.0$	0.29	0.23	0.29
	$2.0 < e \leq 5.0$	0.37	0.25	0.43
	$e > 5.0$	0.34	0.27	0.61

Para el cálculo de la Resistencia térmica total ( $R_T$ ), o sea, la suma del conjunto de resistencias correspondientes a las capas del componente constructivo, tenemos la Ecuación 2.

$$R_T = R_{\text{si}} + R_t + R_{\text{se}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Se es conocido que,  $R_{\text{si}} = 0.17$  y  $R_{\text{se}} = 0.04$ , según la Tabla 6, NBR 15220-2 (ABNT, 2008).

**Tabla 6.** Resistencia térmica superficial del aire interior y exterior (Procel Edifica, 2013).

	Dirección del flujo de calor		
	Horizontal	Ascendente	Descendente
	⇒	↑	↓
$R_{\text{si}} \text{ (m}^2\text{K)/W}$	0.13	0.10	0.17
$R_{\text{se}} \text{ (m}^2\text{K)/W}$	0.04	0.04	0.04

Así, tenemos que  $R_T = 0.65 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Se calcula, entonces, la transmitancia térmica (Ecuación 3), o sea, el inverso de la resistencia térmica total. Transmitancia térmica es la transmisión de calor en unidad de tiempo y a través de un área de un elemento o componente constructivo, en este caso, de componentes de la cobertura, incluyendo resistencias superficiales internas y externas.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Para V1, tenemos que  $U = 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . De manera semejante, se calculó la transmitancia térmica de V2, E1, E2 y del hormigón tradicional. Para V2 tenemos:

$\rho \text{ V2 (kg/m}^3) = 1130$   
 $\rho \text{ yeso (kg/m}^3) = 900$   
Espesor (e) del V2 = 0.10m  
Espesor (e) cámara de aire no ventilada = 0.03m  
Espesor (e) del revestimiento de yeso = 0.02m  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del V2 = 0.34 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del yeso = 0.35 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del aire = 0.026 W/m.K

Así,  $R_T = 0.74 \text{ m}^2\text{K/W}$  y  $U = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Para E1, tenemos:

$\rho \text{ E1 (kg/m}^3) = 1070$   
 $\rho \text{ yeso (kg/m}^3) = 900$   
Espesor (e) del E1 = 0.10m  
Espesor (e) cámara de aire no ventilada = 0.03m  
Espesor (e) del revestimiento de yeso = 0.02m  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del E1 = 0.56 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del yeso = 0.35 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del aire = 0.026 W/m.K

Así,  $R_T = 0.62 \text{ m}^2\text{K/W}$  y  $U = 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Para E2, tenemos:

$\rho \text{ E2 (kg/m}^3) = 1070$   
 $\rho \text{ yeso (kg/m}^3) = 900$   
Espesor (e) de E2 = 0.10m  
Espesor (e) cámara de aire no ventilada = 0.03m  
Espesor (e) del revestimiento de yeso = 0.02m  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del E2 = 0.50 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del yeso = 0.35 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del aire = 0.026 W/m.K

Así,  $R_T = 0.64 \text{ m}^2\text{K/W}$  y  $U = 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Para hormigón convencional, tenemos:

$$\rho_{\text{HC}} (\text{kg/m}^3) = 2300$$

$$\rho_{\text{yeso}} (\text{kg/m}^3) = 900$$

$$\text{Espesor (e) del HC} = 0.10\text{m}$$

$$\text{Espesor (e) cámara de aire no ventilada} = 0.03\text{m}$$

$$\text{Espesor (e) del revestimiento de yeso} = 0.02\text{m}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del HC} = 1.85 \text{ W/m.K}$$

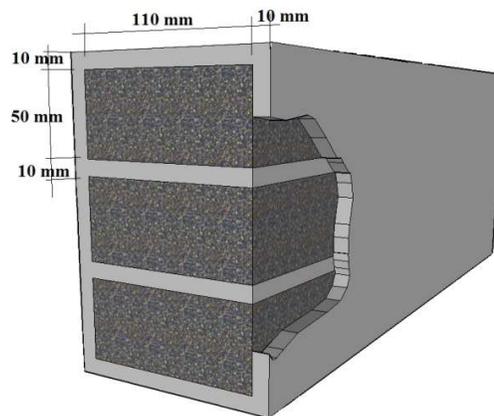
$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del yeso} = 0.35 \text{ W/m.K}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del aire} = 0.026 \text{ W/m.K}$$

Así,  $R_T = 0.50 \text{ m}^2\text{K/W}$  y  $U = 2.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### Pared

La pared elegida está compuesta de bloques macizos, mortero, revoques interno y externo con las dimensiones especificadas, conforme Figura 3. Inicialmente fue hecho el cálculo para el hormigón V1.



**Figura 3.** Pared elegida.

Datos utilizados:

$$\rho_{\text{V1}} (\text{kg/m}^3) = 1130$$

$$\rho_{\text{revoque}} (\text{kg/m}^3) = 1900$$

$$\rho_{\text{mortero}} (\text{kg/m}^3) = 1700$$

$$\text{Espesor (e) del V1} = 0.11\text{m}$$

$$\text{Espesor (e) del revoque externo} = 0.01\text{m}$$

$$\text{Espesor (e) del revoque interno} = 0.01\text{m}$$

$$\text{Largo del bloque} = 0.23\text{m}$$

$$\text{Altura del bloque} = 0.05\text{m}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del V1} = 0.5 \text{ W/m.K}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del mortero} = 1.15 \text{ W/m.K}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del revoque} = 1.15 \text{ W/m.K}$$

Se inició por la resistencia térmica de cada sección.

Sección a (revoque + mortero + revoque)

$$A_a = 0.01 \times 0.23 + 0.01 \times 0.06 = 0.0029 \text{m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{revoque}}}{\lambda_{\text{revoque}}} + \frac{e_{\text{mortero}}}{\lambda_{\text{mortero}}} + \frac{e_{\text{revoque}}}{\lambda_{\text{revoque}}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$R_a = 0.11304 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Sección b (revoque + bloque + revoque)

$$A_b = 0.05 \times 0.23 = 0.0115 \text{m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{revoque}}}{\lambda_{\text{revoque}}} + \frac{e_{\text{bloque}}}{\lambda_{\text{bloque}}} + \frac{e_{\text{revoque}}}{\lambda_{\text{revoque}}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$R_b = 0.2373 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calculando la resistencia térmica de la pared:

$$R_t = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Haciendo la suma, tenemos la resistencia térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \quad \text{Ecuación (7)}$$

En ese caso,  $R_{se} = 0.04$  y  $R_{si} = 0.12$ , según la Tabla 6. Así tenemos que  $R_T = 0.364 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Calculando la transmitancia térmica, que es el inverso de la resistencia térmica, tenemos que  $U = 2.74 \text{ W/m}^2\text{K}$ . De manera semejante, fue calculada la transmitancia térmica para V2, E1, E2 y para el hormigón convencional.

Datos utilizados para V2:

$$\rho_{V2} (\text{kg/m}^3) = 1130$$

$$\rho_{\text{revoque}} (\text{kg/m}^3) = 1900$$

$$\rho_{\text{mortero}} (\text{kg/m}^3) = 1700$$

$$\text{Espesor (e) del V2} = 0.11 \text{m}$$

$$\text{Espesor (e) del revoque externo} = 0.01 \text{m}$$

$$\text{Espesor (e) del revoque interno} = 0.01 \text{m}$$

$$\text{Largo del bloque} = 0.23 \text{m}$$

$$\text{Altura del bloque} = 0.05 \text{m}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del V2} = 0.34 \text{ W/m.K}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del mortero} = 1.15 \text{ W/m.K}$$

$$\text{Conductividad térmica } (\lambda) \text{ del revoque} = 1.15 \text{ W/m.K}$$

Así, obtuvimos  $R_T = 0.41 \text{ m}^2\text{K/W}$  y  $U = 2.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

#### Datos utilizados para E1:

$\rho$  E1 ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1070  
 $\rho$  revoque ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1900  
 $\rho$  mortero ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1700  
Espesor (e) del E1 = 0.11m  
Espesor (e) del revoque externo = 0.01m  
Espesor (e) del revoque interno = 0.01m  
Largo del bloque = 0.23m  
Altura del bloque = 0.05m  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del E1 = 0.56 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del mortero = 1.15 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del revoque = 1.15 W/m.K

Así, obtuvimos  $R_T = 0.35 \text{ m}^2\text{K/W}$  y  $U = 2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

#### Datos utilizados para E2:

$\rho$  E2 ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1070  
 $\rho$  revoque ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1900  
 $\rho$  mortero ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1700  
Espesor (e) del E2 = 0.11m  
Espesor (e) del revoque externo = 0.01m  
Espesor (e) del revoque interno = 0.01m  
Largo del bloque = 0.23m  
Altura del bloque = 0.05m  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del E2 = 0.5 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del mortero = 1.15 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del revoque = 1.15 W/m.K

Así, obtuvimos  $R_T = 0.36 \text{ m}^2\text{K/W}$  y  $U = 2.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

#### Datos utilizados para hormigón convencional:

$\rho$  HC ( $\text{kg/m}^3$ ) = 2300  
 $\rho$  revoque ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1900  
 $\rho$  mortero ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1700  
Espesor (e) del HC = 0.11m  
Espesor (e) del revoque externo = 0.01m  
Espesor (e) del revoque interno = 0.01m  
Largo del bloque = 0.23m  
Altura del bloque = 0.05m  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del HC = 1.85 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del mortero = 1.15 W/m.K  
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) del revoque = 1.15 W/m.K

Así, obtuvimos  $R_T = 0.25 \text{ m}^2\text{K/W}$  y  $U = 3.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

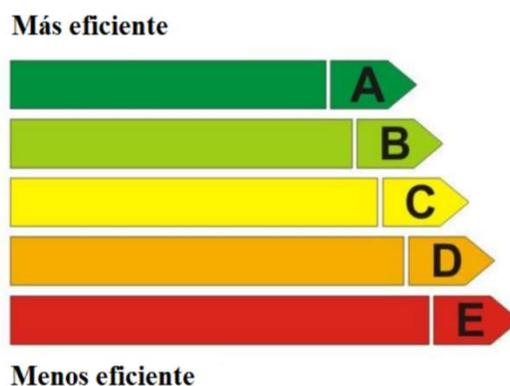
## Resultados

A lo largo del trabajo fue calculada la transmitancia térmica para coberturas y paredes con hormigón ligero de vermiculita, de EPS y con hormigón convencional. Los resultados encontrados para V1, V2, E1, E2 y hormigón convencional están presentados la Tabla 7.

**Tabla 7.** Transmitancias térmicas calculadas para cobertura y pared.

Tipos de hormigón	Transmitancia térmica de la cobertura (W/m <sup>2</sup> K)	Transmitancia térmica de la pared (W/m <sup>2</sup> K)
V1	1.50	2.74
V2	1.34	2.42
E1	1.59	2.88
E2	1.54	2.74
Hormigón convencional	2.01	3.96

La transmitancia térmica es el primer prerequisite exigido por el Procel para que se pueda analizar y clasificar la eficiencia energética de una edificación según la Figura 4.



**Figura 4.** Clasificación de la eficiencia energética de una edificación según el Procel (Procel Edifica, 2013).

Así fue necesario elegir la Zona Bioclimática. Según la NBR 15220 – Parte 3: Zonificación Bioclimático y directrices constructivas para viviendas unifamiliares de interés social (ABNT, 2005), Brasil está dividido en 8 zonas bioclimáticas (Figura 5). La ciudad de Joinville (Brasil), utilizada en este estudio, se encuentra en la Zona Bioclimática de número 3. Así, se inició la clasificación de la cobertura de acuerdo con la Tabla 8.

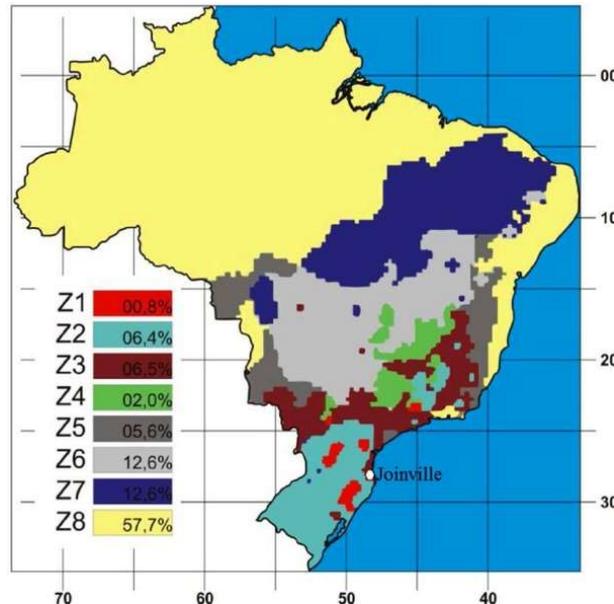


Figura 5. Mapa de Zonificación Bioclimática Brasileño (Procel Edifica, 2013).

Tabla 8. Exigencias para transmitancia térmica de coberturas para los niveles de eficiencia y Zonas Bioclimáticas.

Zonas Bioclimáticas	Nivel A		Nivel B		Niveles C y D	
	AC*	ANC*	AC	ANC	AC	ANC
ZB 1 y 2	0.5	1.0	1.0	1.5	2.0	
ZB 3 a 8	1.0	2.0	1.5	2.0		

\*AC – Ambientes Acondicionados; ANC – Ambientes no acondicionados.

Así, V1, V2, para ambientes acondicionados, se encuentran en el nivel B. Para E1 y E2, a pesar de cerca del límite, se encuentran en un nivel C o D, así como el hormigón convencional. Para la clasificación de los muros, tenemos la Tabla 9.

Tabla 9. Exigencias para transmitancia térmica de muros para los niveles de eficiencia y Zonas Bioclimáticas.

Zonas Bioclimáticas	Nivel A	Nivel B	Niveles C y D
ZB 1 y 2	1.0	2.0	3.7
ZB 3 a 6		3.7	
ZB 7 y 8		2.5 W/m <sup>2</sup> K, para muros con CT ≤ 80 kJ/m <sup>2</sup> K	
		3.7 W/m <sup>2</sup> K, para muros con CT > 80 kJ/m <sup>2</sup> K	

Para los muros no hay un límite para cada nivel, pero todo y cualquier hormigón a ser utilizado como aislamiento no puede superar un valor de  $W/m^2K$ . Con eso, solamente los hormigones con vermiculita y EPS se encuadran.

### Conclusiones

En este trabajo se calculó el primer prerrequisito exigido por el PROCEL para la clasificación (rotulado) energética. Se calculó la transmitancia térmica para coberturas y muros. Los dos cierres fueron calculados para dos tipos de hormigón ligero con vermiculita, dos tipos de hormigón ligero con EPS y otro con hormigón convencional. Se concluyó que para cobertura los hormigones con vermiculita, para ambientes acondicionados, obtuvieron una clasificación B, superior al hormigón con EPS y al convencional, clasificados como C o D, respectivamente.

Para muros, era solamente necesario un valor inferior a  $3.7 W/m^2K$  para las espesuras elegidas. Solamente los dos hormigones fabricados con vermiculita y EPS se encuadraron, pero, el hormigón convencional. Con esto, se concluyó que el hormigón ligero hecho con vermiculita presentó mejores resultados en la parte inicial de la clasificación cuando se trata del confort térmico. El hormigón con EPS no presentó una excelente clasificación, no obstante, aun así presentó mejores valores cuando comparado con el hormigón convencional.

Para trabajos futuros, se sugiere un nuevo diseño (nuevas dimensiones) de muro para que el hormigón convencional alcance el nivel aceptable. Además, se puede calcular el segundo prerrequisito (iluminación artificial) y el tercer prerrequisito (sistema de aire acondicionado) para la clasificación de una edificación comercial exigido por el reglamento RTQ-C (Procel Edifica, 2013).

### Agradecimientos

*Los autores agradecen el apoyo recibido de UDESC- Joinville (proyecto 2119/2011 PROIP, Carmeane Effting), en forma de iniciación científica (Ana Beatriz Rozza Bortot, Ana Karoliny Ferrari y Vitor Oliveira Bolonhesi).*

### Referencias bibliográficas

- ABNT, Brazilian Association for Technical Standards (2005) NBR 15220:3. Thermal performance in buildings Part 3: Brazilian bioclimatic zones and building guidelines for low-cost houses, ABNT, Rio de Janeiro, Brazil.
- ABNT, Brazilian Association for Technical Standards (2008) NBR 15220:2. Thermal performance in buildings Part 2: Calculation methods of thermal transmittance, thermal capacity, thermal delay and solar heat factor of elements and components of buildings, ABNT, Rio de Janeiro, Brazil.

- ABNT, Brazilian Association for Technical Standards (2018) NBR 16697. Portland cement - Requirements, ABNT, Rio de Janeiro, Brazil.
- Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F., Al-Hussain, S. N. (2013) Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls, *Applied Energy*, **102**, 1063-1070. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.016>
- Aste, N., Angelotti, A., Buzzetti, M. (2009) The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, *Energy and Buildings*, **41**(11), 1181-1187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>
- Bedoya, C., Dzul, L. (2015) Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project, *Revista Ingeniería de Construcción*, **30**(2), pp. 99-108. Acesso em 3 de outubro de 2016, disponível em: [http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/viewFile/587/pdf\\_1](http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/viewFile/587/pdf_1)
- Bolatturk, A. (2006) Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey, *Applied Thermal Engineering*, **26**(11-12), 1301-1309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.019>
- Campiteli, V. C. (2004) Concreto de Cimento Portland: Um Método de Dosagem, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná, *Engenharia Civil*, **20**, 5-16.
- Chen, B., Liu, N. (2014) A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, **44**, 691-698. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.091>
- Dai, X., Wu, Y., Di, Y., Li, Q. (2009) Government regulation and associated innovations in building energy-efficiency supervisory systems for large-scale public buildings in a market economy, *Energy Policy*, **37**(6), 2073-2078. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.008>
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (1997) *Fundamentals of Physics*, 5ª ed.. John Wiley and Sons.
- Ji, R., Zhang, Z. T., Liu, L. L., Wang, X. D. (2014) Development of the random simulation model for estimating the effective thermal conductivity of insulation materials, *Building and Environment*, **80**, 221-227. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.033>
- Kong, X., Lu, S., Wu, Y. (2012) A review of building energy efficiency in China during Eleventh Five-Year period, *Energy Policy*, **41**, pp. 624-635. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.024>
- Lamberts, R., Dutra, L., Pereira, F. (1997) Eficiência energética na arquitetura, 3.ed. Eletrobras, Minitério de Minas e Energia – Brasil, Rio de Janeiro.
- Memon, S. A. (2014) Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **31**, 870-906. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.042>
- Mobasher, B., Minor, G., Zenouzi M., Jalife, S. L. (2011), Thermal and mechanical characterization of contiguous wall systems for energy efficient low cost housing, Proceedings of the Asme 5th International Conference on Energy Sustainability 2011, ES2011-54952, Washington, DC, USA, 1909-1915. doi: <https://doi.org/10.1115/ES2011-54952>
- Mustafaraj, G., Marini, D., Costa, A., Keane, M. (2014) Model calibration for building energy efficiency simulation, *Applied Energy*, **130**, 72-85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.019>
- Procel Edifica e Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3 - UFSC. (2013), *Manual para aplicação do regulamento técnico da qualidade para eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos*, versão 2. Acesso em 12 de setembro de 2016, disponível em: [http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/manualv02\\_1.pdf](http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/manualv02_1.pdf)
- Rossi, M., Rocco, V. M. (2014) External walls design: The role of periodic thermal transmittance and internal areal heat capacity, *Energy and Buildings*, **68**, 732-740. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.049>
- Schackow, A., Eftting, C., Folgueras, M. V., Gueths, S., Mendes, G. A. (2014) Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent, *Construction and Building Materials*, **57**, pp. 190-197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.009>

- Szokolay, S. V. (1987) *“Thermal design of buildings”*, Royal Australian Institute of Architects - RAI Education Division, Red Hill, Australia.
- Yang, Y., Li, B., Yao, R. (2010) A method of identifying and weighting indicators of energy efficiency assessment in Chinese residential buildings, *Energy Policy*, **38**(12), pp. 7687-7697.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.018>
- Zhong, Y., Cai, W. G., Wu, Y., Ren, H. (2009) Incentive mechanism design for the residential building energy efficiency improvement of heating zones in North China, *Energy Policy*, **37**, pp. 2119-2123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.038>