

EDUARDO BREVIGLIERI PEREIRA DE CASTRO, PEDRO KOPSCHITZ XAVIER BASTOS, LETÍCIA MARIA DE ARAÚJO ZAMBRANO E MARC MÉQUIGNON

Potencial de redução do consumo de energia em edificações brasileiras pelo uso de argamassa isolante no revestimento de paredes

Potential reduction of energy consumption in brazilian buildings through the use of insulating mortar in wall coating

Eduardo Breviglieri Pereira de Castro

Professor da Universidade Federal de Juiz de Fora / Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica. Engenheiro Civil. Mestre em Arquitetura pela UFRJ. Doutor em Engenharia Mecânica pela UFRJ e pelo INSA de Lyon. Pós-doutor pela ENSA de Toulouse.

Professor at the Federal University of Juiz de Fora, Department of Production and Mechanics Engineering. Graduated in Civil Engineering. Master's degree in Architecture from UFRJ. Ph.D in Mechanical Engineering from UFRJ and INSA de Lyon. Postdoctoral degree from ENSA Toulouse.

eduardo.castro@ufff.edu.br

Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Professor da Universidade Federal de Juiz de Fora / Departamento de Construção Civil. Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Civil pela UFF. Doutor em Engenharia Civil pela USP. Pós-doutor pelo INSA de Toulouse.

Professor at the Federal University of Juiz de Fora / Department of Civil Construction. Graduated in Civil Engineering. Master's degree in Civil Engineering from UFF. Ph.D in Civil Engineering from USP. Postdoctoral degree from INSA Toulouse.

pedrokop@ufff.br

Letícia Maria de Araújo Zambrano

Professora da Universidade Federal de Juiz de Fora / Departamento de Projeto, Representação e Tecnologia. Arquiteta. Mestre e Doutora em Arquitetura pela UFRJ. Pós-doutora pela ENSA de Toulouse.

Professor at the Federal University of Juiz de Fora / Department of Design, Representation and Technology. Graduated in Architecture. Master's degree and Ph.D in Architecture from UFRJ. Postdoctoral degree from ENSA Toulouse.

leticia.zambrano@ufff.edu.br

Marc Méquignon

Professor da Université Paul Sabatier / Toulouse III, France. Pesquisador do Laboratoire d'Études et de Recherches Appliquées en Sciences Sociales - LERASS. Arquiteto. Doutor pelo INSA de Toulouse e ENSA de Toulouse.

Professor at Université Paul Sabatier Toulouse III, France. Researcher at the Laboratoire d'Études et de Recherches Appliquées en Sciences Sociales - LERASS. Graduated in Architecture. Ph.D from INSA Toulouse and ENSA Toulouse.

marc-andre.mequignon@iut-tlse3.fr

Resumo

Este artigo apresenta um estudo comparativo do consumo de energia para resfriamento e aquecimento de edificações, utilizando dados resultantes de simulação computacional, considerando a substituição de argamassa tradicional para o revestimento de paredes por uma argamassa isolante de menor condutividade térmica (λ). Foi calculada a energia necessária durante um ano para manter condições confortáveis de temperatura no ambiente interno de um cômodo hipoteticamente criado, de dimensões 5,0 x 5,0 x 5,0 (m), comparando-se o desempenho de três soluções técnicas diferentes para as paredes externas. Adotou-se bloco cerâmico vazado para a composição das paredes, variando o tipo de argamassa e sua posição (lado externo ou interno). Para a argamassa isolante considerou-se $\lambda = 0,20$ W/m.K e, para a argamassa comum, $\lambda = 1,15$ W/m.K. Utilizou-se o programa computacional TRNSYS para os cálculos do consumo de energia em localidades situadas em cada uma das oito zonas bioclimáticas brasileiras, conforme a norma brasileira ABNT NBR 15220-3:2005. Os dados climáticos utilizados foram obtidos pelo programa METEONORM. Os resultados apontam para uma redução significativa do consumo de energia com a utilização da argamassa de baixa condutividade, indicando o potencial do uso desse material na construção de edificações mais eficientes em termos de energia operativa.

Palavras-chave: Consumo energético; Conforto; Argamassa; Revestimento; Edificação.

Abstract

This article presents a comparative study of energy consumption for cooling and heating of buildings, using computer simulation data, considering replacing traditional mortar for coating the walls by an insulating mortar of lower thermal conductivity (λ). The power required to maintain comfortable temperatures in the internal environment of a hypothetically created room of dimensions 5.0 x 5.0 x 5.0 (m) was calculated over a year, comparing the performance of three technical solutions for different external walls. Ceramic perforated blocks were adopted for the composition of the walls, varying the type of mortar and its position (external or internal side). For the insulating mortar a $\lambda = 0.20$ W/m.K was considered, and for normal mortar, a $\lambda = 1.15$ W/m.K. The computer program TRNSYS was used for calculations of energy consumption in localities situated in each of the eight Brazilian bioclimatic zones, according to the Brazilian standard ABNT NBR 15220-3:2005. The climate data used were obtained by the METEONORM program. The results point to a significant reduction of energy consumption with the use of low conductivity mortar, indicating the potential use of this material in the construction of more efficient buildings in terms of their operative energy.

Keywords: Energy consumption; Comfort; Mortar; Coating; Building.

Resumen

En este artículo se presenta un estudio comparativo del consumo energético para refrigeración y calefacción de edificios, a partir de datos resultantes de la simulación por ordenador, considerando la sustitución del mortero tradicional para revestimiento de muros por un mortero aislante de menor conductividad térmica (λ). Se calculó la energía necesaria durante un año para mantener condiciones agradables de temperatura en el ambiente interno de una habitación hipotéticamente creada, midiendo 5.0 x 5.0 x 5.0 (m), comparando el desempeño de tres soluciones técnicas diferentes para las paredes exteriores. Se adoptó un bloque cerámico hueco para la composición de los muros, variando el tipo de mortero y su posición (exterior o interior). Para el mortero aislante se consideró $\lambda = 0,20$ W/m.K y, para el mortero común, $\lambda = 1,15$ W/m.K. Se utilizó el programa informático TRNSYS para calcular el consumo de energía en ciudades ubicadas en cada una de las ocho zonas bioclimáticas brasileñas, de acuerdo con la norma brasileña ABNT NBR 15220-3:2005. Los datos climáticos utilizados fueron obtenidos por el programa METEONORM. Los resultados apuntan a una importante reducción del consumo energético con el uso de mortero de baja conductividad, lo que indica el potencial del uso de este material en la construcción de edificios más eficientes en términos de energía operativa.

Palabras clave: Consumo de energía; Comfort; Mortero; Revestimiento; Edificación.

Introdução

Um dos setores de atividades que mais consomem energia no mundo é o da construção civil, em toda sua cadeia de produção, com destaque para os edifícios, principalmente na fase de uso, que representaram, em 2010, 51% do consumo total de eletricidade (LUCON et al., 2014). No Brasil, o setor de edificações respondia, em 2019, por cerca de 50% do consumo de energia elétrica no país, considerando edificações comerciais, residenciais e do setor público. Dentro desse segmento, as residências são responsáveis pela metade (BRASIL, 2020; BRASIL, 2020b), complementando números bastante expressivos, especialmente quando consideradas as crises hídricas recentes, que levam ao uso de fontes menos limpas de geração, como a termelétrica.

O consumo de energia significa, geralmente, impacto ambiental negativo, seja pela extração de recursos naturais não renováveis, seja pela queima de combustíveis e emissão de gases do efeito estufa (GEE). As edificações representam 19% da energia consumida no mundo relacionada à emissão de CO₂ (LUCON et al., 2014). Ao se buscar eficiência energética em edifícios, política prioritária entre as grandes economias do mundo (BRASIL, 2020), o envelope da construção é uma de suas partes que mais merecem atenção. São importantes a natureza, a espessura e as propriedades térmicas de cada camada constituinte.

Os edifícios devem manter um ambiente interior estável em termos de conforto térmico, em relação às condições do clima exterior, e isso exige desempenho energético adequado de seu envelope, além de um eventual aporte de energia por meio de aparelhos para aquecimento e/ou resfriamento (PULSELLI et al., 2009). Nos países de clima frio, por necessidade de conforto e, ao mesmo tempo, de redução de uso de aparelhos de aquecimento dos ambientes, é dada forte ênfase a camadas de isolamento térmico nas paredes como característica construtiva essencial. Em regiões quentes, ao contrário, investe-se mais em resfriamento do ar interno, dando-se menor importância ao isolamento.

Em construções nas cidades brasileiras, técnicas passivas que permitam obter conforto a partir de recursos naturais são relativamente pouco exploradas, em projeto, muito embora existam sugestões normativas nesse sentido, como na norma ABNT NBR 15220-3:2005 (ABNT, 2005). Pode-se dizer o mesmo a respeito da escolha dos materiais para construção.

O presente artigo apresenta um estudo, relacionado ao clima brasileiro, da influência de propriedades térmicas do envelope dos edifícios em sua eficiência energética, com abordagem concentrada na condutividade térmica das argamassas de revestimento. Buscam-se resultados que tragam conhecimento sobre o potencial de redução no consumo de energia explorando-se o desempenho térmico dos materiais.

A avaliação do desempenho de um material ou de um edifício pode ser feita usando-se indicadores ligados à durabilidade, à geração de resíduos ou à eficiência energética, entre diversos outros aspectos. No presente estudo avalia-se o desempenho da edificação através do comportamento térmico das paredes externas e sua influência na necessidade de energia para manter a temperatura do ar interior em um nível desejado. A hipótese estudada é a de que a condutividade térmica da argamassa de reboco pode ter influência no conforto da edificação e, conseqüentemente, poderá contribuir para a economia de energia gasta com aparelhos de ar condicionado e de aquecimento do ambiente, tendência em muitas localidades. Com essa contribuição haverá, também, indiretamente, redução de emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. Considerando essa hipótese, procurou-se responder a questões como: i) As argamassas de revestimento têm função térmica importante como constituintes

do envelope do edifício? ii) A espessura do reboco é importante nesse contexto? iii) O desempenho térmico do reboco e sua influência no desempenho do edifício seriam muito diferentes de acordo com as zonas bioclimáticas brasileiras? iv) Vale a pena, do ponto de vista de atendimento às normas técnicas e da economia de energia nos edifícios, investir em desenvolvimento de argamassas isolantes? O objetivo é, portanto, a avaliação do desempenho de soluções construtivas para condições específicas, em termos de consumo energético de uma edificação.

Desempenho térmico de argamassas de revestimento

Contextualização

As diversas maneiras de se promover o conforto térmico em um edifício, seja em climas frios ou quentes, vão desde o aproveitamento dos recursos naturais com "estratégias passivas", como a circulação de ar e a orientação adequada em relação ao sol, até a aplicação de camadas de isolamento em paredes, passando por técnicas mais elaboradas de arquitetura bioclimática bastante conhecidas – paredes de dupla camada e paredes que permitem estocagem de calor, entre outros exemplos (DUTREIX, 2010).

O envelope do edifício é uma de suas partes mais importantes quanto à influência nas condições internas de conforto, construído com soluções que afetam diretamente o consumo de energia da construção durante toda a sua vida útil, principalmente durante a fase de uso. Muitos estudos utilizam essa abordagem, comparando materiais e tecnologias diferentes, como o de Sadineni et al. (2011). Brás, Gonçalves e Faustino (2014) compararam dois tipos de envelopes (parede tradicional dupla de blocos cerâmicos com camada isolante no meio e parede de bloco cerâmico revestido com o sistema ETICS – Sistema Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior) de residências em Portugal. Diversos trabalhos baseiam-se também em simulações computacionais. Por exemplo, Florides et al. (2002) utilizaram o software TRNSYS para avaliar o efeito do isolamento no consumo de energia de diferentes modelos de edificações.

Explorar as propriedades térmicas dos materiais, sejam de origem mineral (argila, lã de vidro, vermiculita expandida, argila expandida etc.), vegetal (madeira, cortiça, fibras de coco, palhas etc.) ou sintéticos (poliestireno e poliuretano, entre outros), é um dos pontos principais para obtenção de um bom desempenho do envelope, segundo diversos autores (OLIVA e COURGEY, 2011).

Uma composição de parede muito comum em todo o mundo é a construção em alvenaria de blocos cerâmicos, de pedra ou de concreto, com revestimento de argamassa. Especialmente sobre as argamassas, principal objeto de estudo do presente artigo, muitos trabalhos utilizam diferentes tipos de agregados incorporados a uma matriz cimentícia, com o objetivo de melhorar seu desempenho térmico. Pesquisas como a de Koksál et al. (2015) mostram resultados de ensaios em argamassas compostas com vermiculita expandida que apresentaram condutividade térmica baixa, em torno de 0,25 W/m.K. A incorporação de materiais naturais, como a fibra de palmeira, também foi investigada em argamassas para compósitos, para os quais foram encontrados valores de condutividade térmica de 0,14 a 0,63 W/m.K, de acordo com o teor de fibras (BENMANSOUR et al., 2015). Wang e Meyer (2012) concluíram que o resíduo de poliestireno de alto impacto (HIPS, na sigla em inglês) incorporado em argamassa de cimento e areia proporcionou a obtenção de condutividade térmica

igual a 0,27 W/m.K. Para efeito de comparação com os valores mencionados, na norma brasileira ABNT NBR 15220-2 (ABNT, 2005) consta o valor de $\lambda = 1,15$ W/m.K para a "argamassa comum". Esses e outros trabalhos também mostram forte correlação entre baixa densidade e baixa condutividade térmica da argamassa, o que leva muitos autores a usarem o termo "argamassa leve" (*lightweight mortar*) para a argamassa isolante. Pesquisas que relacionam propriedades das argamassas de revestimento com o desempenho energético de uma edificação – objeto deste trabalho – são, no entanto, mais escassas.

Argamassas de revestimento e a normatização brasileira para transmitância térmica de paredes

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - RTQ-C (BRASIL, 2013) especifica requisitos técnicos e métodos para classificação de edificações brasileiras quanto à eficiência energética. Esses regulamentos definem valores de propriedades térmicas das paredes externas e coberturas de ambientes de permanência prolongada a serem atendidos, para fins de etiquetagem, de acordo com as Zonas Bioclimáticas brasileiras. O não atendimento a esses valores limita a pontuação da edificação quanto à envoltória. Os valores são adotados de acordo com as normas ABNT NBR 15575-4 (ABNT, 2021) e ABNT NBR 15575-5 (ABNT, 2021b).

A norma brasileira ABNT 15575-4:2021 – Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas (ABNT, 2021) – estabelece limites de transmitância térmica de paredes de acordo com as zonas bioclimáticas brasileiras, como mostra a Figura [1].

FIGURA 1 – Tabela de valores máximos de transmitância térmica (U) admitidos para paredes externas de acordo com a zona bioclimática brasileira - Limites da norma NBR 15575.

Fonte: os autores.

TRANSMITÂNCIA TÉRMICA "U" [W/(m ² .K)]	
ZONAS 1 e 2	ZONAS 3, 4, 5, 6, 7 e 8.
U ≤ 2,7	α ≤ 0,6
	α > 0,6
	U ≤ 3,7
	U ≤ 2,5

Conhecendo-se esses limites, qualquer envoltória pode ser avaliada quanto ao valor de U. Sabendo-se que um tipo de envelope de edifícios bastante comum no cenário brasileiro é aquele composto por alvenaria cerâmica e revestimento de argamassa cimentícia, foram calculados, para esse modelo, os valores de transmitância térmica variando-se o valor da condutividade térmica (λ) e a espessura da argamassa de reboco externo. O objetivo foi o de verificar como se adequariam diferentes soluções em relação à norma. O método de cálculo adotado foi o sugerido na ABNT NBR 15220-2:2008 (ABNT, 2008). Os parâmetros adotados foram: bloco cerâmico vazado de seis furos de dimensões 9,0 x 19,0 x 19,0 cm, espessura da parede 9,0 cm, espessura da argamassa de assentamento 1,0 cm, espessura do reboco interno fixa igual a 2,5 cm e quatro espessuras de reboco externo (2,5 - 3,0 - 3,5 - 4,0 cm). Foram adotados dois valores de λ para a argamassa de reboco: 0,20 W/m.K para argamassa isolante e 1,15 W/m.K para argamassa normal, representando limites mínimo e máximo da faixa dentro da qual está a maior parte dos valores encontrados na literatura. Os resultados são mostrados na Figura [2] e Figura [3].

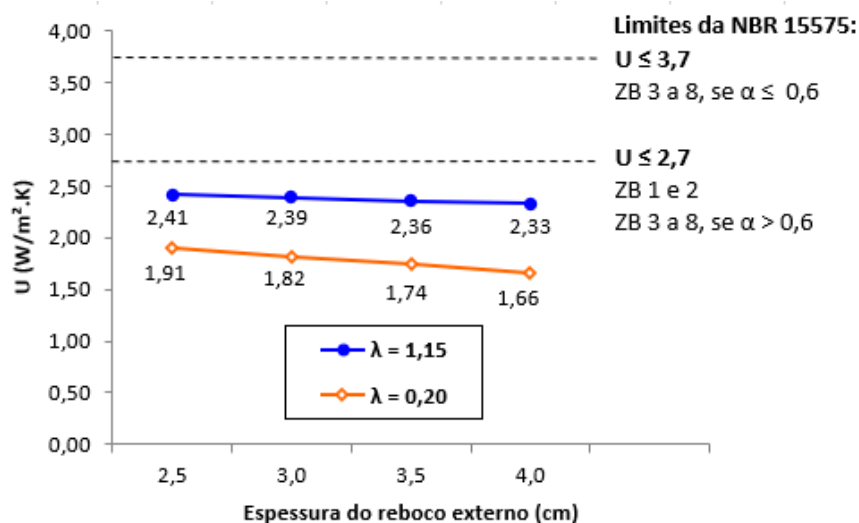
FIGURA 2 – Tabela de valores calculados de transmitância térmica "U" [W/(m².K)] de paredes externas de bloco cerâmico para dois valores de condutividade térmica (λ) da argamassa de reboco.

Fonte: os autores.

ESPESSURA DO REBOCO (cm)	ARGAMASSA DE REBOCO ISOLANTE $\lambda = 0,20$ W/m.K	ARGAMASSA DE REBOCO NORMAL $\lambda = 1,15$ W/m.K
2,5	1,91	2,41
3,0	1,82	2,39
3,5	1,74	2,36
4,0	1,66	2,33

FIGURA 3 – Valores de transmitância térmica calculados para parede de bloco cerâmico vazado e argamassas de reboco isolante e normal, comparados com limites da NBR 15575.

Fonte: os autores.



A Figura [3] mostra que os dois limites máximos (linhas tracejadas) de U da NBR 15575 são atendidos quaisquer que sejam as zonas bioclimáticas brasileiras e os valores de absorvância α , tanto para a argamassa isolante quanto para a normal. Também pode ser observado que a espessura do reboco externo tem pouca influência nos valores de U calculados, ou seja, aumentando-se de 2,5 até 4,0 cm (valores muito presentes em obras), pouca variação para menos ocorre no valor da transmitância térmica global da parede. Assim sendo, para essa configuração, contata-se que, para efeito de atendimento à norma, de nada valeria investir para tornar o reboco termicamente mais isolante. Diante destes resultados, os autores do presente trabalho viram como imperativo investigar o possível efeito da argamassa isolante sobre o desempenho térmico do edifício, isto é, para manutenção de temperaturas internas de conforto.

Metodologia

Abordagem geral

O presente estudo faz uma comparação de três soluções diferentes para a construção da parede externa de um edifício. O objetivo foi determinar o efeito que a propriedade física condutividade térmica de uma camada constituinte dessa parede apresenta sobre as condições térmicas do ambiente interno. Partiu-se do pressuposto de que haveria a interferência da climatização artificial no ambiente na evolução dessas condições. Trabalhou-se com a hipótese de que uma argamassa de revestimento de baixa condutividade promoveria redução do consumo de energia do aparelho usado para manter uma temperatura de conforto dentro do edifício, obtendo-se, com isso, vantagem em termos de custo e impacto ambiental.

Com o propósito de realizar os cálculos e a comparação das diferentes soluções técnicas, foi idealizado um cômodo teórico de referência baseado em prática construtiva comum em edificações brasileiras. Essa prática foi considerada para as paredes do ambiente, que tem uma configuração volumétrica de 5,0 x 5,0 x 5,0 metros. As lajes de cobertura e piso do cômodo foram consideradas idênticas e com coeficiente global de transferência de calor bastante baixo ($U = 0,096 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), com o propósito de praticante eliminar qualquer transferência térmica através dessas duas superfícies, de modo a não influenciarem os resultados da simulação. Dessa forma, apenas as paredes seriam as responsáveis pelas trocas de calor entre o exterior e o interior do ambiente. A superfície exposta, responsável pelas trocas térmicas com o exterior, possui, portanto, 100 m^2 , e o volume do ambiente 125 m^3 . O cômodo hipotético, representado na Figura [4], foi considerado totalmente fechado, sem nenhuma abertura para o exterior e sem cargas internas de calor, condição que foge à realidade de uma construção normal com aberturas e ocupada, mas mantida no presente estudo de avaliação exclusiva das paredes, pensando-se na introdução de outros fatores que interferem nos resultados em futuros trabalhos.

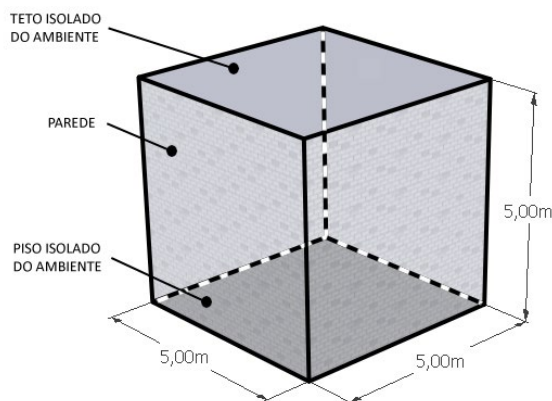


FIGURA 4 – Modelo 3D do cômodo simulado.

Fonte: os autores.

A análise considerou paredes de blocos cerâmicos vazados assentados com argamassa e revestidos por reboco externo e interno, também de argamassa cimentícia. De maneira similar ao estudo apresentado anteriormente, o bloco cerâmico adotado tem espessura de 9,0 cm e 19,0 cm nas outras duas dimensões, com revestimento de 2,5 cm em cada lado da parede. A argamassa de assentamento foi considerada com 1,0 cm de espessura.

As variações se limitaram a modificar apenas o tipo de reboco utilizado, constituindo três configurações de parede, da seguinte maneira: i) reboco de argamassa normal nas superfícies exterior e interior – parede denominada "NORM/NORM" neste estudo; ii) reboco de argamassa isolante no exterior e normal no interior – parede "ISO/NORM"; iii) reboco de argamassa isolante nas superfícies exterior e interior – parede "ISO/ISO". A Figura [5] apresenta as três paredes (vistas em corte vertical) e a FIGURA [6] ilustra um conjunto de blocos cerâmicos e argamassa de assentamento.

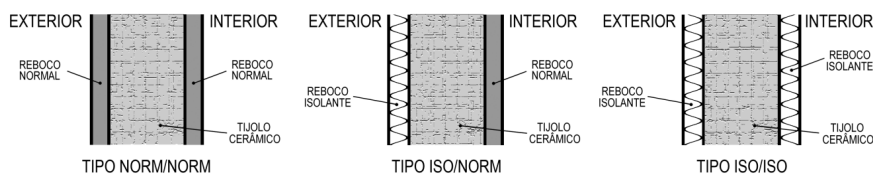
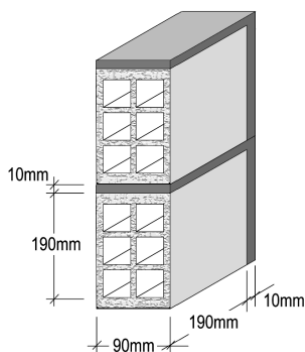


FIGURA 5 – Composições das paredes externas (corte vertical).

Fonte: os autores.

FIGURA 6 – Vista, em perspectiva, dos blocos cerâmicos e da argamassa de assentamento.

Fonte: os autores.



A transferência de calor através da parede, em função do clima, foi avaliada considerando-se que a temperatura ambiente interna deveria permanecer entre 18 °C e 25 °C, condições térmicas adotadas como confortáveis. Considerou-se, também, que a dissipação de energia devido à condução térmica e à convecção (perda de calor no inverno e ganho de calor no verão, através da parede) seria totalmente substituída por um aporte de energia para aquecimento no inverno e para o resfriamento no verão. As horas de funcionamento do equipamento de aquecimento/resfriamento foram estimadas com base em duas situações estabelecidas para as simulações: i) o ar condicionado começaria a

trabalhar cada vez que a temperatura no interior ultrapassasse 25 °C; ii) o sistema de aquecimento começaria a trabalhar cada vez que a temperatura interior baixasse para menos de 18 °C. Esse esquema de funcionamento do aparelho é baseado sempre nas condições climáticas externas, no transcorrer de um ano. A quantidade de energia para aquecimento e/ou resfriamento do ambiente, ao longo das 8.760 horas do ano, foi a variável utilizada para a comparação de desempenho das diferentes soluções técnicas.

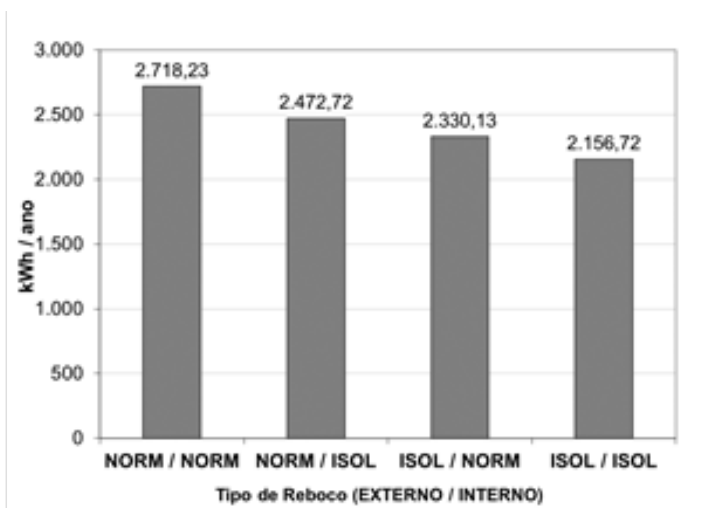
Considerações sobre a posição do reboco isolante – revestimento externo/interno

Antes da avaliação térmica para todos os casos previstos, fez-se necessário esclarecer uma questão específica importante: se haveria influência no consumo energético da edificação de acordo com a posição da camada de revestimento isolante, isto é, se aplicada no lado externo ou interno do ambiente. Considerou-se, nessa verificação preliminar, a aplicação em somente em um dos lados da parede, com reboco normal no outro. Procedeu-se a uma simulação seguindo os passos descritos neste artigo, primeiramente apenas para a localização da cidade do Rio de Janeiro (zona bioclimática 8).

Os resultados apresentados na Figura [7] evidenciam que a energia necessária para resfriar o ambiente estudado com a camada isolante no exterior da edificação é ligeiramente menor do que quando considerada no interior. A diferença entre os valores encontrados foi de 6%, aproximadamente.

FIGURA 7 – Consumo anual de energia para resfriamento de um cômodo para diferentes composições de parede na cidade do Rio de Janeiro.

Fonte: os autores.



Dessa forma, no prosseguimento do estudo foram adotadas as três composições mostradas na Figura [5], descartando-se a solução NORM/ISO nas simulações, uma vez que ficou demonstrado que era a composição menos eficiente com pelo menos uma camada de argamassa isolante.

Escolha das cidades representativas das zonas bioclimáticas brasileiras

Foram escolhidas cidades representativas de cada uma das zonas bioclimáticas (ZB) brasileiras constantes na norma ABNT NBR 15220-3:2005 (ABNT, 2005), listadas na tabela da Figura [8].

ZONA BIOCLIMÁTICA	CIDADE	UF
1	São Joaquim	SC
2	Santa Maria	RS
3	Belo Horizonte	MG
4	Brasília	DF
5	Santos	SP
6	Goiânia	GO
7	Petrolina	PE
8	Rio de Janeiro	RJ

FIGURA 8 – Tabela das localidades utilizadas nas simulações e suas respectivas zonas bioclimáticas (ABNT, 2005).

Fonte: os autores.

Propriedades físicas das paredes

A tabela da Figura [9] apresenta os valores de condutividade térmica, densidade, calor específico e absorvância dos materiais considerados, e a tabela da Figura [10], a transmitância térmica calculada pelo programa computacional TRNSYS (ver item a seguir) de cada configuração de parede.

MATERIAL	CONDUTIVIDADE (λ) W/(m.K)	DENSIDADE kg/m ³	CALOR ESPECÍFICO kJ/(kg.K)	ABSORVÂNCIA (α)
Argamassa comum	1,15	2.000,00	1,00	0,50
Argamassa isolante	0,20	1.000,00	1,00	0,50
Bloco cerâmico vazado	0,39	1.600,00	0,92	0,75

FIGURA 9 – Tabela de características físicas dos materiais adotados nas composições de parede simuladas.

Fonte: os autores.

COMPOSIÇÃO REVESTIMENTO EXT. + TIJOLO + REVESTIMENTO INT.	NOMENCLATURA ADOTADA	U [W/(m ² .K)]
REBOCO NORMAL + TIJOLO + REBOCO NORMAL	NORM/NORM	2,41
REBOCO ISOLANTE + TIJOLO + REBOCO NORMAL	ISO/NORM	1,91
REBOCO ISOLANTE + TIJOLO + REBOCO ISOLANTE	ISO/ISO	1,59

FIGURA 10 – Tabela da transmitância térmica (U) para as composições de parede simuladas.

Fonte: os autores.

Embora não seja um fator influente no desempenho térmico, foi feito, também, com o auxílio da ferramenta computacional CasaCO (COIMBRA et. al., 2019), o cálculo do CO₂ embutido das paredes, que representa sua pegada de carbono no percurso berço-fábrica. O valor encontrado, de 80 kgCO₂/m², permite assegurar que a solução alvenaria de bloco cerâmico + emboço é uma solução ambientalmente mais amigável que outras também tradicionais, como a de bloco de concreto (95 kgCO₂/m²), em termos de energia embutida nos materiais.

Determinação do consumo energético para cada solução técnica

Com as três composições de parede definidas e com as cidades representativas de cada zona bioclimática escolhidas, calculou-se a energia necessária para resfriar e/ou aquecer o cômodo de referência para cada um dos casos.

Para realizar as análises de comportamento térmico foram feitas simulações por meio do programa computacional "TRNSYS" (TESS, 2013). Inicialmente, o cômodo de referência foi modelado utilizando-se o "TRNBuild" – módulo do programa utilizado para entrada de dados de edificações. Foram consideradas todas as características das paredes, as temperaturas mínima e máxima para ligar/desligar o sistema de aquecimento/resfriamento do ambiente e uma taxa constante de infiltração de ar do exterior de 0,5 volumes por hora. Esses dados foram então importados para o "TRNSYS" através do módulo **Type56 – Multizone Building Type**. Os dados climáticos utilizados nas simulações foram obtidos gerando-se um arquivo de formato TMY2 contendo dados para as 8.760 horas do ano, para cada uma das cidades consideradas. Esses arquivos foram gerados por meio do código computacional METEONORM (METEOTEST, 2012).

Um exemplo dos resultados obtidos nas simulações com o software TRNSYS (Temperatura do Ar Interior, Temperatura do Ar Exterior e Energia Operativa) é mostrado no gráfico da Figura [11].

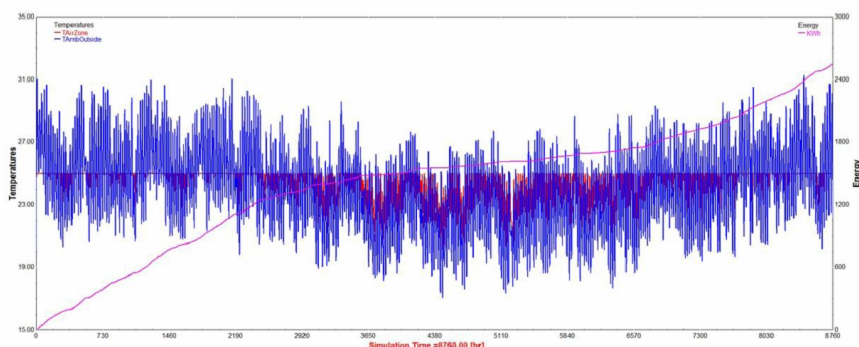


FIGURA 11 – Exemplo de resultado de simulação (TRNSYS) para um ano completo (8.760 horas).

Fonte: os autores.

Resultados e discussão

Consumo energético para cada solução técnica e localidade

Uma síntese dos resultados obtidos com as simulações pode ser observada na tabela da Figura [12], na qual se encontram, para cada zona bioclimática, os valores de consumo de energia para resfriamento e para aquecimento anual do cômodo de referência para as três composições de parede estudadas.

ZB	CIDADE	UF	REBOCO NORMAL / NORMAL		REBOCO ISOLANTE / NORMAL		REBOCO ISOLANTE / ISOLANTE	
			RESFR.	AQUEC.	RESFR.	AQUEC.	RESFR.	AQUEC.
1	São Joaquim	SC	7,4	5.129,3	0,4	4.376,1	2,5	3.951,3
2	Santa Maria	RS	2.090,7	1.888,5	1.779,4	1.591,6	1.647,0	1.442,0
3	Belo Horizonte	MG	460,0	254,3	309,2	154,1	323,1	157,6
4	Brasília	DF	628,8	102,7	406,0	45,2	434,2	53,7
5	Santos	SP	1.911,0	176,5	1.580,9	120,4	1.484,9	116,8
6	Goiânia	GO	868,0	71,1	597,8	27,6	618,8	34,5
7	Petrolina	PE	2.530,5	0,0	2.111,9	0,0	1.993,8	0,0
8	Rio de Janeiro	RJ	2.718,2	1,1	2.330,1	0,0	2.156,7	0,2

FIGURA 12 – Tabela de consumo anual de energia (kWh) para resfriamento e aquecimento do cômodo para diferentes composições de paredes, em cada uma das zonas bioclimáticas (ZB) brasileiras

Fonte: os autores.

Os mesmos resultados são apresentados nos gráficos da Figura [13] e da Figura [14]. A primeira é relacionada à energia necessária para resfriamento do ambiente, e a segunda, à energia necessária para aquecimento.

FIGURA 13 – Energia anual para resfriamento de um cômodo para diferentes composições de parede nas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras.

Fonte: os autores.

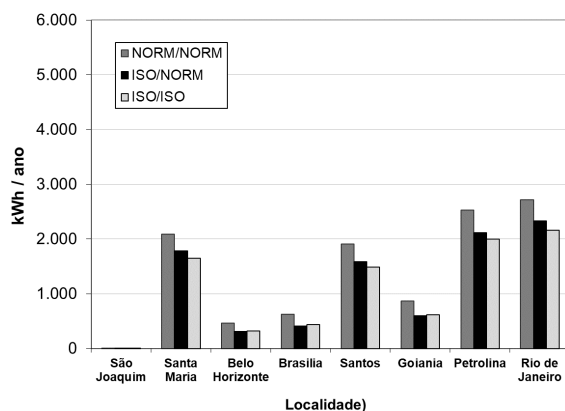
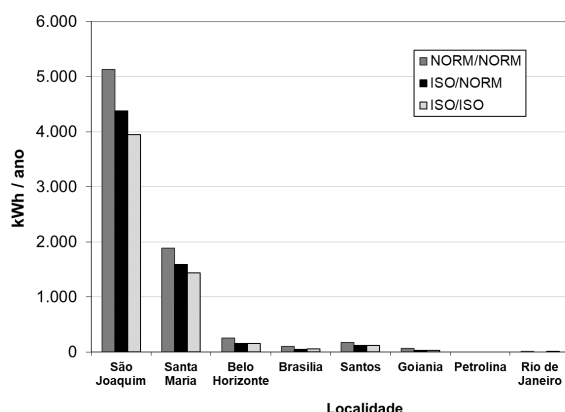


FIGURA 14 – Energia anual para aquecimento de um cômodo para diferentes composições de parede nas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras.

Fonte: os autores.



Algumas considerações podem ser feitas em relação aos diferentes tipos de consumo que as diversas zonas climáticas exigem para a manutenção das condições de conforto. A ZB 1, representada pela cidade de São Joaquim, SC, é a única em que predomina a necessidade de aquecimento. As zonas bioclimáticas 2 e 3, por sua vez, demandam um uso mais balanceado de energia, ou seja, de aquecimento no inverno e de resfriamento no verão. As cidades dessas duas zonas são Santa Maria, RS, e Belo Horizonte, MG. Entretanto, ressalta-se a diferença nos valores absolutos do consumo de energia entre as duas localidades. O clima de Santa Maria é muito mais rigoroso nas estações fria e quente, exigindo um consumo para a manutenção de temperaturas confortáveis de cinco a dez vezes maior que aquele exigido em Belo Horizonte, também nas duas estações. Finalmente, para as zonas 4, 5, 6, 7 e 8, a necessidade é basicamente de energia para resfriamento do cômodo. Esses diferentes perfis de consumo estão reunidos na tabela da Figura [15].

FIGURA 15 – Tabela das necessidades específicas de energia (resfriamento e/ou aquecimento) para cada zona climática.

Fonte: os autores.

ZONA	CIDADE	UF	NECESSIDADE DE ENERGIA
1	São Joaquim	SC	AQUECIMENTO
2	Santa Maria	RS	AQUECIMENTO + RESFRIAMENTO
3	Belo Horizonte	MG	AQUECIMENTO + RESFRIAMENTO
4	Brasília	DF	RESFRIAMENTO
5	Santos	SP	RESFRIAMENTO
6	Goiânia	GO	RESFRIAMENTO
7	Petrolina	PE	RESFRIAMENTO
8	Rio de Janeiro	RJ	RESFRIAMENTO

Comparações entre as soluções técnicas

Primeiramente, como esperado, o uso de argamassa isolante em ambos os lados da parede (revestimentos externo e interno) é a solução técnica mais eficiente. Essa solução permite importante redução no consumo de energia, tanto para resfriamento quanto aquecimento do cômodo. Entretanto, uma análise mais consistente pode ser realizada avaliando-se o desempenho das diferentes configurações de parede em relação ao tipo de consumo exigido.

Assim, em relação à parede com reboco tradicional aplicado em ambas as faces, para a ZB 1 verifica-se que a energia necessária para aquecimento do cômodo é reduzida em 14,7% com a utilização de argamassa isolante somente no exterior da parede e em 23,0% com a utilização nos dois lados.

Para as ZBs 2 e 3, cuja necessidade de energia é balanceada entre resfriamento e aquecimento ao longo do ano, a redução média no consumo total – novamente em relação a uma parede de revestimento tradicional – fica entre 25,2%, com a utilização de argamassa isolante no revestimento externo, e 27,5%, com o uso de revestimento isolante nos dois lados.

Para as zonas bioclimáticas restantes, 4 a 8, em que a necessidade de resfriamento é predominante, constata-se que a energia média necessária para baixar as temperaturas internas do cômodo para níveis de conforto é reduzida em 22,9% para a composição com argamassa de baixa condutividade no exterior e em 24,8% para a composição com o revestimento isolante em ambos os lados da parede.

A síntese dessa análise é mostrada na tabela da Figura [16].

FIGURA 16 – Tabela do potencial de redução da energia para resfriamento e/ou aquecimento para cada zona climática.

Fonte: os autores.

ZONAS	REBOCO NORMAL / NORMAL	REBOCO ISOLANTE / NORMAL	REBOCO ISOLANTE / ISOLANTE
1	Valor de referência	- 14,7%	- 23,0%
2 e 3	Valor de referência	- 25,2%	- 27,5%
4, 5, 6, 7 e 8	Valor de referência	- 22,9%	- 24,8%

Diante desses números pode-se concluir que, independentemente da zona bioclimática considerada, ou seja, da necessidade de aquecimento e/ou resfriamento do ambiente interno da edificação, o uso de argamassa isolante apresenta potencial de impacto na redução da energia a ser utilizada na manutenção das condições de conforto ao longo de um ano. As simulações indicaram que essa redução, mesmo no caso menos favorável, com argamassa isolante apenas em um dos lados da parede e em climas mais frios, foi de 1/7, no mínimo, daquela necessária considerando uma parede tradicional, com reboco comum. Para climas mais quentes, em que o uso de ar condicionado é mais frequente, a redução encontrada foi de 1/5 da normalmente necessária, nas condições do presente estudo.

Pode-se questionar o quanto a solução com argamassa isolante apenas no lado interno da parede seria menos eficiente em relação à aplicação dessa camada no lado externo. Relembrando o estudo preliminar apresentado, estima-se que o consumo de energia seria de 5 a 6% acima dos valores constantes na Figura [12]. Dessa maneira, para o conjunto de configurações de paredes estudado, com a camada isolante no lado interno os valores mínimos e máximos de redução de consumo energético obtidos ficariam entre 10% e 20%, dependendo da zona bioclimática considerada, valores ainda bastante significativos.

Limitações do estudo

Como limitações do presente estudo pode-se citar, primeiramente, que a caracterização das argamassas foi feita considerando-se apenas seu comportamento térmico, sem levar em conta que outras propriedades tecnológicas são importantes para aplicação e desempenho como trabalhabilidade, resistência mecânica, absorção de água, aderência, deformabilidade e durabilidade, que eventualmente poderiam inviabilizar a utilização de argamassa isolante para emboço de paredes, principalmente as externas. Entretanto, estudos já demonstraram que argamassas com condutividade térmica de valores similares às consideradas no presente estudo podem ser confeccionadas sem prejuízo para as propriedades citadas. Outra limitação refere-se ao custo da argamassa isolante, não considerado. De qualquer forma, a diferença do custo eventualmente mais alto da argamassa isolante pode ser facilmente amortizado ao longo de um período razoável, em função da economia de energia obtida para resfriamento e/ou aquecimento da edificação. Para se conhecer exatamente o tempo de retorno do investimento, seria preciso realizar uma avaliação abrangente do ciclo de vida do produto, o que foge do escopo desta pesquisa. Da mesma maneira, a comparação entre as diferentes composições de parede foi realizada sob o regime de infiltração de ar constante no interior da edificação, desconsiderando-se a contribuição de outros elementos da fachada, como aberturas. A presença de janelas modificaria a quantidade de ar exterior que penetra no ambiente, fazendo variar o potencial de redução de consumo de energia. Todos esses fatores representam premissas cuja influência nos resultados só pode ser verificada através de estudos similares para um edifício completo nas simulações. O cálculo de CO² ou energia embutida nas paredes é um fator a ser considerado em trabalhos futuros, que agreguem a energia operacional e a energia dos materiais, no sentido de avaliar de forma mais completa os impactos ambientais durante o ciclo de vida das edificações. Finalmente, ressalta-se que os resultados obtidos são significativos apenas para as condições climáticas específicas e práticas construtivas adotadas.

Conclusões

Envelopes de edificações apresentam desempenhos térmicos diferentes em relação à tecnologia de construção e às condições gerais do clima local. A análise realizada teve como objetivo avaliar os potenciais benefícios, quanto ao consumo de energia, do uso de argamassa de baixa condutividade térmica no revestimento de paredes externas de um cômodo teórico. Foram estudadas três configurações distintas de paredes nas oito zonas bioclimáticas brasileiras.

A adoção de argamassa de baixa condutividade ($\lambda = 0,20 \text{ W/m.K}$) para o reboco de edifícios mostrou, a partir dos cálculos de transmitância térmica de paredes "U" sugeridos na ABNT NBR 15220, que para uma composição de parede muito comum no país – com bloco cerâmico vazado – os requisitos para essa propriedade da norma ABNT NBR 15575 (desempenho de edifícios) são atendidos para todas as ZBs brasileiras, independentemente do valor de absortância " α " da superfície.

O estudo concentrou-se, então, na análise do consumo energético do cômodo teórico, formado por paredes de bloco cerâmico, em função da variação da condutividade da argamassa de reboco e do uso de aparelhos para manter o ambiente confortável em cada uma das oito ZBs brasileiras, durante um ano. Os resultados obtidos permitem afirmar que o uso do material isolante em substituição à argamassa tradicional apresenta potencial para redução na energia operativa de um prédio, considerando-se presentes sistemas de ar condicionado e de aquecimento do ar interior. Em condições de uso ideal desses equipamentos para obtenção de temperaturas de conforto (entre 18 e 25 °C), a economia no consumo de energia pode variar entre 15% e 25%, aproximadamente.

Diante desses valores de eficiência e das vantagens inerentes ao uso de argamassa isolante para a indústria da construção civil – facilidade de substituição em relação à tecnologia tradicional, custo condizente com as práticas corriqueiras, ausência de necessidade de mão de obra especializada para aplicação, entre outras – pode-se concluir que o material é uma solução adequada para se obter edifícios mais sustentáveis.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-2:2005 Versão corrigida**: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. São Paulo, 2008.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3:2005**: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-4:2021**: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. São Paulo, 2021.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-5:2021**: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. São Paulo, 2021b.

BENMANSOUR, N., AGOUDJIL, B., GHERABLI, A., KARECHE, A., BOUDENNE, A. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. **Energy and Buildings**, v. 81, p. 98–104, 2014.

BRÁS, A., GONÇALVES, F., FAUSTINO, P. Economic evaluation of the energy consumption and thermal passive performance of Portuguese dwellings. **Energy and Buildings**, v.76, p.304-315, 2014.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Ações para Promoção da Eficiência Energética nas Edificações Brasileiras: No Caminho da Transição Energética**. Nota Técnica. Brasília, 2020. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/NT%20DEA-SEE-007-2020.pdf>.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2020** – Ano base 2019: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2020b. Disponível em https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf. Acessado em 07/01/2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR; INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA-INMETRO. Portaria n.º 372, de 17 de setembro de 2010, com alterações das portarias: n.º17 de 2012 e n.º299 de 2013. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais**. Brasília, 2013.

COIMBRA, M. C. ; BLANCO, L. B. ; COELHO, L. J. C. L. ; BASTOS, Pedro K. X. . Ferramenta computacional para a estimativa da quantidade de CO² embutido em edificações. **In:**

IV Congresso Nacional de Construção de Edifícios. IV CONACED, 2019, João Pessoa - PB. Anais do IV CONACED - Congresso Nacional de Construção de Edifícios. João Pessoa - PB: Unipê, 2019. v. 1. p. 439-447.

DUTREIX, A. **Bioclimatisme et Performances Energetiques des Bâtiments.** Eyrolles, Paris, 2010.

FLORIDES, G.A., TASSOU, S.A., KALOGIROU, S.A., WROBEL, L.C. Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. **Applied Energy**, v.73, p. 299-328, 2002.

KOKSAL, F., GENCEL, O., KAYA, M. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v.88, p.175-187, 2015.

LUCON, O. et al. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Anais...** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, 2014.

METEOTEST. **METEONORM 7.0.** Bern, Switzerland, 2012.

OLIVA, J-P. COURGEY, S. **L'isolation thermique écologique** : Conception, matériaux, mise en oeuvre. Mens, Ed. Terre Vivante, 2011.

PULSELLI, R. M., SIMONCINI, E., MARCHETTINI, N. Energy and energy based cost-benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate. **Building and Environment** v. 44, n.5, p.920-928, 2009.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 15 (2011) 3617-3631.

SOZER, H. Improving energy efficiency through the design of the building envelope. **Building and Environment**, v. 45, p.2581-2593, 2010.

TESS - Thermal Energy System Specialists. **TRNSYS** - Transient System Simulation Tool. Madison, USA, 2013.

WANG, R., MEYER, C. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 975-981, 2012.

RESPONSABILIDADE INDIVIDUAL E DIREITOS AUTORAIS

A responsabilidade da correção normativa e gramatical do texto é de inteira responsabilidade do autor. As opiniões pessoais emitidas pelos autores dos artigos são de sua exclusiva responsabilidade, tendo cabido aos pareceristas julgar o mérito das temáticas abordadas. Todos os artigos possuem imagens cujos direitos de publicidade e veiculação estão sob responsabilidade de gerência do autor, salvo guardado o direito de veiculação de imagens públicas com mais de 70 anos de divulgação, isentas de reivindicação de direitos de acordo com art. 44 da Lei do Direito Autoral/1998: "O prazo de proteção aos direitos patrimoniais sobre obras audiovisuais e fotográficas será de setenta anos, a contar de 1º de janeiro do ano subsequente ao de sua divulgação".

O CADERNOS PROARQ (ISSN 2675-0392) é um periódico científico sem fins lucrativos que tem o objetivo de contribuir com a construção do conhecimento nas áreas de Arquitetura e Urbanismo e afins, constituindo-se uma fonte de pesquisa acadêmica. Por não serem vendidos e permanecerem disponíveis de forma *online* a todos os pesquisadores interessados, os artigos devem ser sempre referenciados adequadamente, de modo a não infringir com a Lei de Direitos Autorais.

Submetido em 14/01/2021

Aprovado em 05/07/2021