



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Vítor Freitas Mendes

**NOVO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO ISOLAMENTO
TÉRMICO DO FECHAMENTO DE EDIFICAÇÕES: ANÁLISE
DE SENSIBILIDADE DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS
DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Ouro Preto

2021

Novo método de avaliação do isolamento térmico do fechamento de edificações:
análise de sensibilidade das propriedades termofísicas de argamassas de
revestimento

Vítor Freitas Mendes

Monografia de conclusão de curso para
obtenção do grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto
defendida e aprovada em 19 de novembro
de 2021 como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção

Orientadora: Prof^a. Júlia Castro Mendes, D.Sc. - UFOP

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M538n Mendes, Vítor Freitas .

Novo método de avaliação do isolamento térmico do fechamento de edificações [manuscrito]: análise de sensibilidade das propriedades termofísicas de argamassas de revestimento. / Vítor Freitas Mendes. - 2021.

65 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Júlia Castro Mendes.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Isolamento térmico. 2. Argamassa - Revestimentos. 3. Condutividade térmica. I. Mendes, Júlia Castro. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

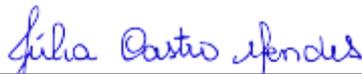
CDU 624.14

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716

Novo método de avaliação do isolamento térmico do fechamento de edificações:
análise de sensibilidade das propriedades termofísicas de argamassas de
revestimento

Vítor Freitas Mendes

Monografia de conclusão de curso para
obtenção do grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto
defendida e aprovada em 19 de novembro
de 2021 como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:



Orientadora: Prof^a. Júlia Castro Mendes, D.Sc. – UFOP



Membro: Prof^a. Rovadavia Alina de Jesus Ribas, D.Sc. – UFOP



Membro: Prof. Adriano Pinto Gomes, D.Sc. – IFMG-Ouro Preto

*Dedico este trabalho àqueles que daqui a pouco
ligarão o ar-condicionado, porque já estão com
calor, mas ainda é cedo para ligar (\$).*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus. Também agradeço aos meus pais, Marlene e José Geraldo, pelo apoio, pois sem eles tudo ficara imensamente mais difícil de se concretizar. Ao IFMG por me apresentar a Engenharia Civil. Ao PET Civil por me proporcionar inúmeras e exclusivas oportunidades. Aos amigos que deixei no ap04, por me ajudar nos momentos de pressão da UFOP. Aos meus avós, por abrirem a porta da sua casa, durante a reta final da graduação. Aos meus velhos amigos e aos que conquistei durante a formação, por todos os momentos de desestresse que já vivemos. Aos parceiros de equipe Welington, Rodrigo e Lucas, pelo suporte durante os perrengues da pesquisa. À minha orientadora Júlia, pela ajuda e disposição infinitas. À DRI, por ter me proporcionado a experiência de intercâmbio. À UMinho, por me apresentar a área que me fascina. Aos professores que já passaram por minha vida e me proporcionaram ser quem sou. À Fundação Gorceix, por me possibilitar experiências incríveis dando aulas. Ao grupo Civil Nota 5, por me fazer melhor ao tentar, e conseguir, melhorar o curso de Engenharia Civil da UFOP.

A todos que eu não tenha citado aqui, mas que eu guardo com muito carinho no coração, porque, apesar disso, precisam saber que são portadores da minha mais sincera gratidão.

O presente trabalho é derivado dos projetos de Iniciação Científica intitulados “Argamassas sustentáveis baseadas em resíduos – Análise de sensibilidade” e “Análise de sensibilidade das propriedades térmicas da argamassa de revestimento no desempenho térmico de edificações”, os quais geraram as duas publicações que constam no Apêndice deste trabalho, tendo uma recebido Menção Honrosa. Agradeço ao CNPq, à PROPPI – UFOP, à Escola de Minas, à própria Universidade Federal de Ouro Preto, ao CIDENG e ao caro Rafael, pela ajuda com o XGBoost.

Muito obrigado! :)



VITOR REIAS MENDES.

RESUMO

A argamassa de revestimento é um material presente na maioria das envoltórias de alvenaria, contribuindo para a durabilidade e a estética dos edifícios. Algumas pesquisas apontam o melhoramento das propriedades termofísicas das argamassas, refletindo no aumento do desempenho térmico total da edificação. Contudo, poucos estudos verificam esses efeitos sistemática e quantitativamente. Assim, o presente trabalho mostra a criação do Método das Diferenças Acumulas de Temperatura (MDAT), que verifica o quanto os materiais de construção deixam a temperatura interna independente da externa. Como aplicação, é feita uma análise de sensibilidade da influência das propriedades térmicas das argamassas de revestimento no desempenho térmico total de uma edificação. Foram feitas simulações energéticas no software EnergyPlus, considerando as 8 zonas bioclimáticas do Brasil e uma habitação de interesse social, além de usar, na argamassa, 4 variações de condutividade térmica (em função da massa específica), 6 de calor específico e 5 de espessura; totalizando 120 combinações de argamassa. Ao final, para investigar o grau de influência de cada propriedade no desempenho térmico, fez-se uso de uma técnica de aprendizado de máquina, XGBoost. Verificou-se que o MDAT é eficaz nas regiões, em geral. As melhores argamassas foram, em geral, as que tiveram todas as suas propriedades maximizadas. Também se verificou o inverso. Isso mostra que a condutividade térmica reduzida juntamente com a massa específica nas argamassas estudadas não é vantajosa para o isolamento térmico da residência. Ademais, foi vista a pouca participação da condutividade na variação de desempenho térmico da edificação. Já a espessura e o calor específico foram preponderantes, pois aumentaram a capacidade térmica da envoltória. A variação das propriedades sucedeu em até 2148°C de efetividade, sendo em Cuiabá (Z7). 1887°C, considerando o valor médio entre as regiões. Também se notou grande influência da climatologia na efetividade térmica da argamassa. Conclui-se que potencializar as propriedades termofísicas das argamassas é uma estratégia passiva promissora para o melhoramento do desempenho térmico da edificação.

Palavras-chaves: Análise de sensibilidade, Isolamento térmico, Argamassa de revestimento, Condutividade térmica, Calor específico, Massa específica.

ABSTRACT

The coating mortar is a material present in most masonry envelopes, contributing to the durability and aesthetics of the buildings. Some researches point to the improvement of the thermal properties of the mortars, reflecting in the increase of the total thermal performance of the building. However, few studies verify these effects systematically and quantitatively. Thus, the present work shows the creation of the Accumulated Temperature Difference Method (ATDM). It verifies how much the construction materials let the internal temperature independent of the external one. As application, it was done a sensitivity analysis of the influence of the thermophysical properties of the coating mortars on the total thermal performance of a building. Energy simulations were made in the EnergyPlus software, considering the 8 Brazilians bioclimatic zones and a low-income dwelling, besides using, in the mortar, 4 variations of thermal conductivity (according to the specific mass), 6 of specific heat and 5 of thickness; totalling 120 combinations of mortar. Finally, to investigate the degree of influence of each property on thermal performance, it was used a machine learning technique, XGBoost. Results show that the ATDM is effective in the regions, in general. The best mortars were, in general, those that had all their properties maximized. The inverse was also verified. This shows that the reduced thermal conductivity together with the specific gravity in the mortars studied is not advantageous for the thermal isolation of the residence. Moreover, it was seen the little participation of the conductivity in the variation of the thermal performance of the building. The thickness and the specific heat were preponderant because they increased the thermal capacity of the envelope. The variation of the properties succeeds up to 2148°C of effectiveness, belonging to Cuiabá (Z7). 1887°C, considering the average value between the zones. There was also a great influence of climatology on the thermal effectiveness of mortar. The author concludes that potentiating the thermophysical properties of mortars is a promising passive strategy for increasing the thermal performance of the building.

Keywords: Sensitivity analysis, Thermal isolation, Coating mortar, Thermal conductivity, Specific heat, Specific gravity.

SUMÁRIO

Agradecimentos	V
Resumo	I
Abstract.....	II
Sumário	III
1 Introdução	5
1.1 Motivação	5
1.2 Objetivo	7
1.2.1 Objetivo geral	7
1.2.2 Objetivos específicos	8
2 Revisão bibliográfica	9
2.1 Desempenho térmico da edificação, conforto térmico e eficiência energética	9
2.2 Simulação energética de edificações	10
2.3 Determinação do desempenho térmico	12
2.3.1 Método da Carga Térmica.....	12
2.3.2 Método dos Dias Típicos.....	13
2.3.3 Método Graus-Horas.....	14
2.4 Bioclimatologia brasileira	16
2.5 Estratégias de controle climático	17
2.6 Sistema de fechamento vertical externo.....	19
2.6.1 Propriedades termofísicas dos materiais constituintes	20
2.6.2 Potencial de melhoramento das propriedades termofísicas dos materiais de construção.....	22

3	Metodologia.....	24
3.1	Panorama geral	24
3.2	Argamassas de revestimento	24
3.3	Edificação simulada.....	27
3.4	Tratamento dos resultados das simulações	31
3.4.1	Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT).....	31
3.4.2	<i>Extreme Gradient Boosting - XGBoost</i>	32
4	Resultados	34
4.1	Influência das propriedades termofísicas	34
4.2	Melhor e pior argamassas	38
4.3	Caso de Manaus.....	40
4.4	Efetividade das argamassas.....	42
4.5	Grau de importância das propriedades termofísicas das argamassas ..	44
5	Conclusão	47
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	49
	Referências.....	50
	Apêndice A – Publicações correlatas ao tema.....	57
A.1	Novo método de análise da contribuição das propriedades térmicas de materiais de construção no desempenho térmico total	57
A.2	Desempenho térmico de argamassas produzidas com resíduos da mineração e siderurgia.....	57
A.3	Menção Honrosa referente ao trabalho “Desempenho térmico de argamassas produzidas com resíduos da mineração e siderurgia”	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

No setor da construção civil, a eficiência energética corrobora para a redução do consumo de energia e, ao mesmo tempo, deriva de uma manutenção ou melhoria do desempenho térmico das edificações. Nesse sentido, reduzir ou eliminar os sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (em inglês, *heating, ventilation, and air-conditioning* ou HVAC) é uma estratégia promissora para melhorar a eficiência energética. Segundo Ferreira, et al. (2012), geralmente, metade do consumo energético das edificações é destinada para o condicionamento térmico do ambiente interno. Outros pesquisadores afirmam que o sistema HVAC pode consumir até 40% da energia total de uma edificação comercial (JINDAL, KUMAR e RODRIGUES, 2018; CHO, KIM, et al., 2018).

Vários autores destacam o potencial do sistema de fechamento externo (as envoltórias) na contribuição da eficiência energética de edificações. Dessa forma, as propriedades termofísicas dos materiais integrantes das envoltórias têm significativa influência na independência climática do ambiente interno em relação ao externo. Nesse cenário, o uso de argamassa de revestimento com propriedades termofísicas melhoradas é vantajoso, uma vez que requer quase nenhuma manutenção durante o seu ciclo de vida, o qual é geralmente maior do que o dos sistemas HVAC. Ainda, essa prática não demanda gasto de eletricidade e o desempenho das argamassas também não é influenciado pelo comportamento do usuário (FRANCO, MENDES, et al., 2019; MENDES, PINTO, et al., 2019). A utilização de materiais como esse é um tipo de estratégia passiva de controle climático, uma vez que não se faz consumo da energia para aclimação do ambiente interno, i.e., estratégia ativa.

Nesse sentido, Mendes, et al. (2020), por exemplo, observaram que o aumento do calor específico e a redução da condutividade térmica de argamassas produzidas com resíduos de indústria ou mineração levam a um melhor desempenho térmico total da edificação. Por sua vez, Li, et al. (2013) verificaram que materiais com mudança de fase (*Phase Change Materials* ou PCM) incorporados à argamassa resultam em um coeficiente de armazenamento de calor 1,74 vezes superior à argamassa produzida

com cimento convencional. Já Onésippe, et al. (2010) observaram que, ao adicionar fibra de bagaço vegetal em matrizes cimentícias, obtém-se uma redução na condutividade térmica e no calor específico. Além disso, Benmansour, et al. (2014) constataram que argamassas incrementadas com fibra de palmeira garantem menor condutividade térmica e massa reduzida. Em geral, esses e outros estudos avaliam principalmente o impacto que diferentes adições de materiais causam nas propriedades termofísicas de argamassas, mas não analisam se essas alterações contribuem de forma efetiva para a diferença de temperatura entre o ambiente interno e o externo da edificação.

Os únicos estudos encontrados pelo autor que faz esse tipo de análise foram o de Franco, et al. (2019) e Barreto, et al. (2021). No estudo de Franco, et al. (2019), os autores fizeram uma simulação energética de uma edificação de alvenaria estrutural, na qual todos os agregados da envoltória foram substituídos por escória de aciaria. Os autores observaram que a incorporação desses resíduos levou a uma queda na condutividade térmica (até 76%) e a um aumento na densidade (até 26%) do bloco, do concreto e da argamassa, em comparação com os mesmos materiais fabricados com agregados naturais. A simulação energética em um dia típico de verão mostrou que os picos de temperatura no modelo com agregados de escória eram apenas 1°C inferior aos valores obtidos no modelo com materiais convencionais. Todavia, os autores apenas tinham o propósito de realizar a análise em um estudo de caso isolado e, além disso, não fizeram uma avaliação anual do impacto dessa prática. Assim, as conclusões do artigo ficaram limitadas à edificação, materiais de construção e cidade analisados.

A influência da região em que a edificação se situa é tamanha a ponto de não poder ser desconsiderada (MENGJIE, FUXIN, *et al.*, 2018; HOU, LIU, *et al.*, 2017). Em um país com dimensões continentais como o Brasil, o qual compreende oito zonas bioclimáticas, com especificidades climatológicas distintas, não são todos os materiais de construção que irão adequar-se em todas as regiões. Além disso, Chvatal (2014) e outros autores apoiam que a simulação considerando o ano todo é mais representativa, pois, assim, considera-se a influência combinada das propriedades termofísicas da envoltória em situações mais realistas.

Pensando nessa crítica, Barreto, et al. (2021) utilizaram um método de análise diferente. Os autores optaram por fazer uso do Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT) para avaliar o desempenho térmico proporcionado por argamassas de revestimento produzidas com resíduos de mineração e siderurgia nas paredes de uma edificação. Essa análise leva em consideração as características bioclimáticas da região da edificação durante o ano todo. Além disso, os autores fizeram uma análise do desempenho térmico em oito localidades brasileiras. Dessa forma, diferentemente de analisar apenas uma região e somente os dias típicos, a avaliação térmica do material ganha mais fundamentação. Contudo, tanto Barreto, et al. (2021) quanto Franco, et al. (2019) estudaram matrizes cimentícias com agregados reciclados da mineração e da siderurgia, ou seja, materiais não convencionais.

Além das pesquisas científicas, nos últimos dez anos, inúmeras companhias têm lançado no mercado as “argamassas isolantes térmicas”, firmando o compromisso de melhoria na temperatura do ambiente interno (GRXSP, 2021; VIMARK, 2021; VIMARK, 2021). Todavia, difícil é encontrar na literatura discussões, de forma científica e compreensiva, sobre o real impacto das argamassas de revestimento no desempenho térmico global das edificações. Diante de tudo isso, o autor do presente trabalho observou a oportunidade de realizar uma análise de sensibilidade da influência das propriedades termofísicas das argamassas de revestimento, produzidas com agregados convencionais, no desempenho térmico global das edificações.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é construir um método de análise de capacidade de isolamento térmico da edificação a partir das propriedades termofísicas dos materiais de construção das envoltórias. Tal método recebeu o nome de Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT). Para sua aplicação, faz-se uma análise de sensibilidade das propriedades termofísicas de argamassas de

revestimento (calor específico, massa específica, condutividade térmica e espessura) no isolamento térmico de uma edificação de interesse social.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, elencam-se:

- Determinar quais são os valores das propriedades térmicas que conferem à argamassa maior potencial de melhoria do desempenho térmico total de uma edificação;
- Entender como essa importância varia em função da região em que a edificação está situada;
- Avaliar a efetividade do Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT) para esse tipo de investigação;

Com esses resultados, o autor busca contribuir para o desenvolvimento dos aspectos científico-tecnológico, acadêmico, econômico, social e ambiental da construção civil brasileira. Espera-se, também, auxiliar nos cenários da normatização técnica nacional e internacional, do desenvolvimento de materiais e produtos, do desempenho térmico de edificações e da ciência de dados voltada à construção civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desempenho térmico da edificação, conforto térmico e eficiência energética

Joseph, et al. (2015) definem o desempenho térmico de uma edificação como sendo o processo de modelagem da transferência de energia entre o ambiente construído e os seus arredores. Em outras palavras, o desempenho térmico trata-se da capacidade da edificação em dar resposta ao clima externo por meio das condições climáticas internas. Em linhas gerais, uma edificação com bom desempenho térmico garantirá a independência climática do interior, ao se comparar com o exterior.

Além disso, é sabido que as condições do interior da edificação são influentes na saúde, bem-estar e produtividade dos ocupantes. A preocupação com as condições térmicas do interior das edificações se intensifica mais ao saber que dados de 2001 já apontavam que as pessoas passam 90% do dia dentro de edifícios (KLEPEIS, NELSON, *et al.*, 2001). Situação essa que até os dias atuais não sofreu incentivos para mudança. Pelo contrário, a situação pandêmica de Covid-19, que se iniciou no ano de 2019, obrigou muitos países a promoverem o isolamento físico das pessoas, fazendo-as saírem de casa somente para questões essenciais (JORNAL NACIONAL, 2020). E, com a recuperação vagarosa da normalidade, pesquisas têm convergido com a afirmação de que o trabalho remoto irá perpetuar (SENA, 2020).

Posto isso, surge a necessidade de entender o que significa conforto térmico. De acordo a norma ASHRAE (2017), trata-se de um estado de espírito do ocupante em que ele encontra satisfação com o ambiente que o envolve. Contudo, como qualquer outra noção de conforto, há muitos fatores subjetivos entrelaçados a esse termo. Piedade, et al. (2003) comentaram sobre os fatores de caráter social, cultural e psicológico. Condições do ocupante, roupa, metabolismo, estado emocional, atividade e saúde desempenham um papel importante na percepção que o indivíduo possui sobre o seu conforto térmico (SANTOS e ANDRADE, 2008).

Dessa forma, o conforto térmico dos habitantes, conciliado com um consumo de energia menor possível, proporciona uma eficiência energética para a edificação. Em sua totalidade, a eficiência energética das edificações compreende as otimizações

das formas do edifício e das ambiências em geral, bem como a adoção de soluções econômicas e racionais, além de considerar o conforto visual, acústico e térmico (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Por isso, é inegável que a eficiência energética da edificação perpassa, de forma fundamental, o desempenho térmico da mesma.

2.2 Simulação energética de edificações

O desempenho térmico das edificações é obtido a partir de estudos prévios à construção ou reforma. Através de simulações computacionais, é possível investigar estratégias que possam otimizar a eficiência energética dos edifícios. Krstić-Furundžić, et al. (2019), por exemplo, verificaram por meio de simulações energéticas que sombrear a fachada sul de um edifício comercial, na Alemanha, garante uma redução de 18% no consumo energético. Já Zhu Xinrong, et al. (2014) utilizaram da simulação energética para comprovar que os novos padrões de moradia Yaodong garantem melhor desempenho térmico do que os antigos padrões construtivos e, até mesmo, a construção com tijolos. Os autores verificaram que o consumo de energia para o aquecimento da moradia correspondia a 23% da energia consumida pela residência com a técnica construtiva convencional de tijolos, e a 39% da energia consumida pela residência com a antiga técnica Yaodong. Por sua vez, Salem, et al. (2019), durante simulações energéticas, verificaram o potencial de impacto das medidas do *retrofit* de um hotel no Reino Unido e constataram que é possível atingir altos níveis de eficiência energética, a depender das estratégias selecionadas. Os autores verificaram que, por exemplo, apenas a utilização de um certo tipo de caldeira automática a gás contribuía para uma redução de 27,4% no consumo de energia anual.

Em geral, as simulações energéticas têm por objetivo auxiliar a tomada de decisão das melhores estratégias de aumento do desempenho térmico e da eficiência energética da edificação ao proporcionar previsões sobre o consumo total de energia, temperaturas internas, custo (financeiro) com energia (como a elétrica, a base de fóssil e de biomassa), dimensionamento do sistema de HVAC e da iluminação demandada, emissão de dióxido de carbono (CO₂), entre outras. Por isso, para se

obter dados mais representativos, é interessante executar a simulação para um ano de projeto inteiro (CHVATAL, 2014). Os dados do ano de projeto são comumente apresentados por meio de arquivos climáticos. A segunda emenda de 2021 da norma brasileira NBR 15575 (2013) dispõe acesso a um repositório de arquivos climáticos de várias cidades do Brasil, possuindo dados horários de todo um ano meteorológico de referência.

Para realização das simulações energéticas, além de vários outros, encontra-se disponível e com amplo uso na comunidade científica o *software* o EnergyPlus. Ele foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Tal *software* possui alta credibilidade, mostrando ser o programa de simulação energética mais eficiente usado por uma variedade de outros *softwares* combinados (CRAWLEY, HAND, *et al.*, 2008). Baseado no detalhamento construtivo associado aos sistemas mecânicos e suas predefinições, além dos dados bioclimáticos da localização estudada, o EnergyPlus é capaz de calcular a carga térmica de um edifício, temperaturas interna e externa, custos com energia, emissões de CO₂, entre outros.

Dessa forma, a fim de regular essas análises energéticas, diversas normas tocam no assunto de desempenho térmico da edificação aprofundando nos procedimentos para as simulações energéticas. A norma brasileira NBR 15575 (2013), com emenda de setembro de 2021, padroniza, por exemplo, os dados como horário de permanência dos ocupantes, quantidade de pessoas, características da iluminação artificial e equipamentos elétricos, além de estabelecer um modelo de referência para a avaliação do desempenho térmico, o qual é classificado em três níveis (mínimo, intermediário e superior). Além disso, a norma preconiza a simulação com e sem ventilação natural, para as duas últimas classificações (ABNT, 2013). Para a classificação mínima, por meio de simulações energéticas, apenas é necessária a verificação com o uso da ventilação natural (ABNT, 2013). Todavia, a norma NBR 15575 (2013) não aponta, de forma clara e fora dessas três categorias de classificação, métodos de verificação do potencial de melhoria no desempenho térmico total da edificação através de variações das propriedades termofísicas dos materiais de construção.

2.3 Determinação do desempenho térmico

2.3.1 Método da Carga Térmica

De modo geral, as pesquisas e as normas atuais que centram na análise de desempenho térmico da edificação podem ser divididas em algumas poucas categorias de metodologias. Hoje em dia, grande volume de pesquisas foca à análise de desempenho térmico da edificação com base na carga térmica (em inglês *thermal load*), que deve ser adicionada ou retirada do ambiente para manter o espaço em uma temperatura operativa pré-definida (BATAINEH e ALRABEE, 2018; CARPIO, GARCÍA-MARAVÉ, *et al.*, 2015; RANA, HASAN, *et al.*; ZHU, LIU, *et al.*, 2014; THIERS e PEUPORTIER, 2012; BADIEI, ALLINSON e LOMAS, 2019; FAJILLA, DE SIMONE, *et al.*, 2020; MELO, CÓSTOLA e HENSEN, 2012; PANG, XU, *et al.*, 2018; SALEM, BAHADORI-JAHROMI, *et al.*, 2019). Esse também é o procedimento de avaliação do desempenho térmico das edificações recomendado pela norma NBR 15575, por meio de simulação computacional (ABNT, 2013).

Esse método é uma forma simples de analisar o desempenho energético: quanto menor a demanda de carga térmica para manter a temperatura interna numa faixa pré-definida, melhor é o desempenho térmico daquela edificação e, principalmente, maior é a eficiência energética do edifício. Também é possível converter a demanda de carga térmica, normalmente fornecida em kWh, a custos de energia conforme as tarifas praticadas pelas concessionárias locais. A Figura 1 apresenta um exemplo de análise com esse método.

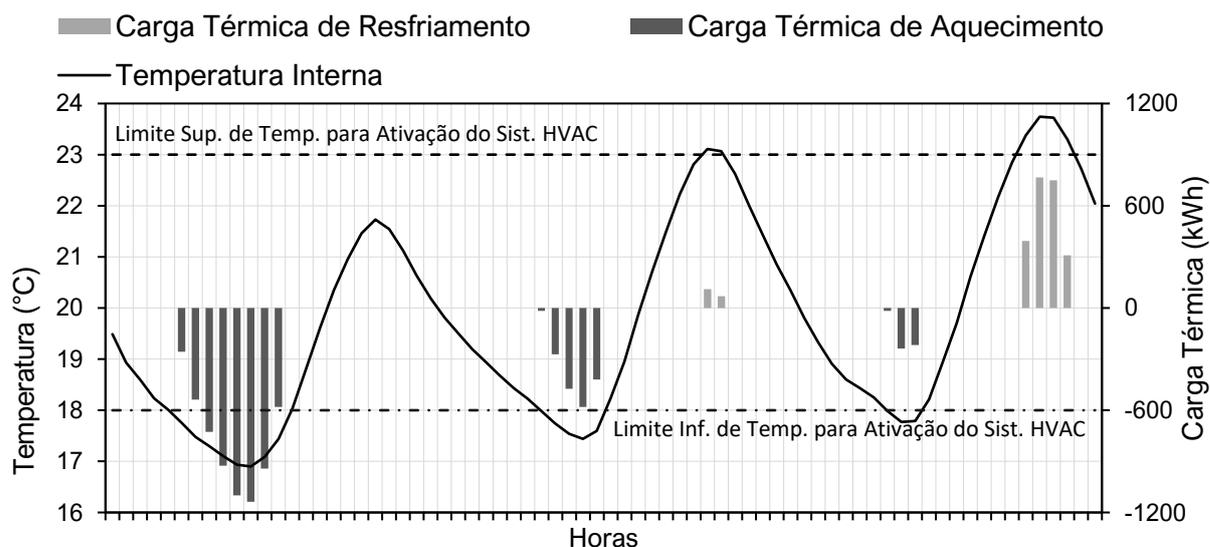


Figura 1 - Exemplo de análise do Método da Carga Térmica, sendo que as colunas cinzas mostram a demanda de energia, em kWh, para aquecimento ou resfriamento do ambiente, quando a temperatura interna ultrapassa os limites estipulados para ativação do sistema HVAC.

Comumente, essa análise é feita durante todo o ano de referência (ABNT, 2013; RANA, HASAN, *et al.*; BADIEI, ALLINSON e LOMAS, 2019; MELO, CÓSTOLA e HENSEN, 2012). Entretanto, a análise de carga térmica vincula a utilização de um sistema de aclimação mecânico (estratégia ativa), cujos parâmetros de eficiência são conhecidos (ou opta-se por utilizar um sistema ideal durante as simulações). Além disso, a predefinição de uma temperatura operativa (ASHRAE, 2017) se relaciona intensamente à subjetividade do conforto térmico de cada usuário. A própria ASHRAE 55 (2013) explica que as faixas de temperatura definidas para o acionamento do sistema HVAC possuem base em pesquisas empíricas que buscam estabelecer o conforto térmico de 80% dos ocupantes.

2.3.2 Método dos Dias Típicos

Apesar da análise energética ser mais representativa considerando todo o ano de projeto (CHVATAL, 2014), há pesquisadores que focam na análise dos dias típicos

(em inglês *design days*) (GIJÓN-RIVERA, ÁLVAREZ, *et al.*, 2011; KALANI, DAHANAYAKE e CHOW, 2016; FRANCO, MENDES, *et al.*, 2019). Normalmente, a análise de desempenho térmico, fazendo uso dos dias típicos, foca na temperatura obtida no interior da edificação para um dia modelo de verão e um dia modelo de inverno, cujas temperaturas de pico e amplitude térmica são obtidas através de cálculos estatísticos dos últimos anos daquela região (HONG, CHOU e BONG, 1999). Tal metodologia já foi recomendada pela norma ABNT 15575 (2013), contudo, desde sua primeira emenda de 2021, foi eliminada essa possibilidade. Apesar desses fatos, a agilidade na obtenção de resultados através dos dias típicos é inegável, uma vez que a simulação compreende poucos dias. A Figura 2 ilustra uma análise com esse método.

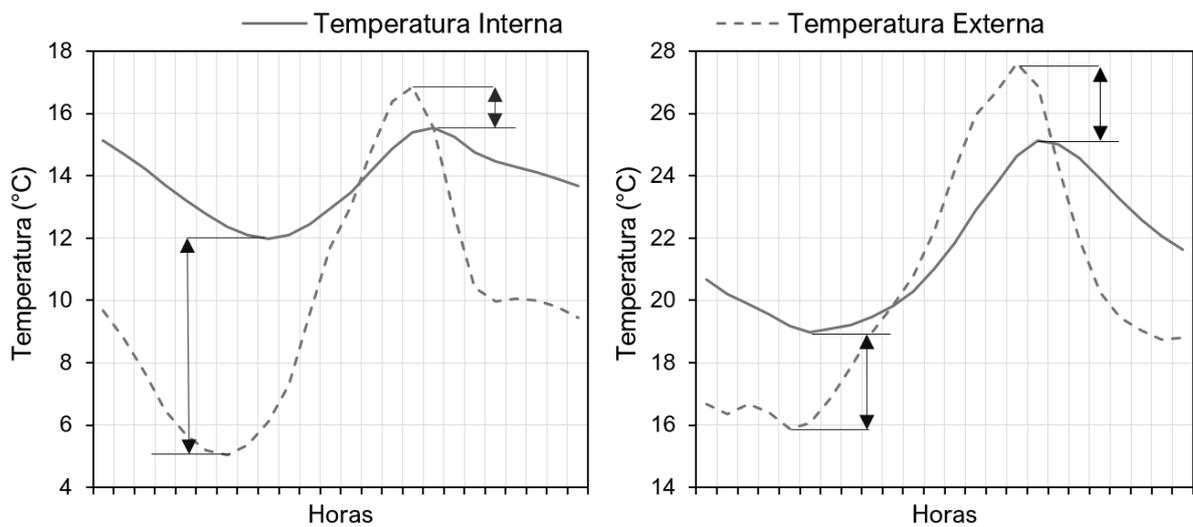


Figura 2 - Exemplo de análise do Método dos Dias Típicos, sendo, à esquerda um dia típico de inverno e, à direita, de verão. As setas indicam as diferenças nos picos de temperatura (máxima e mínima) do ambiente interno com o externo.

2.3.3 Método Graus-Horas

A metodologia graus-horas ou graus-dias (em inglês *degree-hours* ou *degree-days*) também faz a análise considerando a temperatura do ambiente interno.

Contudo, geralmente, a simulação considera todo o ano de referência, fazendo uma comparação da temperatura interna com a externa. A comparação é feita somando-se os graus de diferença entre a temperatura do interior e do exterior da edificação a cada hora (ou a cada dia), mas somente quando a temperatura interna ultrapassa uma faixa pré-definida de conforto térmico, como os regulados pela norma estadunidense ASHRAE 55 (2017). Triana, et al. (2018), por exemplo, utilizaram esse método para avaliar se devem ser consideradas as futuras mudanças climáticas na análise de eficiência energética de edificações de interesse social no Brasil. Segundo os autores, sim. A Figura 3 apresenta um exemplo de análise com esse método.

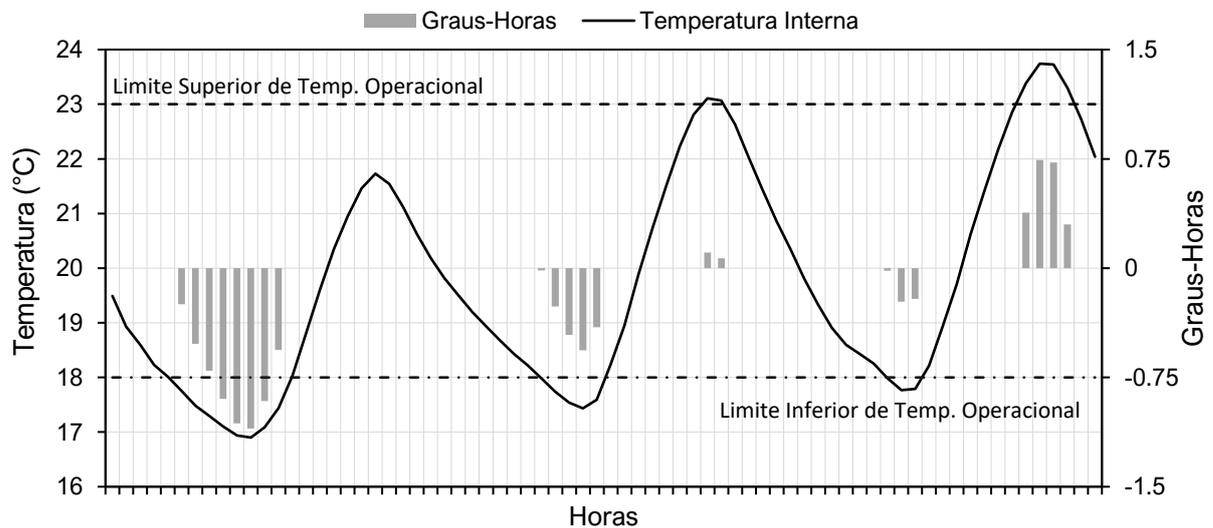


Figura 3 – Exemplo de análise do Método Graus-Horas (ou Graus-Dias), sendo que as colunas cinzas mostram a quantidade (positiva ou negativa), em graus-horas, de quanto que a temperatura interna ultrapassou os limites de temperatura operacional, relacionados ao conforto térmico.

Como pode ser observado, a principal limitação desse método reside no fato de que ele somente “captura” os resultados que extrapolam esses limites pré-definidos. Dessa forma, mudanças relativamente menores de temperatura, que podem contribuir para um melhor conforto dos ocupantes, mas que não ultrapassam os limites pré-

definidos, não são verificadas. Adicionalmente, da mesma forma que o método da carga térmica, a faixa de temperatura operacional é baseada em testes empíricos para uma população geral (DE DEAR, 2011), o que pode não atender a todos os tipos de ocupantes ou regiões.

A fim de resolver as limitações da subjetividade do conforto térmico, da sensibilidade da avaliação e do atrelamento de um sistema HVAC na análise de desempenho térmico, a equipe de pesquisa do presente autor desenvolveu o Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT). Tal metodologia foi utilizada neste trabalho e será melhor detalha na seção 3.4.1.

2.4 Bioclimatologia brasileira

Não se pode negligenciar a influência do clima da região na avaliação do desempenho térmico (MENGJIE, FUXIN, *et al.*, 2018; HOU, LIU, *et al.*, 2017). Em um país continental, tal como o Brasil, existem diversas zonas bioclimáticas, com várias especificidades em cada uma delas. Além disso, o clima é uma das condicionantes mais influentes na avaliação de desempenho térmico da edificação, podendo fazer com que determinadas estratégias se tornem inviáveis (ABNT, 2013). Por isso, a norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005) divide o território do Brasil em 8 zonas bioclimáticas. Cada uma dessas zonas agrupa uma quantidade de cidades em que as exigências climáticas se assemelham (LAMBERTS, 2010).

Apesar disso, a segunda emenda de 2021 da norma brasileira NBR 15575 (2013) acentua a importância da análise energética considerando o arquivo climático da localidade onde a edificação se encontra, sendo passível, quando não houver essa opção, adotar um arquivo climático de uma cidade com clima semelhante e próxima da localidade em questão (considerando a altitude, a longitude e a latitude) (ABNT, 2013). De certa forma, a emenda de 2021 da NBR 15575 (2013) corrige a noção de que seria possível simular e obter dados representativos de uma edificação considerando apenas a zona bioclimática e não a localidade em específico.

Entretanto, é inegável que as zonas bioclimáticas identificadas pela norma brasileira mostram, de macro modo, a variedade bioclimática existente no país e sua

influência no desempenho térmico de edificações. Além disso, diversos requisitos das normas NBR 15575 (2013), incluindo a segunda emenda de 2021, e da NBR 15220 (2005) ainda necessitam do zoneamento bioclimático brasileiro em vigência, principalmente para os assuntos que não envolvem simulações energéticas.

2.5 Estratégias de controle climático

O desempenho térmico das edificações pode ser controlado por estratégias que são definidas em passivas, ativas e híbridas (LAMBERTS, 2010). As estratégias ativas para o melhoramento do desempenho térmico são aquelas que demandam um uso frequente de energia. O implemento de equipamentos de sistema HVAC são as principais técnicas ativas adotadas nas edificações, como ares-condicionados, ventiladores e aquecedores.

Inversamente, as estratégias passivas são aquelas que não demandam energia para o seu funcionamento. Como exemplo, pode-se citar as superfícies refletivas nas envoltórias, as orientações e volumetrias das edificações, os sombreamentos de fachadas, as ventilações naturais, os resfriamentos evapotranspirativos, entre outros. A Figura 4 e a Figura 5 apresentam um panorama de algumas dessas estratégias passivas para o aquecimento e o resfriamento do ambiente, adotadas ao redor do planeta, que foram citadas por Lamberts, et al. (2014).

Como o próprio nome diz, as estratégias híbridas utilizam o benefício das estratégias passivas, mas, por não serem suficientes, também empregam estratégias ativas. Ou seja, a estratégia híbrida é uma mistura de elementos passivos e ativos como solução para a eficiência da edificação.

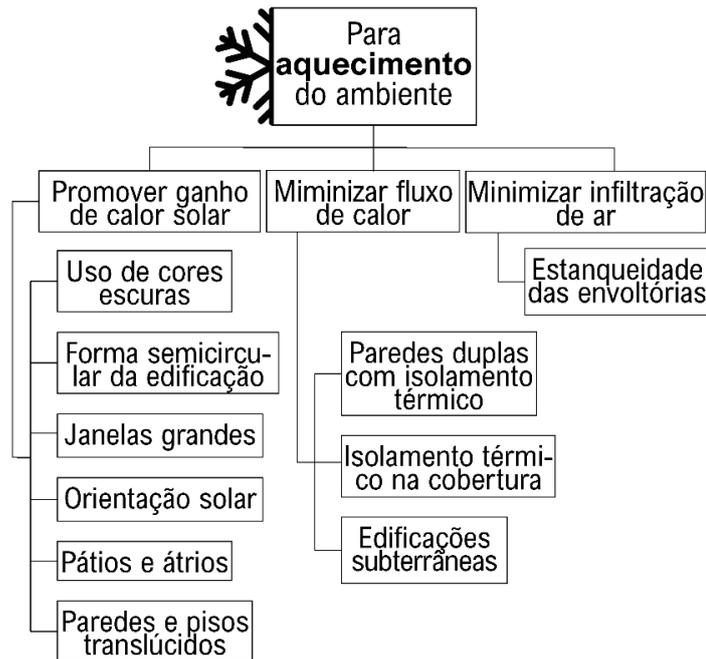


Figura 4 - Panorama de algumas estratégias passivas de controle climático para o aquecimento do ambiente interno citadas por Lamberts, et al. (2014).

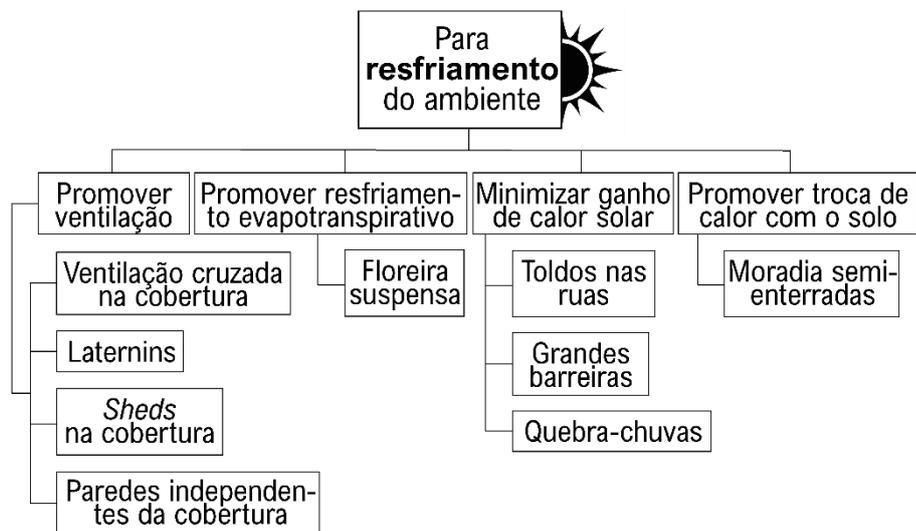


Figura 5 – Panorama de algumas estratégias passivas de controle climático para o resfriamento do ambiente interno citadas por Lamberts, et al. (2014).

2.6 Sistema de fechamento vertical externo

Comumente chamada de envoltória vertical, o sistema de fechamento vertical externo é composto por superfícies opacas e translúcidas. Em relação às translúcidas, elas resumem-se principalmente aos envidraçados da edificação, podendo ser janelas, portas ou puramente um fechamento em vidro. Normalmente, os envidraçados brasileiros são de padrão comum, ou seja, com nenhum ou mínimo tratamento termoacústico no material. Essas superfícies têm uma grande contribuição para o aquecimento (ou superaquecimento) da edificação, devido à transferência de calor por meio da condução, convecção e, principalmente, radiação (PAULA, FREITAS e DA SILVEIRA, 2019).

Essa situação é amenizada nas superfícies opacas, já que elas impedem a transmissão direta de calor por radiação e, geralmente, transmitem menos calor para o interior (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Tratando-se de envoltórias verticais, as superfícies opacas correspondem, majoritariamente, às paredes externas da edificação. Elas, no Brasil, em geral, são de alvenaria coberta com argamassa de revestimento (o reboco). A Figura 6 apresenta o fluxo de calor originário da radiação solar incidente nos elementos da envoltória de uma edificação, mais propriamente, em uma superfície opaca e uma superfície translúcida.

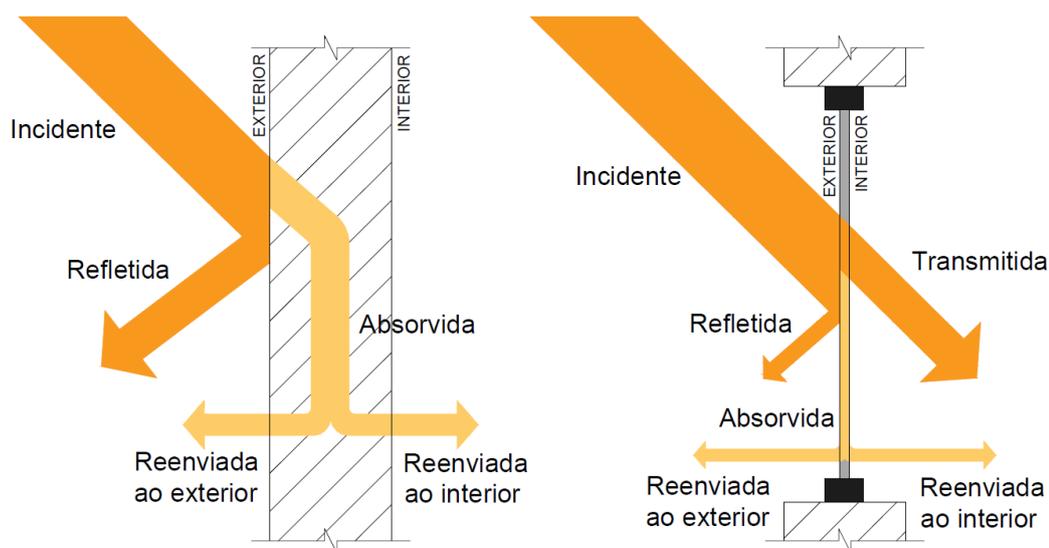


Figura 6 – Fluxo de calor partido da radiação solar incidente em uma parede (esquerda) e uma janela (direita). Figura adaptada de Frota e Schiffer (2001).

A partir da noção de como se procede o fluxo de calor advindo da raios solares incidente na envoltória, é possível entender alguns dos processos de transferência de energia. No total, a transferência de calor ocorre por meio de três processos: condução, convecção e radiação térmica. A convecção ocorre pela movimentação interna de um fluido, como o ar, o que pode ocorrer em elementos vazados, como cobogós e janelas abertas. Quanto aos elementos translúcidos, grande parte do calor que penetra a edificação é transmitido por radiação térmica, que é muito pouco impedida pelos vidros comuns. Além dessa transmissão, uma parcela de calor é transmitida por condução do próprio vidro, uma vez que os vidros simples, tipicamente utilizados no Brasil, têm baixa resistividade térmica. Já nos elementos opacos, a condução é a principal forma pela qual o calor adentra a edificação.

2.6.1 Propriedades termofísicas dos materiais constituintes

Dentre as propriedades termofísicas dos elementos construtivos das envoltórias elencadas por Lamberts, et al. (2014), no âmbito deste trabalho, destacam-se: absorvidade, refletividade, transmissividade, emissividade, resistência térmica, calor específico, condutividade térmica, capacidade térmica e transmitância térmica.

Como o próprio nome diz, a absorvidade se refere à capacidade do material de absorver calor. Da mesma forma, a refletividade é o quanto um material consegue refletir calor e a transmissividade, o transmitir (Figura 6). Assim sendo, as parcelas de absorção, reflexão e transmissão de energia dependem da cor e textura da superfície do material, além do comprimento de onda da radiação incidente. Por sua vez, a emissividade é a propriedade que mensura a capacidade de um material em emitir energia como radiação térmica. Nesse sentido, todos os elementos construtivos das envoltórias tem algum nível de emissividade.

Além disso, ao perceber as correlações das propriedades dos materiais, à luz das questões térmicas, a capacidade e a transmitância térmicas mostram-se bastante importantes. A capacidade térmica mensura o potencial dos materiais de reter calor (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020). Nesse sentido, uma alta capacidade térmica

reduz as flutuações de temperatura no ambiente interno, principalmente nos horários de pico (MENGJIE, FUXIN, *et al.*, 2018). A capacidade térmica (C_T) do material pode ser equacionada com a multiplicação do calor específico (c), da espessura (e) e da massa específica aparente (ρ), segundo a Equação 1 (ABNT, 2005).

$$C_T = e \cdot c \cdot \rho \quad \text{Equação 1}$$

O calor específico mensura o potencial de um material em aquecer-se facilmente durante a adição de energia calorífica, ou em resfriar com facilidade com a retirada de calor. Quanto maior o calor específico, menos sensível o material é às variações de temperatura. Segundo a definição dessa propriedade consagrada na literatura, o calor específico é a energia necessária para aumentar a temperatura de 1 kg do material em 1 K (ASHBY e JONE, 2007). Já a massa específica aparente é uma propriedade que relaciona a massa de um material com o volume que esse ocupa.

Por outro lado, a transmitância térmica se refere à taxa de transferência de calor de um certo material. Um valor alto reflete em um pior isolamento térmico (DOS SANTOS, FOGIATTO e MENDES, 2017). Em síntese, quanto maior a espessura (e) ou menor a condutividade térmica do material (λ), menor será a transmitância térmica do mesmo (U) (PAVLÍK, JERMAN, *et al.*, 214). Isso, pois a transmitância térmica é o inverso da resistência térmica (R). A Equação 2 formula essas relações (ABNT, 2005).

$$U = 1 / R = \lambda / e \quad \text{Equação 2}$$

A resistência térmica é dada em função da condutividade térmica e espessura. Trata-se da capacidade do material em resistir à transmissão de calor através de si. Quanto maior a espessura e menor a condutividade térmica do material, maior será a sua resistência térmica. Por sua vez, a condutividade térmica é a propriedade que os materiais têm de transportar calor de forma constante através de si, a partir de uma diferença de temperatura entre duas superfícies. Define-se a condutividade térmica a partir do fluxo de calor que ocorre de um plano do material com alta temperatura para

ouro plano com baixa temperatura (INCROPERA, 2007). Assim, esse fluxo de calor será proporcional à condutividade térmica do material.

Dada sua importância para o desempenho térmico das edificações, faz-se necessário destacar melhormente essa propriedade. A condutividade térmica de uma matriz cimentícia pode ter seus valores alterados de duas formas, em geral: com a alteração dos agregados utilizados ou com a inserção de mais vazios na mistura. A primeira forma deve-se ao fato de que a estrutura mineralógica dos agregados interfere na condutividade térmica da matriz. De modo geral, para sólidos não metálicos, quanto mais cristalina e rígida for a estrutura molecular de um material, mais condutor de calor ele será (MENDES, PINTO, *et al.*, 2019). Por sua vez, a inserção de poros (vazios de ar) causa redução na condutividade térmica de matrizes cimentícias convencionais devido à baixa condutividade térmica do ar (0,03 kW/(m·K) (MENDES, PINTO, *et al.*, 2019). Grande parte da redução da condutividade térmica das argamassas convencionais são feitas com a adição de vazios ou compostos leves na mistura (aditivos incorporadores de ar, aditivos espumantes, agregados de poliestireno expandido, entre outros) (MENDES, PINTO, *et al.*, 2019; CHEN, WHU e BROUWERS, 2020; CHEN e LIU, 2013).

Ainda, cabe destacar que fabricantes de argamassas isolantes se interessam apenas na condutividade térmica do produto, sem se importar com a variação das demais propriedades termofísicas (GRXSP, 2021; VIMARK, 2021; VIMARK, 2021). Inclusive, existem fabricantes que nem fornecem o valor do calor específico da argamassa que vendem, por exemplo (VIMARK, 2021; VIMARK, 2021).

2.6.2 Potencial de melhoramento das propriedades termofísicas dos materiais de construção

Vários autores estudam a otimização térmica do sistema de fechamento externo, abrangendo as geometrias, as orientações, os sistemas construtivos, as técnicas de sombreamento, além de outros. Como exemplo, Salem, *et al.* (2019), em um estudo de *retrofit* para transformar o hotel Hilton Edinburgh Grosvenor (Reino Unido) em uma edificação com níveis altos de eficiência energética, observaram que utilizando vidro

triplo no edifício resultava-se em uma redução de 7% na demanda de energia. Além disso, Gijón-Rivera, et al. (2011), estudando o desempenho térmico do último pavimento de um prédio envidraçado de escritórios na cidade do México, constataram que 33% nos custos de energia poderiam ser economizados se trocar o vidro de apenas um pano por vidro duplo. Ainda, Ashraf, et al. (2020) apontaram que as cinzas de palmeiras incorporadas na argamassa de blocos de edificação são responsáveis pelo aumento de resistência térmica de até 47% do bloco e pode economizar até 7,6% de energia anual de uma edificação em Dhahran (Arabia Saudita).

Já Nematchoua, et al. (2020) investigaram que a combinação de certos materiais com isolamento térmico (os materiais com mudança de fase, PCM) é capaz de reduzir a energia demandada para o resfriamento de uma edificação em aproximadamente 12% nas cidades de Antsirana, Mahajanga, Tamatave e Taolagnaro, localizadas em Madagascar, as quais se distribuem em três diferentes zonas bioclimáticas. Por sua vez, Kalan, et al. (2016), estudando a utilização de fachadas verdes em um edifício localizado em Hong Kong (China), observaram que esse sistema reduz o consumo de energia para resfriamento em 3%, contudo aumentava o consumo energético em situações de demanda de aquecimento do ambiente interno. Com isso, os autores concluíram que as fachadas verdes podem ser uma estratégia passiva mais viável em regiões de clima quente (KALANI, DAHANAYAKE e CHOW, 2016).

Dessa forma, ao conhecer as propriedades termofísicas dos elementos construtivos das envoltórias, é instigante otimizá-las, para a obtenção de um alto desempenho térmico da edificação. Isso deve ser feito com o entendimento de que as propriedades termofísicas dos materiais agem de forma indissociável. Ou seja, muitas vezes, o efeito conjunto das técnicas causa um resultado diferente da avaliação individual de cada alteração nas propriedades dos materiais das envoltórias. Além disso, sabe-se que a região bioclimática influi nos resultados do desempenho térmico da edificação, como já discutido na seção 2.4, o que torna essa análise ainda mais complexa.

3 METODOLOGIA

3.1 Panorama geral

Fez-se uma elaboração cuidadosa da metodologia deste trabalho, dada a complexidade envolvida nesta investigação. Em linhas gerais, a presente metodologia centra na análise de sensibilidade, a fim de determinar quais são os valores de propriedades termofísicas que conferem à argamassa de revestimento maior potencial de melhoramento do desempenho térmico de uma residência. Além disso, buscou-se entender o comportamento das propriedades da argamassa em função da região em que ela se situa. Para o sucesso de todas essas questões, foram adotadas argamassas de revestimento hipotéticas, cujas propriedades termofísicas variaram de acordo com o que é reportado nas normas brasileiras e na literatura internacional.

O autor estabeleceu e simulou 5 valores de espessura, 4 valores de condutividade térmica e 6 de calor específico, totalizando 120 argamassas. Com relação à massa específica, seus valores foram variados de acordo com a condutividade térmica, como será detalhado a seguir. No total, considerando que a edificação foi simulada nas 8 zonas bioclimáticas do Brasil, foram desenvolvidos e simulados 960 modelos. A edificação analisada trata-se de uma residência de interesse social com 46m². A análise de desempenho térmico foi feita através do Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT), desenvolvido pela equipe de pesquisa do autor deste trabalho, além da aplicação da Árvore de Regressão (técnica de aprendizado de máquina), XGBoost.

3.2 Argamassas de revestimento

Os modelos adotaram um sistema de fechamento de alvenaria convencional, com blocos vazados recobertos por argamassas de revestimento, cujas propriedades foram variadas conforme se segue. As argamassas estudadas foram consideradas em ambos os lados das paredes das vedações verticais externas e internas da edificação.

Para as simulações ficarem realistas, frente ao que é observado na literatura e nas argamassas isolantes comercialmente disponíveis, a massa específica das argamassas testadas foi variada em função da condutividade térmica. Isso ocorre, pois, em matrizes cimentícias convencionais, a diminuição da condutividade térmica é normalmente obtida pela inserção de poros, adições ou agregados leves, devido à propriedade de isolamento térmico do ar (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2019). Em um trabalho anterior, Mendes, et al. (2020) compararam a condutividade térmica (λ) com a massa específica (ρ) de mais de 30 argamassas convencionais, encontrando uma relação expressa na Equação 3 ($R = 0,89$). Dessa forma, seguindo as propriedades observadas por Mendes, et al. (2020), as massas específicas aparentes das argamassas do presente estudo tiveram seus valores variando conforme a condutividade térmica.

$$\lambda \text{ (kW/(m}\cdot\text{K))} = \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0,0011 - 1,0757 \quad \text{Equação 3}$$

A Tabela 1 apresenta os valores que foram considerados para as propriedades termofísicas da argamassa. Em relação à espessura da argamassa de revestimento, a norma brasileira NBR 13749 (ABNT, 2013) determina que, para paredes internas, ela deve variar entre 5 e 20 mm, e, para as externas, 20 e 30 mm. Contudo, na prática, a maioria das argamassas de revestimento variam entre 10 e 30 mm. Assim, a espessura foi simulada (igualmente em ambos os lados da parede) adotando um valor padrão de 20mm (porcentagem relativa considerada como 100%) e variando-a em 50%, 75%, 100%, 125% e 150% (ou seja, a espessura teve valores variando entre 10 e 30 mm).

Com relação à condutividade térmica e ao calor específico, os valores de referência (porcentagem relativa considerada como 100%) foram concebidos com base na norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005). Dessa forma, a condutividade térmica foi variada em 25%, 50%, 75% e 100%, enquanto o calor específico variou em 50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 200%. As variações não aumentaram ou diminuíram ainda mais, porque as implementadas já tangem os limites observados na literatura

(MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020; XU e CHUNG, 2000; MENDES, BARRETO, *et al.*, 2019).

Tabela 1 – Valores das propriedades termofísicas utilizados para as argamassas de revestimento, as quais foram combinadas entre si, resultando em 120 tipos.

Propriedade	Unidade	Valor	Porcentagem Relativa (%)
Espessura	mm	10	50
		15	75
		20	100
		25	125
		30	150
Condutividade Térmica (Massa Específica correspondente)	W/(m·K)	1,15 (2023,36)	100
		0,86 (1762,00)	75
	(kg/m ³)	0,57 (1500,64)	50
		0,29 (1239,27)	25
Calor Específico	J/(kg·K)	500	50
		750	75
		1000	100
		1250	125
		1500	150
		2000	200

Para facilitar o entendimento e identificação das argamassas, elas receberam nomes de acordo com as suas propriedades termofísicas, de forma que os valores que sucedem “e” se referem a espessura em mm, “λ” se referem à condutividade térmica em W/(m·K) e “c” se referem ao calor específico em J/(kg·K). Por exemplo, “e30-λ1.15-c2000” trata-se de uma argamassa com espessura de 30 mm, condutividade térmica de 1,15 W/(m·K), e calor específico de 2000 J/(kg·K).

3.3 Edificação simulada

Neste trabalho, uma residência hipotética de interesse social foi simulada no *software* EnergyPlus, versão 8.9. Essa edificação é unifamiliar e térrea. Ela possui 2 quartos e uma área total de 46 m². Além disso, a casa contém uma cozinha, um banheiro, uma sala e uma lavanderia externa. A Figura 7 apresenta uma visão geral da residência.

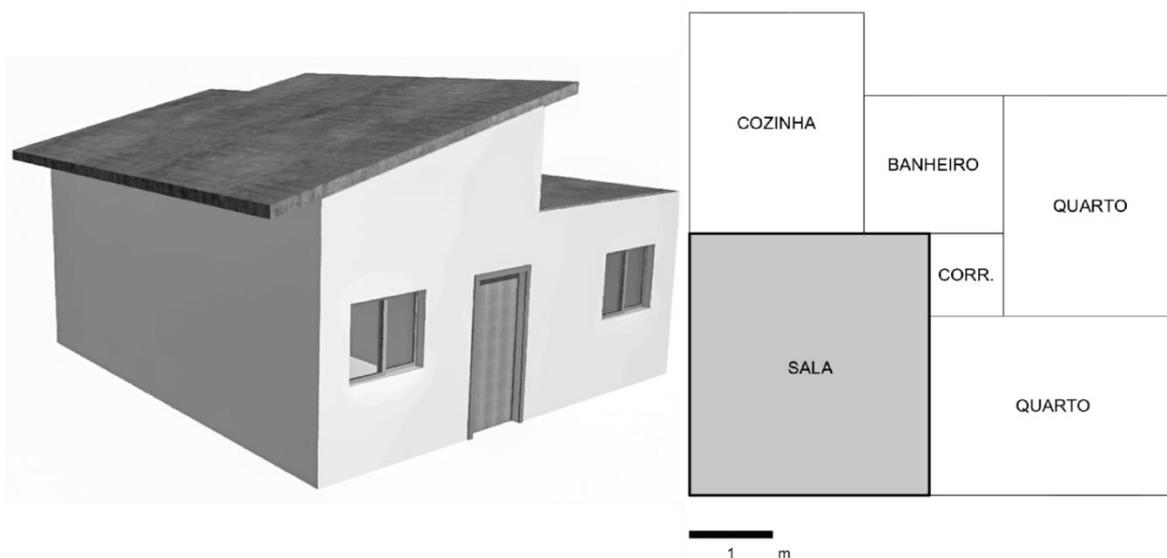
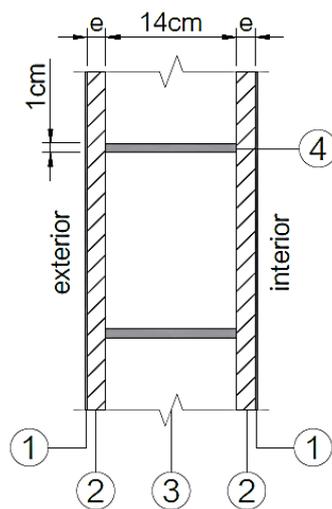


Figura 7 – Esquema da residência: esquerda – modelo 3D; direita – planta baixa com destaque ao cômodo mais crítico (ambiente hachurado).

As paredes da residência têm seu núcleo composto por tijolo estrutural de cerâmica de 14 cm de espessura, revestido com uma camada de argamassa de revestimento em ambos os lados (reboco), cuja propriedades termofísicas foram foco das variações supracitadas. Além disso, todas as paredes têm uma pintura de acabamento com uma tinta que proporciona uma absorvância térmica, solar e visível (α) de 0,5 (ABNT, 2005). A Figura 8 apresenta esquematicamente o sistema construtivo das paredes e das demais envoltórias da edificação. Com exceção da argamassa de revestimento, as propriedades de todos os demais materiais da edificação (envidraçados, madeiramento, concreto entre outros) seguiram os valores de referência da norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005). Os fechamentos

horizontais seguiram o padrão construtivo mais comum encontrado no Brasil, como se verifica na Figura 8.

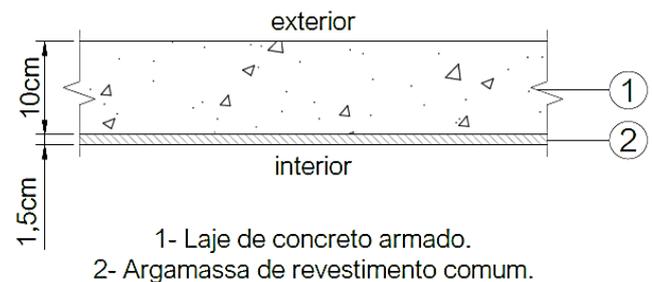
Envoltória vertical (e compartimentação interna)



- 1- Tinta ($\alpha=0.5$).
- 2- Argamassa de revestimento analisada.
- 3- Bloco estrutural cerâmico.
- 4- Argamassa de assentamento comum.

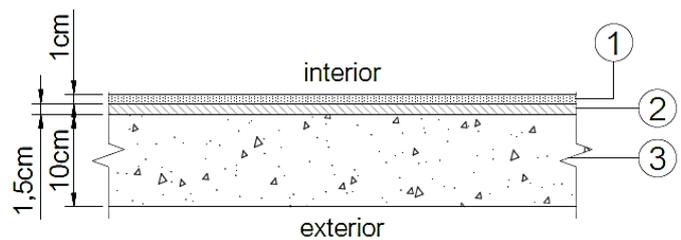
$e = 10, 15, 20, 25, 30 \text{ mm.}$

Envoltória horizontal superior



- 1- Laje de concreto armado.
- 2- Argamassa de revestimento comum.

Envoltória horizontal inferior



- 1- Revestimento cerâmico.
- 2- Argamassa de assentamento comum.
- 3- Contrapiso.

Figura 8 – Sistema construtivo das envoltórias da edificação e das paredes de compartimentação interna.

Cada cômodo foi considerado como uma respectiva zona térmica. O ambiente de longa permanência verificado como mais crítico foi a sala, sendo ela utilizada nas análises de temperatura. Isso, dado que as temperaturas internas mais destoantes das externas em um dia de verão e inverno foram referentes a esse cômodo. Não foi considerada carga térmica interna na edificação (ex. luzes, equipamentos elétricos, pessoas), a fim de isolar o efeito das argamassas no desempenho térmico total do edifício. Além disso, a residência foi orientada para o Norte geográfico e não foi considerado nenhum sombreamento nas envoltórias externas da edificação, a não ser do próprio beiral em certas fachadas, como se observa na Figura 7. Também não foi

considerada nenhuma vegetação circundante na casa. Com relação à taxa de ventilação natural, foi adotado um valor de 1 renovação por hora.

Com o objetivo de abranger o máximo possível das especificidades climáticas presentes no Brasil, realizaram-se simulações em cidades representantes de cada zona bioclimática brasileira (Z). As localidades foram selecionadas de acordo com a maior proeminência no campo de pesquisa energética, além da quantidade populacional: Curitiba (Z1), Camaquã (Z2), São Paulo (Z3), Brasília (Z4), Vitória da Conquista (Z5), Campo Grande (Z6), Cuiabá (Z7) e Manaus (Z8). Os arquivos climáticos que foram utilizados foram obtidos do repositório disponibilizado na segunda emenda de 2021 da NBR 15575 (2013). A Figura 9 apresenta as cidades no mapa do Brasil, enquanto a Figura 10 mostra as cartas bioclimática de cada localidade, com a plotagem horária de temperatura durante todo o ano.

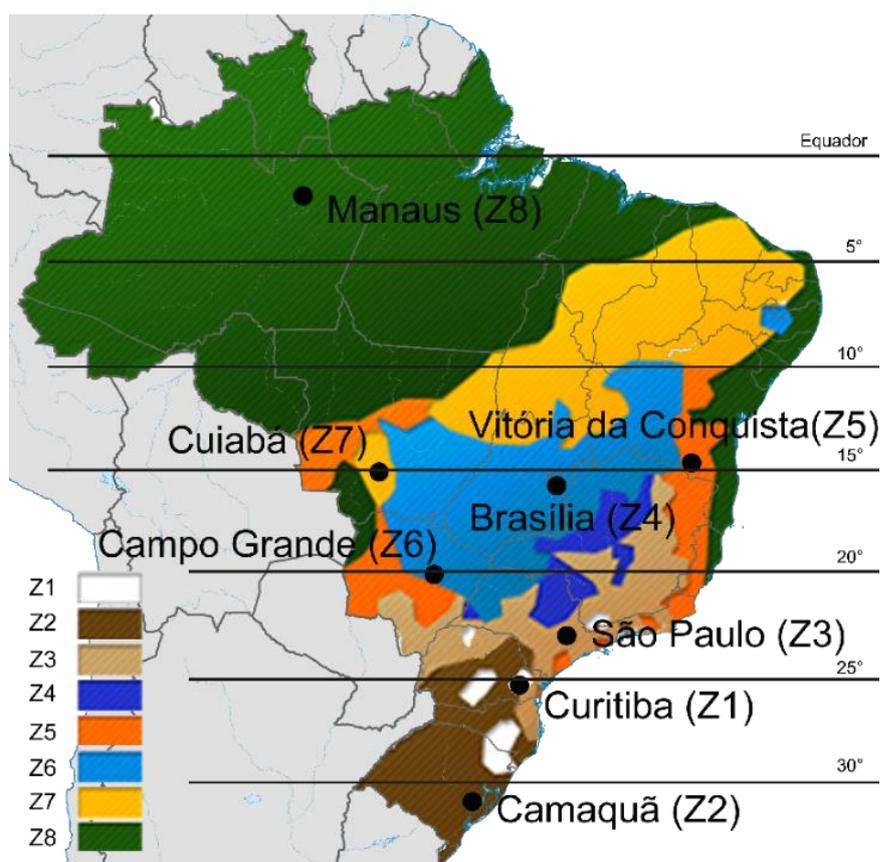


Figura 9 – Representação do território do Brasil com as respectivas localidades analisadas. Figura adaptada de Indiviata, et al. (2016).

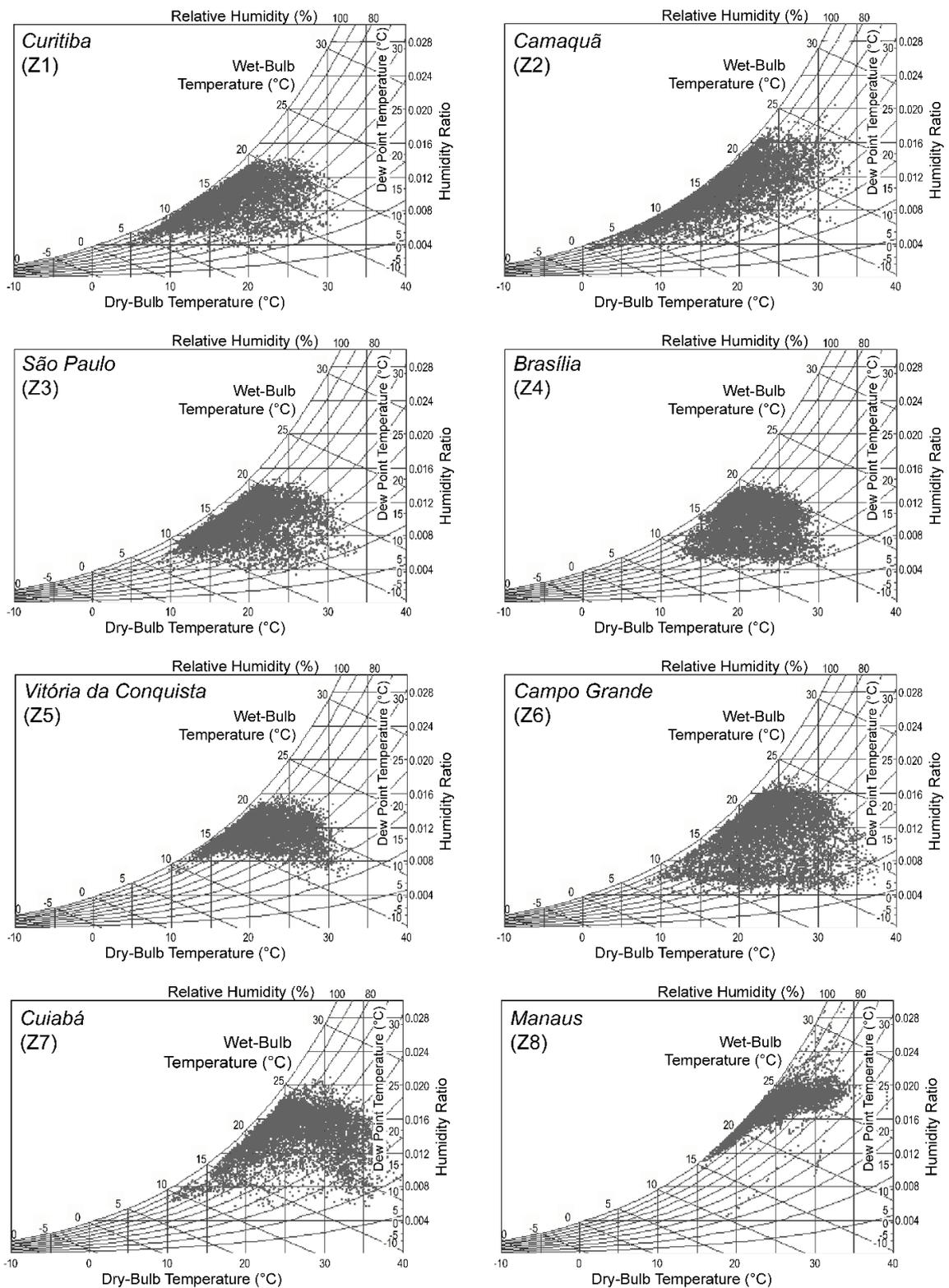


Figura 10 – Carta bioclimática das oito zonas bioclimáticas (Z), com plotagem horária durante todo o ano. Figura elaborada com o software Climate Consultant v6.0.

3.4 Tratamento dos resultados das simulações

3.4.1 Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT)

Os resultados das simulações foram submetidos ao MDAT, desenvolvido pela equipe de pesquisa do autor. Em suma, esse método visa analisar o quanto um certo material de construção corrobora como técnica passiva de isolamento no desempenho térmico da edificação. Ele objetiva medir a diferença entre as temperaturas horárias do exterior (t_e) e do ambiente interno mais crítico (t_i) ao decorrer do ano de referência (Equação 4). Em outras palavras, se as temperaturas internas e externas forem plotadas em um gráfico, o objetivo é obter o somatório de hora em hora das distâncias entre essas duas linhas formadas (Figura 11). Assim, em uma dada hora, um resultado negativo na diferença de temperatura é sinônimo de que o interior estava mais quente do que o exterior. Inversamente, um resultado positivo significa que o interior estava mais frio que o exterior. Posteriormente, os módulos dessas diferenças são somados para todo o ano.

$$\text{Diferença acumulada} = \sum |t_e - t_i|$$

Equação 4

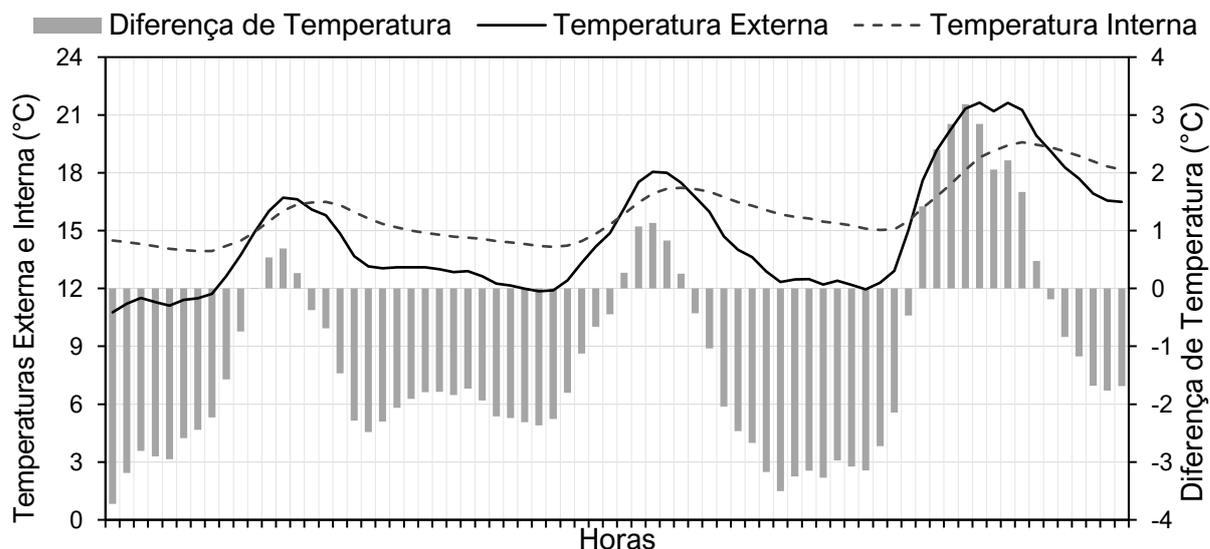


Figura 11 – Exemplo de análise do Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT), sendo que as colunas cinzas mostram a diferença horária (positiva ou negativa) entre as temperaturas interna e externa.

Os cálculos foram feitos em Microsoft Excel com auxílio do Visual Basic for Applications (VBA). Essa metodologia assume que quanto mais isolantes forem os materiais do fechamento, menor vai ser a variação da temperatura do ambiente interno, em relação ao externo. Por isso, valores de temperatura acumulada ao longo do ano mais altos indicam que o material tem um melhor potencial de isolamento térmico, pois subentende-se que essa argamassa propiciou um ambiente interno termicamente mais independente às alterações climáticas que ocorrem do lado de fora do edifício.

É perceptível que existem semelhanças entre esse método e o chamado graus-dias, que é estipulado pela norma estadunidense ASHRAE 90.2 (2017), dado ao fato de que a criação dos dois métodos parte do mesmo embasamento conceitual. Contudo, o MDAT considera as especificidades da variação da temperatura externa e interna ao longo de todo o ano independentemente de limites pré-determinados de conforto interno. Isso faz com que os efeitos das variações dos materiais da envoltória sejam melhor percebidos, além de eliminar vieses relacionados à subjetividade humana.

Haja vista que essa metodologia foi criada para tornar notável as diferenças a partir de mudanças nas propriedades dos materiais de construção, o MDAT é recomendado quando os modelos a serem comparados possuem as mesmas condições de contorno, i.e., mesma edificação, arquivo climático e qualquer outra característica existente desconsiderando aquelas do material de construção em análise.

Os resultados obtidos com o MDAT foram analisados com o auxílio das bibliotecas Matplotlib e Plotly, disponíveis em Python, para a geração de gráficos tridimensionais e gráficos de vela.

3.4.2 *Extreme Gradient Boosting - XGBoost*

Além do MDAT, os resultados foram analisados utilizando a ferramenta de aprendizado de máquina chamada de Árvore de Regressão (um tipo de Árvore de Decisão em que os resultados são relacionados a uma variável contínua), por meio

da técnica *Extreme Gradient Boosting* - XGBoost (2020), da biblioteca Pandas em Python. A Árvore de Regressão é um método de aprendizagem supervisionada largamente utilizado para problemas de regressão, ou seja, quando se quer prever um valor numérico futuro com base em um banco de dados de valores já conhecidos.

A estrutura de qualquer árvore de decisão inicia-se com o nó maior, chamado de raiz, o qual subdivide-se em vários outros nós. Cada um desses nós gerados carrega condições para separar o grupo de dados em subgrupos, os quais devem ter características similares (REZENDE, 2003). Assim, quando um modelo baseado em árvore de decisão é treinado, ele calcula intrinsecamente o quanto cada variável contribui para a redução da variância e, conseqüentemente, é capaz de estimar o quão útil cada variável é para a construção do modelo. Isso permite que o modelo faça uma avaliação quantitativa da contribuição de cada variável (nesse caso, as propriedades termofísicas) no resultado final (nesse caso, o valor do MDAT).

Dessa forma, para avaliar o impacto que cada propriedade termofísica tem nas predições dos resultados do MDAT, oito modelos de predição (um para cada zona bioclimática) foram utilizados usando XGBoost. Isso quer dizer que os valores de entrada (as características das argamassas em relação à condutividade térmica, calor específico e espessura) foram usadas para treinar um modelo de predição do valor do MDAT. Como esses valores já eram conhecidos, eles foram usados para validar de forma cruzada o próprio modelo. Todos os modelos atingiram R^2 maior que 0,99, demonstrando uma excelente representação dos resultados preditos com os já esperados (conhecidos). Através dessa técnica, foi possível calcular, para cada uma das zonas bioclimáticas, o quanto uma propriedade termofísica contribui para a alteração dos resultados de Diferenças Acumuladas de Temperatura (ZHOU e HOOKER, 2019).

4 RESULTADOS

4.1 Influência das propriedades termofísicas

A Figura 12 apresenta os resultados de acumulado horário total de um ano para cada uma das zonas bioclimáticas simuladas, através de gráficos tridimensionais. Os eixos dos gráficos apresentam os valores das propriedades termofísicas das argamassas, i.e., calor específico, espessura e condutividade térmica (a qual, neste trabalho, varia juntamente como a massa específica). No total, são dispostos 120 pontos para cada zona bioclimática, sendo que cada ponto corresponde a uma argamassa de revestimento. Os resultados estão indicados por escala colorimétrica, na qual pontos mais amarelados indicam maiores resultados (ou seja, melhor desempenho térmico para a edificação). Da mesma forma, pontos mais avioletados indicam menores resultados de MDAT e pior desempenho da argamassa.

Os gráficos mostram um comportamento parecido entre as zonas bioclimáticas. Os maiores resultados de acumulado total estão predominantemente concentrados na parte superior dos gráficos. Já os piores resultados estão, em geral, situados na parte inferior. Em uma análise detalhada, na Z1 (Curitiba), por exemplo, é visto que a argamassa e30- λ 1.15-c2000 apresentou melhores resultados, com 21319 °C de acumulado total, enquanto a argamassa e10- λ 0.29-c500, com pior performance, somou 19414 °C. Esses valores indicam que, somente mudando a argamassa da parede de uma edificação, mais de 1000 °C podem ser “salvos” anualmente na temperatura interna da edificação.

Para complementar a exposição dos resultados, a Figura 13 apresenta os resultados de acumulado total em três gráficos de vela. Um para a análise da variação da espessura, outro para análise do calor específico e o último para análise da condutividade térmica. Basicamente, é possível verificar que o aumento dessas propriedades termofísicas é acompanhado do aumento dos resultados de acumulado total, i.e., há um melhoramento no isolamento térmico da edificação. Além disso, é notável a distinção da ordem de grandeza dos resultados de acordo com a zona. Como exemplo, verifica-se que a Z2 (Camaquã) propiciou maiores valores absolutos de temperaturas acumuladas para as argamassas. A Z3 (São Paulo), os menores.

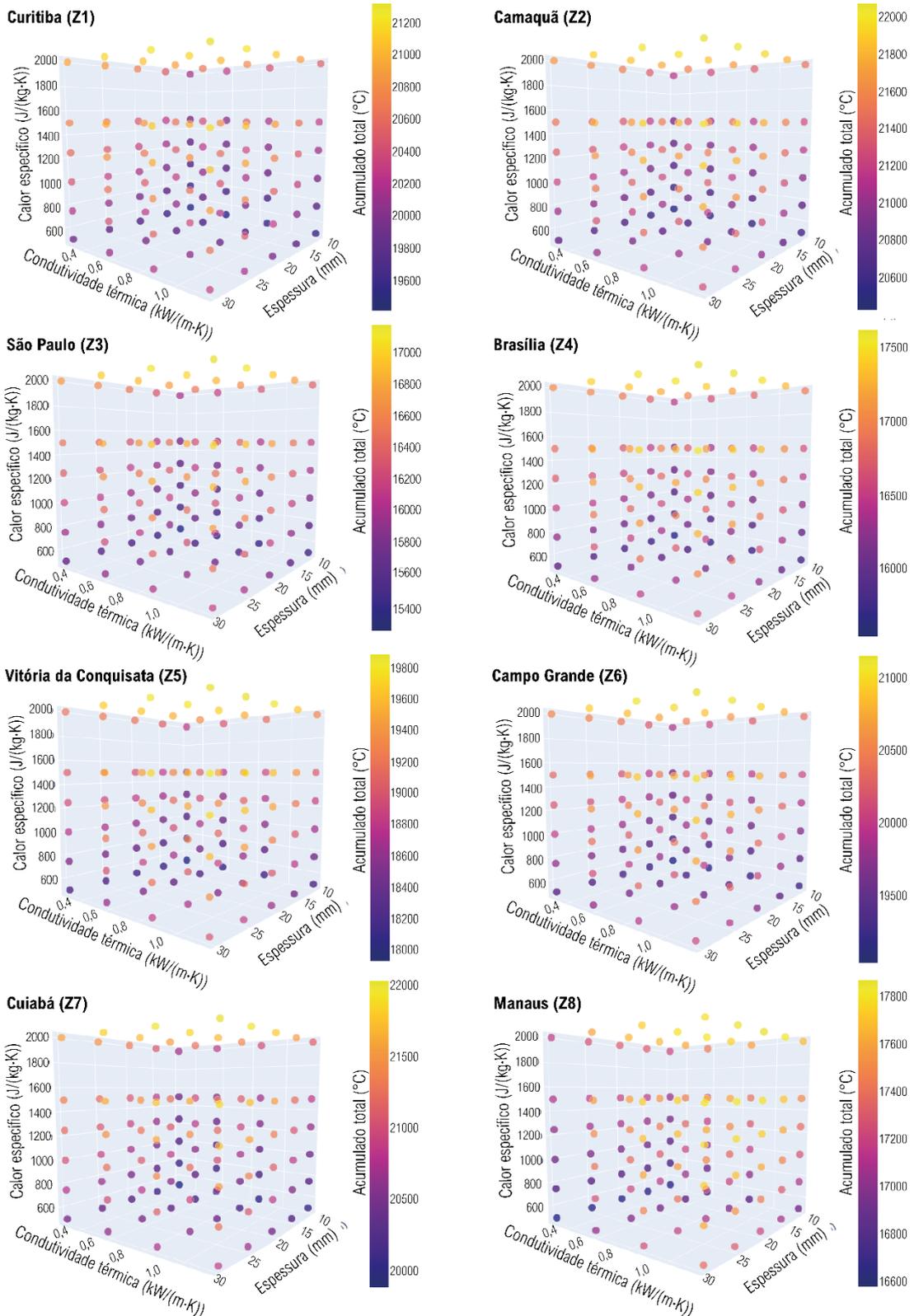


Figura 12 – Resultados de acumulado total para a edificação separados por zona bioclimática (Z1 a Z8).

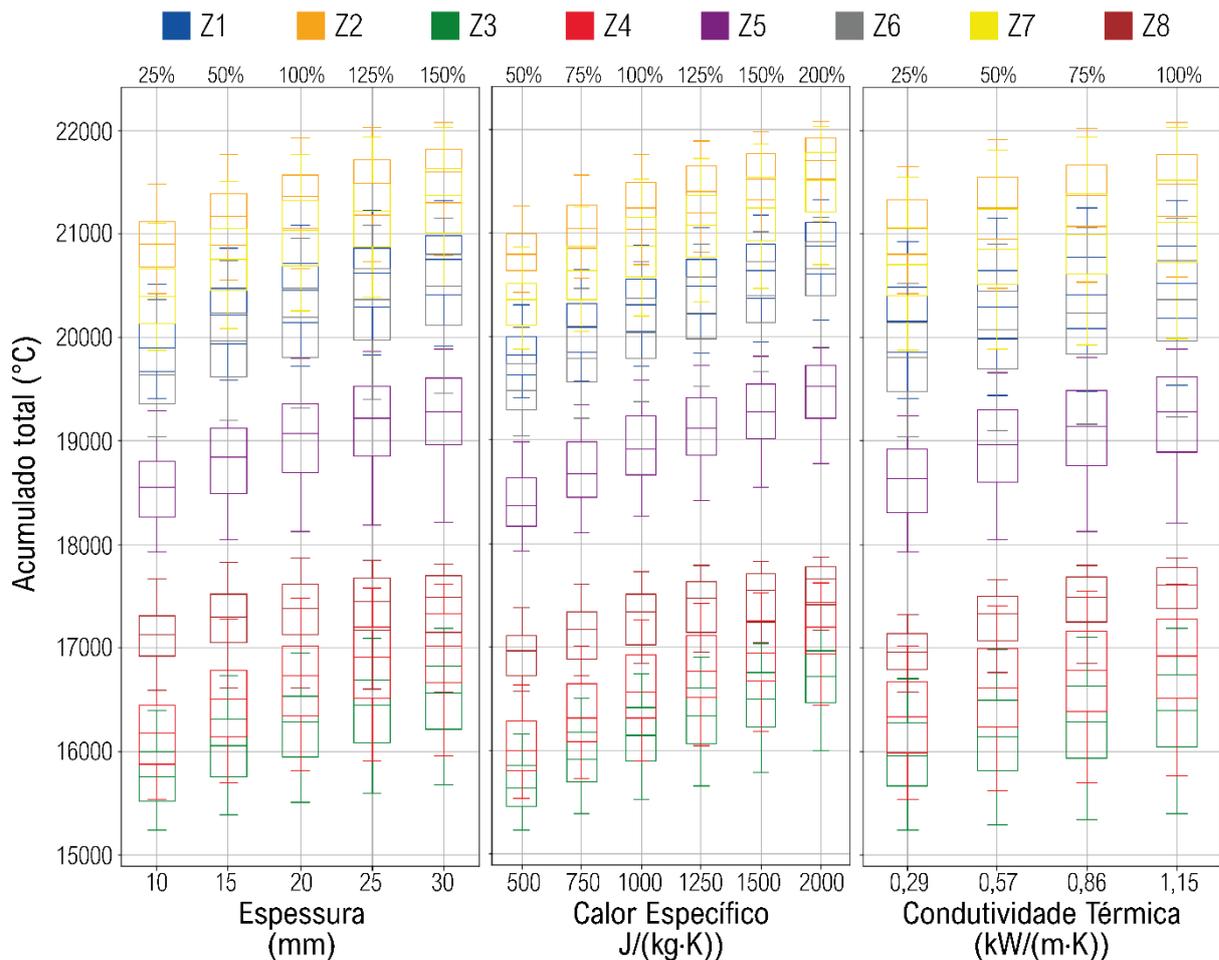


Figura 13 – Resultados de acumulado total para a edificação, para cada zona bioclimática, de acordo com as variações de espessura, calor específico e condutividade térmica das argamassas de revestimento.

Inicialmente, observou-se que o isolamento térmico da edificação melhorou com o aumento da espessura e do calor específico da argamassa de revestimento, pois os valores de acumulado total apresentaram um comportamento de crescimento. Com esse resultado, percebe-se a contribuição da capacidade térmica das argamassas para o isolamento térmico da residência, conforme esperado (descrito na seção 2.6.1). Dessa forma, quando as argamassas de revestimento têm sua capacidade térmica aumentada, ela condiciona o ambiente interno a menores variações de temperatura, uma vez que os ganhos excessivos de calor em situação de verão não se traduzem

tão diretamente em um aumento de temperatura (e o oposto se observa para a perda de calor no inverno).

Entretanto, apesar do isolamento térmico da edificação seguir o comportamento esperado para a espessura e o calor específico (o aumento dessas propriedades melhoram o isolamento térmico da residência), o mesmo não pode ser dito para a condutividade térmica. Como exposto na seção 2.6.1, é sabido que, quanto menor a condutividade, menor a transmitância térmica e, conseqüentemente, maior é o potencial de isolamento do material. Contudo, para todas as zonas bioclimáticas, um incremento na condutividade térmica aumentou o resultado de acumulado total. Em outras palavras, a diminuição na condutividade térmica da argamassa levou a uma redução no potencial de isolamento térmico da edificação, o que é contraintuitivo.

Essa disparidade pode ser explicada com o fato da variação da massa específica estar atrelada à variação da condutividade térmica em matrizes cimentícias produzidas com agregados convencionais (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020). Como o decréscimo da condutividade térmica a partir dessas estratégias (meios que visam inserir poros na matriz cimentícia) normalmente provoca uma redução da massa específica aparente do material, ter-se-á que a redução da transmitância térmica (influenciada pela condutividade térmica diminuída) será acompanhada da diminuição na capacidade térmica (influenciada pela massa específica reduzida).

Dessa forma, com os resultados obtidos, interpreta-se que, para a faixa de propriedades avaliada, o isolamento térmico da edificação foi mais influenciado pela massa específica das argamassas de revestimento do que pela condutividade térmica. Franco, *et al.* (2019) observaram comportamento parecido, quando avaliaram o desempenho térmico de concretos e argamassa com resíduos de mineração e de siderurgia. Na pesquisa de Franco, *et al.* (2019), foi verificado que a troca de areia de rio (material natural) por escória de aciaria (material sintético) causou uma diminuição na condutividade térmica (até 76%) e um aumento na massa específica (até 26%) de argamassas, blocos e concretos, os quais melhoraram significativamente o desempenho térmico da edificação. A combinação de uma condutividade térmica reduzida com uma massa específica aumentada foi possível somente graças à composição morfológica da escória de aciaria (pouco cristalina e composta por

minerais de alta massa molecular) (FRANCO, MENDES, *et al.*, 2019; MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020).

Contudo, o presente trabalho estudou as argamassas convencionais produzidas com agregados naturais (areia de rio), as quais são utilizadas na maioria das edificações atualmente. Nesse sentido, a diminuição da condutividade térmica é normalmente acompanhada do decréscimo da massa específica (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020). Esse resultado indica que as estratégias que visam diminuir a condutividade térmica, levando também a uma redução na massa específica, não são necessariamente vantajosas para melhorar o desempenho térmico total da edificação. Por outro lado, as estratégias que aumentam a capacidade térmica das argamassas de revestimento mostram, sim, serem bastante promissoras.

Por fim, o aumento da espessura colabora tanto com o aumento da capacitância térmica quanto com a redução da transmitância térmica da envoltória, melhorando o isolamento entre os ambientes interno e externo. Assim, o aumento dessa propriedade levou, como esperado, a uma melhora no isolamento das argamassas de revestimento em todas as zonas.

4.2 Melhor e pior argamassas

A Tabela 2 apresenta os destaques de cada zona bioclimática, discriminando as argamassas que garantiram um melhor e pior isolamento térmico à edificação. Como relatado no resultado anterior, o aumento do calor específico, da espessura, e da massa específica (atrelada ao aumento da condutividade térmica) potencializou a capacidade térmica da argamassa, proporcionando um melhor isolamento térmico total na edificação. Assim, em geral, as melhores argamassas se correspondem a uma única (e30- λ 1.15-c2000), que possui os valores máximos para todas as propriedades testadas. Inversamente, as piores argamassas foram, na maioria das vezes, aquelas com todas as propriedades minoradas (e10- λ 0.29-c500). A Z8 (Manaus) foi a única zona bioclimática na qual a pior argamassa não tem todas as suas propriedades termofísicas minimizadas dentro dos limites estipulados neste trabalho (Tabela 1). À Z8 (o Caso de Manaus) foi dedicada uma análise separada, que consta na seção 4.3.

Tabela 2 – Classificação das argamassas, resultado, sua identificação e seus valores de transmitância e capacitância térmicas. Resultados altos indicam um melhor potencial de isolamento.

Zona	Classif.	Acumulado Total		Transm. Térmica (W/m ² ·K)	Capac. Térmica (kJ/(m ² ·K))
		Result. (°C)	Argamassa		
Z1	Melhor	21319	e30-λ1.15-c2000	38,3	121,4
	Pior	19414	e10-λ0.29-c500	29,0	6,2
Z2	Melhor	22075	e30-λ1.15-c2000	38,4	121,4
	Pior	20424	e10-λ0.29-c500	29,0	6,2
Z3	Melhor	17186	e30-λ1.15-c2000	38,4	121,4
	Pior	15235	e10-λ0.29-c500	29,0	6,2
Z4	Melhor	17620	e30-λ1.15-c2000	38,4	121,4
	Pior	15542	e10-λ0.29-c500	29,0	6,2
Z5	Melhor	19884	e30-λ1.15-c2000	38,4	121,4
	Pior	17928	e10-λ0.29-c500	29,0	6,2
Z6	Melhor	21148	e30-λ1.15-c2000	38,4	121,4
	Pior	19038	e10-λ0.29-c500	29,0	6,2
Z7	Melhor	22029	e30-λ1.15-c2000	38,4	121,4
	Pior	19881	e10-λ0.29-c500	29,0	6,2
Z8	Melhor	17870	e20-λ1.15-c2000	57,5	80,9
	Pior	16575	e30-λ0.29-c500	9,7	18,6
Média	Melhor	19891	-	-	-
	Pior	18005	-	-	-

Na Figura 14, identifica-se a proporção de acumulados positivos (quando a temperatura externa é maior que a interna, principalmente durante o dia) e negativo (quando a temperatura externa é menor do que a interna, principalmente durante a noite), os quais somados resultam no valor de acumulado total. As regiões com clima não tão quente ou tão frio (Z3 – São Paulo, Z4 – Brasília e Z5 – Vitória da Conquista) proporcionaram um menor resultado de acumulado negativo, ao serem comparadas às regiões com climas acentuadamente frio (Z1 - Curitiba e Z2 - Camaquã). Contudo, também é visto que o acumulado negativo se destacou mais que o positivo. Isso ocorre, pois de acordo com a carta climática das Z3 (São Paulo), Z4 (Brasília), Z5 (Vitória da Conquista), apresentadas na Figura 10, apesar de não ser o predominante, são vistos dias tão frios quanto os presentes nas Z1 e Z2. Entretanto, não são

observados com frequência dias com temperaturas tão quentes quanto os reportados nas Z6, Z7 e, inclusive, Z8.

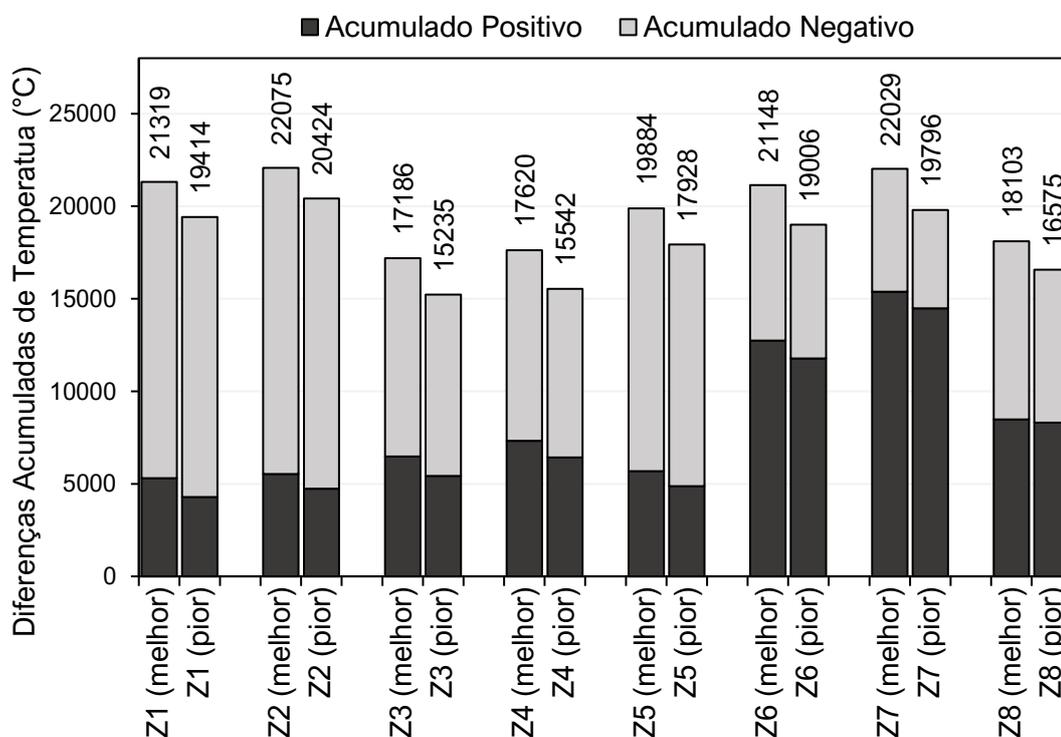


Figura 14 – Diferenças Acumuladas de Temperatura das melhores e piores argamassas segundo resultado dos respectivos acumulados totais, i.e., a soma em módulo dos acumulados positivo e negativo.

4.3 Caso de Manaus

Como foi notado na Tabela 2, a Z8 (Manaus) não se comportou como as demais zonas. pois a melhor argamassa (e20-λ1.15-c2000) da Z8 não tem todas as propriedades termofísicas maximizadas. Mais especificamente, sua espessura não correspondeu a 30 mm (valor máximo pré-determinado). Também foi visto que a pior argamassa dessa zona (e30-λ0.29-c500) não tem todas as suas propriedades termofísicas minimizadas, posto que sua espessura diferenciou em 20mm do valor mínimo pré-estipulado (10mm). Segundo o que foi descrito na seção 2.6.1, o aumento

da espessura da argamassa aumenta a sua capacidade térmica e reduz a sua transmitância térmica. Ambas as alterações são, geralmente, benéficas para o desempenho térmico total da edificação. Por isso, é importante entender o que ocorreu no caso de Manaus.

Durante uma análise minuciosa dos resultados das simulações dos modelos desenvolvidos para a residência na Z8, foi visto que em diversos dias a temperatura externa se mantinha a mesma por um longo período de tempo. A Figura 15 mostra um exemplo dessa situação, juntamente com os comportamentos das argamassas e30- λ 0.29-c500 (definida como a pior na Z8) e a e10- λ 0.29-c500 (obtida como pior nas demais zonas). É possível observar que a e10- λ 0.29-c500 leva a uma amplitude térmica significativamente maior (demonstrando um menor poder de isolamento), mesmo não tendo sido apontada como a pior argamassa para essa zona.

Esse perfil de temperatura é muito atípico, pois apesar de Manaus ter um clima com baixas amplitudes térmicas (CLIAMTE-DATA.ORG, 2021), não é comum que uma cidade mantenha a mesma temperatura por uma longa quantidade de horas, sem nenhuma alteração, mesmo que pequena. Foram notadas situações como essa em mais de 11% das horas simuladas. Além disso, em cerca de 25 dias do arquivo climático, existem significativas mudanças na temperatura em períodos que não se justificam (uma queda de quase 5 °C entre meia-noite e 1h da manhã, por exemplo). Esse comportamento abrupto é muito incomum e não foi visto em outros arquivos bioclimáticos para a mesma cidade. Assim, o autor acredita que essas falhas no arquivo bioclimático levaram ao resultado diferente para a Z8.

Ressalta-se que o arquivo climático selecionado para Manaus foi obtido da fonte recomendada pela segunda emenda de 2021 da NBR 15575 (2013). Mas, devido às inconsistências aqui expostas acima, a Z8 (Manaus) não será mais considerada nas próximas análises.

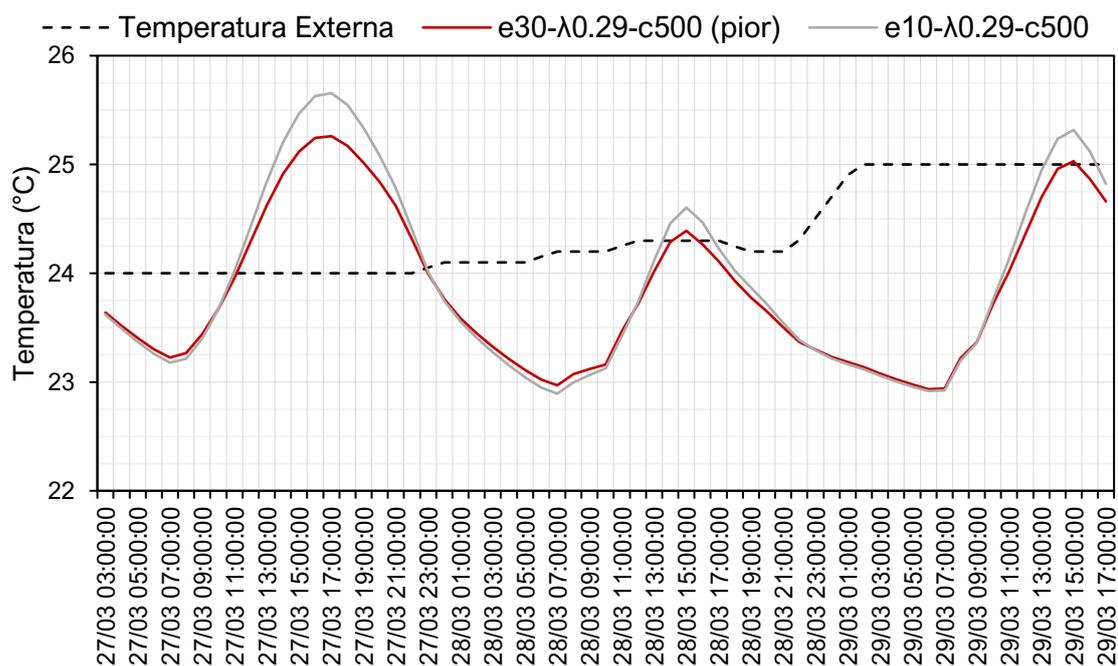


Figura 15 – Temperaturas horárias externas e internas da edificação situada na Z8 (Manaus) com as argamassas e30-λ0.29-c500 (pior na Z8) e e10-λ0.29-c500 (pior nas demais zonas bioclimáticas). Dados de 27/03 às 3h até 29/03 às 17h.

4.4 Efetividade das argamassas

Para quantificar o quanto a argamassa de revestimento pode influenciar no isolamento térmico da edificação, a Figura 16 apresenta a diferença de acumulado total entre a melhor e a pior argamassa de cada zona bioclimática. Como se nota, no Brasil, a Z7 (Cuiabá) é a zona que proporcionou a maior efetividade das mudanças das argamassas, com vista ao melhoramento do isolamento térmico, pois 2148 °C podem ser evitados no ambiente interno ao longo de um ano. Já a Z2 (Camaquã) foi a zona que garantiu menor influência das argamassas para o melhoramento do isolamento térmico, 1651 °C.

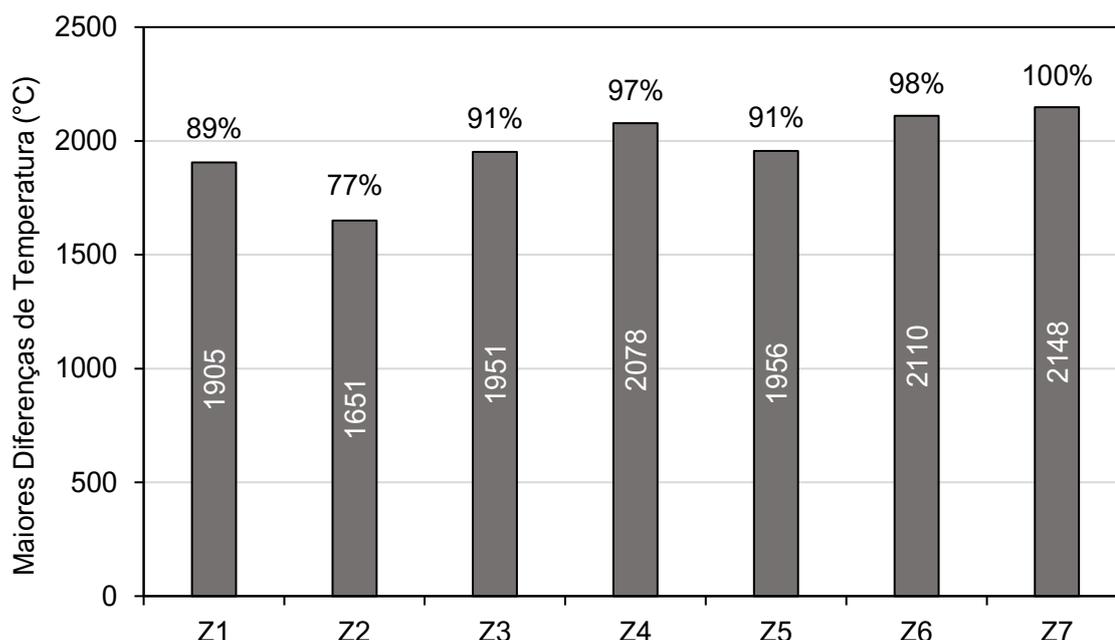


Figura 16 – Diferença entre a melhor e pior argamassa no resultado de acumulado total segundo o Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT) para cada zona bioclimática e porcentagem relativa ao maior valor obtido.

Além disso, é observado que as regiões de clima predominantemente quente (Z6 e Z7) proporcionaram uma maior efetividade da potencialização das propriedades termofísicas da argamassa, com o propósito de melhorar o isolamento térmico da edificação. São, aproximadamente, 2130 °C que podem ser evitados dentro da residência, ao longo do ano. Na sequência, as zonas de clima ameno (Z3, Z4 e Z5) propiciaram a segunda melhor opção para maximizar as propriedades termofísicas e obter um melhor isolamento térmico da residência. Trata-se de 1995 °C que podem ser evitados. Por fim, as localidades de clima acentuadamente frio (Z1 e Z2) mostraram-se ser a última opção para obter altas melhorias no isolamento térmico da edificação através da variação das propriedades termofísicas da argamassa. Apesar disso, ainda é observada uma significativa efetividade da argamassa no isolamento térmico da edificação nessas localidades – aproximadamente, 1778 °C.

O motivo disso está provavelmente relacionado ao fato das amplitudes térmicas anuais notadas nas Z6 e Z7 serem maiores do que as que são observadas em regiões com clima frequentemente frio. Segundo Leão (2007), a amplitude térmica varia entre 6,4 °C e 14,0 °C em 80% dos dias cuiabanos (Z7), ao longo do ano de referência. A amplitude térmica diária nessa cidade pode chegar em até 17,6 °C (LEÃO, 2007). Por sua vez, Leal, et al. (2014) verificaram que, em Curitiba (representante da Z1), a amplitude térmica costuma marcar valores próximos de 6,0 °C durante o ano.

4.5 Grau de importância das propriedades termofísicas das argamassas

Os resultados de acumulado total obtidos no presente trabalho também foram analisados por meio da técnica de aprendizado de máquina XGBoost (2020). Assim sendo, foi possível obter o grau de importância das propriedades termofísicas das argamassas de revestimento para o isolamento térmico da edificação (vide Figura 17). Diante disso, é visto que nenhuma propriedade termofísica, por si só, avançou mais de 60% na contribuição para a mudança do isolamento térmico total da edificação.

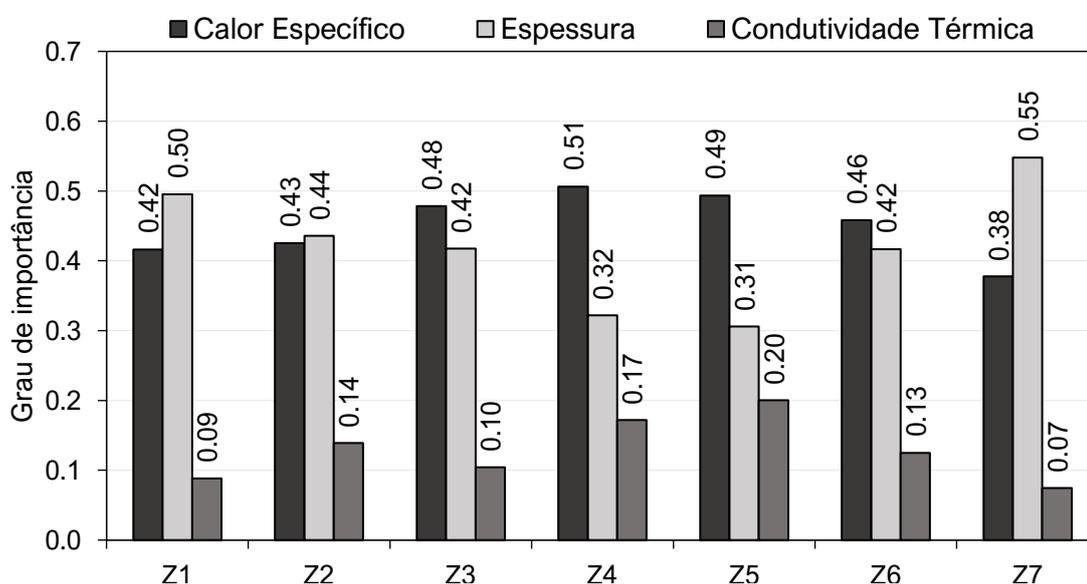


Figura 17 – Grau de importância das propriedades termofísicas das argamassas de acordo com a Árvore de Regressão (XGBoost) dos resultados de acumulado total de acordo com o Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura.

Percebe-se que a condutividade térmica tem a menor participação nos valores de acumulado total. Em outras palavras, seja qual for o valor dessa propriedade termofísica em argamassas convencionais, a condutividade térmica influirá pouco na variação do isolamento térmico da edificação. Como essa redução da condutividade térmica nas argamassas de revestimento convencionais normalmente vincula a redução da massa específica (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020), a diminuição da condutividade térmica (que aumentaria o isolamento térmico da edificação) tem sua importância minorada no resultado de acumulado total, pois, consigo, ocorre a redução da massa específica do material, o que prejudica o isolamento térmico em maior intensidade.

Desconsiderando esse fato, alguns fabricantes de argamassa convencionais de revestimento priorizam grandemente, e às vezes somente, a diminuição da condutividade térmica para melhorar o isolamento térmico da edificação (GRXSP, 2021; VIMARK, 2021; VIMARK, 2021). Muitos, sequer, possuem nos seus dados técnicos os valores para calor específico.

Em contrapartida, confirmando as observações das seções anteriores, verifica-se que o calor específico e a espessura das argamassas apresentaram grande participação na melhoria (ou piora) do isolamento térmico da edificação. Tratam-se de propriedades que, quando incrementadas, influenciam diretamente a capacidade térmica do material, sendo que espessura também contribui na redução da sua transmitância térmica. Além disso, é provável que a alternância da propriedade termofísica mais importante entre as zonas bioclimáticas (condutividade térmica ou calor específico) ocorre devido às especificidades climatológicas de cada região.

Ao comparar a carta climática (Figura 9) e a Figura 17, percebe-se que as regiões que reportaram dias com temperaturas mais extremas (Z1 com dias muito frios e Z7 com dias muito quentes) são as mesmas localidades que tiveram a espessura com maior grau de importância nos resultados de acumulado total. Por isso, infere-se que quando o clima externo é mais agudo é necessário, além da participação da capacidade térmica, uma maior contribuição da transmitância térmica, para melhorar o isolamento térmico da edificação.

Para o entendimento disso, é importante lembrar que a análise deste trabalho é de sensibilidade, i.e., além de investigar as propriedades com valores extremados, estuda-se a evolução do aumento/redução desses valores. Em outras palavras, é possível entender que, quando não há a possibilidade de maximizar todas as propriedades termofísicas da argamassa, nas regiões de clima mais extremo, é interessante priorizar o espessamento da camada da argamassa de revestimento. Isso deve ser feito, naturalmente, respeitando-se os valores máximos de espessura recomendados pelas normas e manuais técnicos para garantir, além do isolamento térmico, qualidade e durabilidade na construção.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT). E, para aplicação do método, ele investigou a contribuição das propriedades termofísicas de argamassas de revestimento para o isolamento térmico de uma residência de interesse social. Nesse sentido, 120 argamassas com combinações de valores de espessura, condutividade térmica, massa específica e calor específico distintos foram simuladas no *software* EnergyPlus. Após, procedeu-se com a análise dos dados através do Método de Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT) implementado em VBA no Microsoft Excel e por meio da técnica de árvore de regressão através XGBoost, em linguagem Phyton. A edificação foi simulada em oito localidades diferentes, pertencentes a cada uma das zonas bioclimáticas brasileiras (Z1 a Z8).

Os resultados mostraram que as propriedades termofísicas analisadas das argamassas têm uma relação diretamente proporcional à melhoria do isolamento térmico total da edificação. Notou-se que, em geral, quando essas propriedades são maximizadas (incluindo a condutividade térmica), dentro da faixa de valores estudada, ocorre o melhor isolamento térmico possível (e30- λ 1.15-c2000). Também, verificou-se o pior isolamento térmico para quando a argamassa teve suas propriedades termofísicas minimizadas (e10- λ 0.29-c500).

Através do XGBoost e da análise visual dos gráficos de vela, foi constatado que a condutividade térmica, teve menor participação no isolamento térmico da edificação em relação às demais propriedades termofísicas estudadas. Essa situação é contraintuitiva, uma vez que se espera que menores valores de condutividade térmica leve a um melhor isolamento térmico. Contudo, o presente estudo focou em argamassas convencionais, que vem sendo mais aplicada na prática. E, devido a isso, a diminuição da condutividade térmica está atrelada à redução da massa específica. Os resultados também mostraram uma maior contribuição das propriedades relativas à capacidade térmica da argamassa para o isolamento da residência: o calor específico e a espessura.

Assim, este trabalho verificou que a estratégia utilizada por muitas empresas que fabricam argamassas isolantes para revestimento, em geral, não corrobora para o isolamento térmico da edificação. Pelo contrário, a redução da condutividade térmica dessas argamassas convencionais, normalmente obtida pelo uso de aditivos incorporadores de ar ou agregados leves, acarreta na redução de massa específica, o que leva a uma diminuição da capacidade térmica. Portanto, este trabalho indicou que estratégias que reduzem a condutividade térmica às custas da redução da massa específica dos materiais de fechamento podem não ser benéficas para o isolamento térmico da edificação.

Em geral, o MDAT mostrou-se efetivo para a análise e permitiu elucidar a importância das propriedades termofísicas dos materiais de construção que contribuem passivamente no desempenho térmico total das edificações. Entretanto, foi observado uma significativa quantidade de temperaturas inconsistentes no arquivo climático da cidade de Manaus, referenciado na segunda emenda de 2021 da norma NBR 15575 (2013). A utilização de um arquivo climático vicioso é prejudicial para as análises, posto que levou a resultados incongruentes, vistos neste trabalho, referentes à Z8. Por isso, é importante que as normas e os órgãos meteorológicos tenham muita cautela na disponibilização desses documentos.

Ainda, os resultados também deixaram claro que a influência da argamassa de revestimento na residência analisada é função das características bioclimáticas da região. Assim, evidencia-se uma necessidade de crivo do analista, quando ele estiver no processo de tomada de decisão sobre o melhor conjunto de propriedades termofísicas dos materiais do fechamento da edificação, pois eles variarão conforme sua localização e demais características de projeto. Isso mostra que não seria possível desenvolver comercialmente uma única argamassa isolante térmica adequada para todas as regiões do Brasil.

Por fim, os resultados mostraram que, uma vez que seja feito um estudo adequado do conjunto otimizado de suas propriedades termofísicas, as argamassas de revestimento podem contribuir para a melhoria do desempenho térmico da edificação. Essas propriedades, quando potencializadas, podem “salvar” até 2148 °C por ano, na edificação estudada (como visto para a Z7). Com isso, todos os resultados

deste trabalho apontaram que a argamassa de revestimento pode contribuir para a melhoria da eficiência energética da edificação, tanto quanto para a satisfação e saúde dos ocupantes.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

É interessante fazer mais testes de análises do método desenvolvido neste trabalho, validando-o com um protótipo real de uma residência. Isso, pois um novo método de análise de desempenho térmico, com uma metodologia que abranja igualmente todo o território brasileiro, traria mais concisão para os procedimentos de avaliação e normatização do desempenho térmico total de edificações com base em técnicas passivas de isolamento das envoltórias. Além disso, é interessante realizar um estudo de análise dos arquivos climáticos disponibilizados pela segunda emenda de 2021 da NBR 15575 (2013), a fim de verificar disparidades no ano de referência, como as encontradas neste trabalho e citadas na seção 4.3.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15220 - Desempenho térmico em edificações**. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT. **NBR 13749 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação**. Rio de Janeiro. 2013.

ABNT. **NBR 15575 - Edifícios Residenciais - Desempenho**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2013.

ASHBY, M. F.; JONE, D. R. H. **Engenharia de Materiais: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto**. [S.I.]: 3, v. 1, 2007.

ASHRAE. **55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. [S.I.]. 2017.

ASHRAF, N. et al. Assessment of thermal and energy performance of masonry blocks prepared with date palm ash. **Materials for Renewable and Sustainable Energy**, v. 3, 2020.

BADIEI, A.; ALLINSON, D.; LOMAS, K. J. Automated dynamic thermal simulation of houses and housing stocks using readily available reduced data. **Energy and Buildings**, v. 203, 109431 2019.

BARRETO, R. R. et al. Desempenho térmico de argamassas produzidas com resíduos da mineração. **Anais do 7º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**, Porto Alegre, 2021.

BATAINEH, K.; ALRABEE, A. Improving the Energy Efficiency of the Residential Buildings in Jordan. **Buildings**, v. 8, p. 85, 2018.

BENMANSOUR, N. et al. 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.

CARPIO, M. et al. Impact Of The Envelope Design Of Residential Buildings On Their Acclimation Energy Demand, CO2 Emissions And Energy Rating. **Energy and Sustainability**, v. 186, p. 387-398, 2015.

CHEN, B.; LIU, N. A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 691-698, 2013.

CHEN, Y. X.; WHU, F.; BROUWERS, H. J. H. Bio-based ultra-lightweight concrete applying miscanthus fibers: Acoustic absorption and thermal insulation. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103829, 2020.

CHO, J. et al. Energy-cost analysis of HVAC system for office buildings: Development of a multiple prediction methodology for HVAC system cost estimation. **Energy and Buildings**, v. 173, p. 562-576, 2018.

CHVATAL, K. M. S. Evaluation of NBR 15575 simplified procedure for determining the thermal performance level of dwellings. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 119-134, 2014.

CLIAMTE-DATA.ORG. CLIMA MANAUS (BRASIL). **Cliamte-Dara.org**, 2021. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/amazonas/manaus-1882/>>. Acesso em: ago. 2021.

CRAWLEY, D. B. et al. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, p. 661-673, 2008.

DE DEAR, R. Recent Enhancements to the Adaptive Comfort Standard in ASHRAE 55-2010. **45th Annual Conference of the Architectural Science Association**, 2011.

DOS SANTOS, G. H.; FOGIATTO, M. A.; MENDES, N. Numerical analysis of thermal transmittance of hollow concrete blocks. **Journal of Building Physics**, p. 1-18, 2017.

FAJILLA, G. et al. Assessment of the Impact of Occupants' Behavior and Climate Change on Heating and Cooling Energy Needs of Buildings. **Energies**, v. 13, p. 6468, 2020.

FERREIRA, P. M.; SILVA, S. M.; RUANO, A. E. Model based predictive control of HVAC systems for human thermal comfort and energy consumption minimization. **IFAC**, v. 45, p. 236-241, 2012.

FRANCO, L. C. et al. Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with bioclimatic principles and recycled aggregates. **Sustainable Cities and Society**, 2019.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GIJÓN-RIVERA, M. et al. Appraisal of thermal performance of a glazed office with a solar control coating: Cases in Mexico and Canada. **Building and Environment**, v. 46, p. 1223-1233, 2011.

GRXSP. Argamassa Termoacústica e Antichamas Thermo-X, 2021. Disponível em: <<https://www.grxsp.com.br/argamassas-e-compostos-especiais/argamassa-termica-thermo-x.html>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

HONG, T.; CHOU, S. K.; BONG, T. Y. A design day for building load and energy estimation. **Building and Environment**, v. 34, p. 469-477, 1999.

HOU, L. et al. The Impacts of Energy Efficiency Design Parameters on Office Buildings Energy Consumption in Different Climate Zones in China. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 2478-2484, 2017.

INCROPERA, F. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6. ed. [S.l.]: John Wiley, 2007.

INDIVIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20-32, 2016.

JINDAL, A.; KUMAR, N.; RODRIGUES, J. J. P. C. A Heuristic-based Smart HVAC Energy Management Scheme for University Buildings. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 14, p. 5074-5086, 2018.

JORNAL NACIONAL. Itália, Espanha e França convivem com novas restrições para conter a pandemia de Covid. **G1**, 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2020/10/26/italia-espanha-e-franca-convivem-com-novas-restricoes-para-conter-a-pandemia-de-covid.ghtml>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

JOSEPH, M.; JOSE, V.; HABEEB, A. Thermal Performance of Buildings: Case Study and Experimental Validation of Educational Building. **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering**, v. 4, p. 2278-8875, jun. 2015.

KALANI, K. W. D.; DAHANAYAKE, C.; CHOW, C. L. Studying the Potential of Energy Saving through Vertical Greenery Systems: Using EnergyPlus Simulation Program. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 47-59, 2016.

KLEPEIS, N. E. et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS). **Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2001. Disponível em: <<https://indoor.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-47713.pdf>>.

KRSTIĆ-FURUNDŽIĆ, A.; VUJOŠEVIĆ, M.; PETROVSKI, A. Energy and environmental performance of the office building facade scenarios. **Energy**, v. 183, p. 437-447, 2019.

LAMBERTS, R. **Casa Eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, v. 1, 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Rio de Janeiro: Eletrobrás Procel, 2014.

LEAL, L.; BIONDI, D.; BATISTA, A. C. Condições meteorológicas e diferenças térmicas diárias extremas na cidade de Curitiba. **Scientia Plena**, v. 10, 2014.

LEÃO, É. F. T. B. Carta bioclimática de Cuiabá - Mato Grosso. **Universidade Federal de Mato Grosso**, Cuiabá, 2007.

LI, M.; WU, Z.; TAN, J. Heat storage properties of the cement mortar incorporated with composite phase change material. **Applied Energy**, v. 103, p. 393-399, 2013.

MELO, A. P.; CÓSTOLA, D.; HENSEN, J. L. M. Assessing the accuracy of a simplified building energy simulation model using BESTEST: The case study of Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, v. 45, p. 219-228, 2012.

MENDES, C. J. et al. Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117597, 2020.

MENDES, J. C. et al. Macroporous Mortars for Laying and Coating. **Journal of Construction**, v. 18, p. 29-41, 2019.

MENDES, J. C. et al. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103365, 2019.

MENDES, J. C. et al. Coating mortars based on mining and industrial residues. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, p. 1569-1586, 2020.

MENDES, J. C. et al. Correlation Between Ultrasonic Pulse Velocity and Thermal Conductivity of Cement-Based Composites. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 39, p. 36, 2020.

MENGJIE, S. et al. Review on building energy performance improvement using phase. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 776-793, 2018.

NEMATCHOUA, M. K. et al. Application of phase change materials, thermal insulation, and external shading for thermal comfort improvement and cooling energy demand reduction in an office building under different coastal tropical climates. **Solar Energy**, v. 207, p. 458-470, 2020.

ONÉSIPPE, C. et al. Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations. **Composites: Part A**, v. 41, p. 549-556, 2010.

PANG, Z. et al. Application of mobile positioning occupancy data for building energy simulation: An engineering case study. **Building and Environment**, v. 141, p. 1-15, 2018.

PAULA, J. O. S.; FREITAS, L. D.; DA SILVEIRA, W. Análise de conforto térmico em residências unifamiliares no município de Aparecida do Taboado/MS. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 1-21, 2019.

PAVLÍK, Z. et al. Effective thermal conductivity of hollow bricks with cavities filled by air and expanded polystyrene. **Journal of Building Physics**, v. 37(4), p. 436-448, 214.

PIEIDADE, A. C. D.; RODRIGUES, A. M.; RORIZ, L. F. **Climatização em edifícios: envolvente e comportamento térmico**. 2. ed. Alfragide: Orion, 2003.

RANA, J. et al. Evaluation of passive design strategies to achieve NZEB in the corporate facilities: the context of Bangladeshi subtropical monsoon climate. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**. 2398-4708.

REZENDE, S. O. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. [S.l.]: Manole Ltda, 2003.

SALEM, R. et al. Investigating the potential impact of energy-efficient measures for retrofitting existing UK hotels to reach the nearly zero energy building (nZEB) standard. **Energy Efficiency**, v. 12, p. 1577-1594, 2019.

SANTOS, R. L.; ANDRADE, H. O. D. Avaliação quantitativa do conforto térmico de uma cidade em área de transição climática: Feira de Santana-Bahia, Brasil. **Revista de Geografia Norte Grande**, v. 40, p. 77-84, 2008. ISSN ISSN 0718-3402.

SENA, V. Afinal, qual será o tamanho do home office no pós-pandemia? Depende. **EXAME**, 2020. Disponível em: <<https://exame.com/carreira/afinal-qual-sera-o-tamanho-do-home-office-no-pos-pandemia-depender>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

THIERS, S.; PEUPOORTIER, B. Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings. **Building and Environment**, v. 51, p. 276-284, 2012.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379-1392, 2018.

VIMARK. Insulating Coat Thermo Rasatura, 2021. Disponível em: <<https://www.vimark.com/en/prodotti/insulating-coating-thermo-rasatura/>>. Acesso em: 3 March 2021.

VIMARK. Mineral Adhesive-Coating Mortar for Thermal Insulation System Polyfix, 2021. Disponível em: <<https://www.vimark.com/en/prodotti/collante-e-rasante-per-cappotto-polyfix/>>. Acesso em: 3 March 2021.

XGBOOST DEVELOPERS. XGBoost, 2020. Disponível em: <https://xgboost.readthedocs.io/_/downloads/en/latest/pdf/>. Acesso em: 5 July 2021.

XU, Y.; CHUNG, D. D. L. Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 59-61, 2000.

ZHOU, Z.; HOOKER, G. Unbiased measurement of feature importance in tree-based methods., 2019.

ZHU, X. et al. Energy performance of a new Yaodong dwelling, in the Loess Plateau of China. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 159-166, 2014.

APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES CORRELATAS AO TEMA

A.1 Novo método de análise da contribuição das propriedades térmicas de materiais de construção no desempenho térmico total



NOVO MÉTODO DE ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO TOTAL

V. F. Mendes¹*, W. Fardin¹, R. R. Barreto¹, L. M. Martins¹, L. F. Caetano¹, J. C. Mendes¹

*Autor de Contato: vitor.mendes@aluno.ufop.edu.br

¹Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Basil

RESUMO

O presente trabalho desenvolveu o Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura. Trata-se de uma nova metodologia para a análise comparativa de propriedades térmicas dos materiais de construção, na contribuição para o desempenho térmico total de uma edificação. Esse método foi validado com simulações de uma residência de interesse social hipotética na cidade de São Paulo, na qual foi realizada uma análise de sensibilidade da espessura, massa específica, condutividade térmica e calor específico da argamassa de revestimento. Para isso, foram simuladas 120 argamassas, comparando, de hora em hora, as temperaturas externa e interna. O método foi capaz de apresentar numericamente a influência dessas propriedades no desempenho térmico total, facilitando a comparação e a escolha do melhor cenário construtivo para o resultado final da edificação, em termos de isolamento térmico.

Palavras-chave: Desempenho térmico; Eficiência energética; Argamassa de revestimento; Propriedades térmicas; Simulação energética.

A.2 Desempenho térmico de argamassas produzidas com resíduos da mineração e siderurgia



7º ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO
Porto Alegre, RS, Brasil, 3, 4 e 5 de novembro de 2021

DESEMPENHO TÉRMICO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DA MINERAÇÃO E SIDERURGIA

Rodrigo Rony Barreto

Email: rodrigobarreto@outlook.com

Vitor Freitas Mendes

Email: vitor.mendes@aluno.ufop.edu.br

Wellington Fardin

Email: wellington.fardin@aluno.ufop.edu.br

Vanessa Pereira Santana

Email: vanessa.santana@aluno.ufop.edu.br

Julia Castro Mendes

Email: julia.mendes@ufop.edu.br

RESUMO

Este estudo avalia o desempenho térmico de argamassas de revestimento produzidas com a substituição total do agregado natural por três resíduos: Rejeito de Barragem de Minério de Ferro, Quartzito Friável e Escória de Aciaria. Foram realizadas simulações energéticas de uma habitação de interesse social, no software EnergyPlus. Como resultado, as argamassas de resíduos obtiveram desempenho térmico similar ou superior às convencionais, com destaque para a de escória de aciaria. Isso ocorreu devido à alta capacidade térmica e baixa condutividade térmica desse material. Assim, argamassas de resíduo são alternativas promissoras para melhorar o desempenho térmico de edificações no Brasil.

Palavras-chaves: desempenho térmico; matrizes cimentícias; resíduos da mineração e siderurgia; simulação energética.

ABSTRACT

This study evaluates the thermal performance of coating mortars produced with the total replacement of the natural aggregate by three residues: Iron ore tailing, Friable Quartzite and Steel Slag. Energy simulations of low-income housing were carried out using the EnergyPlus software. As a result, waste mortars obtained thermal performance similar to or superior to conventional ones, with emphasis on steel slag. This was due to the high thermal capacity and low thermal conductivity of this material. Thus, waste mortars are promising alternatives to improve the thermal performance of buildings in Brazil.

Keywords: thermal performance; cementitious matrices; mining and steel wastes; energy simulation.



A.3 Menção Honrosa referente ao trabalho “Desempenho térmico de argamassas produzidas com resíduos da mineração e siderurgia”



7º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção

Certificamos que o trabalho intitulado

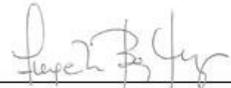
DESEMPENHO TÉRMICO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DA MINERAÇÃO E SIDERURGIA

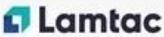
de autoria de: Rodrigo Barreto, Vitor Mendes, Welington Fardin, Vanessa Santana, Julia Mendes

recebeu "**MENÇÃO HONROSA**" do 7º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção - ENARC 2021, realizado no formato online, no período de 3 a 5 de novembro de 2021.

Porto Alegre, 5 de novembro de 2021.


Dra. Sofia Araújo Lima Bessa
Coordenadora do Comitê Científico


Dra. Angela Borges Masuero
Coordenadora do Comitê de Organização Local

Apoio:      **Patrocinadores:**   