XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Simulação computacional para auditoria térmica de edificações institucionais existentes

Computational simulation for thermal audit of existing institutional buildings

Caio de Carvalho Lucarelli
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | caio.lucarelli@ufv.br
Matheus Menezes Oliveira
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | matheus.meneses@gmail.com
Thaís de Souza Magalhães
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | thais.s.magalhaes@ufv.br
Raquel de Fátima Saith Marques
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | raquel.saith@ufv.br
João Pedro Martins Pereira
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | joao.pereira4@ufv.br
Joyce Correna Carlo
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil |joycecarlo@ufv.br

Resumo

A substituição de técnicas de condicionamento passivo por sistemas ativos acarreta uniformização do espaço construído e o aumento do consumo eletroenergético. Dentre as táticas de condicionamento natural, podemos destacar aumento da inércia e isolamento térmico. Este trabalho realiza a auditoria térmica de duas edificações reais de assistência à saúde. A metodologia aplicada envolve medições e simulações térmicas para avaliação do conforto térmico adaptativo e das temperaturas superficiais antes e depois da aplicação de materiais isolantes e de Mudança de Fase (PCMs). Destacamos a implementação do poliestireno de 60mm para redução da temperatura superficial das coberturas com manutenção do conforto térmico.

Palavras-chave: *Inércia Térmica. Materiais de Mudança de Fase. Isolantes Térmicos. Conforto Térmico Adaptativo.*

Como citar:
LUCARELLI, C. D. C; OLIVEIRA, M. M.; MAGALHÃES, T. D. S.; MARQUES, R. F. S.; PEREIRA, J. P.M; CARLO, J. C. Simulação computacional para auditoria térmica de edificações institucionais existentes. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

Abstract

The replacement of passive conditioning techniques by active systems led to a standardization of the built space and augmented electrical energy consumption. We can highlight increased thermal inertia and thermal insulation among natural conditioning tactics. This paper estimates and proposes comfort features for two existing health care facility. The methodology involves on-site analysis and thermal simulations to assess adaptive thermal comfort and indoor surface temperatures before and after applying conventional insulation and Phase Change Materials (PCMs). As main results, we highlight the performance of 60mm Polystyrene on reducing the indoor temperature of the ceiling surfaces while maintaining or improving comfort.

Keywords: *Thermal Inertia. Phase Change Materials. Thermal Insulation. Adaptive Thermal Comfort.*

INTRODUÇÃO

O Painel Intergovenamental de Mudanças Climáticas (IPCC) das Nações Unidas apontou em seu sexto relatório em 2021 uma evolução significativa do aquecimento global com acréscimo mínimo na temperatura de 1,5°C para as próximas duas décadas [1]. Ações antropogênicas como adoção de materiais com baixa inércia térmica, altas absortâncias e baixa capacidade reflexiva, escassez de elementos naturais e elevado uso de condicionamento artificial impactam diretamente no aumento do consumo eletroenergético.

Na última década, o acesso facilitado e a redução dos preços de sistemas artificiais de condicionamento contribuíram para o crescente uso de estratégias ativas de conforto em detrimento de técnicas de condicionamento natural [2]. Contudo, o surgimento de elementos construtivos inteligentes com características passivas intrínsecas, como os Materiais de Mudança de Fase (PCMs), permite alcançar melhores níveis de desempenho térmico, atenuando o dispêndio com energia elétrica [3].

Nesse contexto, simulações termoenergéticas são importantes para viabilizar análises de desempenho de edificações e requerem correta modelagem computacional da geometria e caracterizações físicas assertivas dos materiais construtivos.

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma auditoria térmica para redução do desconforto por calor nas sedes da Divisão Psicossocial da Universidade Federal de Viçosa (DVP-UFV) utilizando simulações comparativas com diferentes isolamentos térmicos (lã de rocha e de vidro e poliestireno) e PCMs com três temperaturas de fusão/solidificação (RT22HC, RT25HC e RT28HC) [4] aplicados a coberturas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Carvalho e Michaloski [5], o conforto térmico está relacionado a condições psicofisiológicas dos seres humanos, contribuindo para o bem-estar do usuário. Para espaços arquitetônicos relacionados à recuperação de pacientes psicologicamente vulneráveis, pesquisas como as de Quadros e Mizgier [6] evidenciam influências diretas de fatores físico-espaciais para a saúde dos envolvidos. A saber, Christopoulos [7] aponta o conforto térmico como principal elemento para o bem-estar em ambientes assistenciais à saúde.

Dentre as estratégias passivas de climatização, a inércia térmica atua na redução de transferência do calor por armazenamento e posterior liberação, abrandando picos de temperatura e reduzindo o desconforto térmico. Normalmente, espaços com alta capacidade térmica são compostos de fechamentos espessos e pesados, com pequenas aberturas ou elementos de sombreamento [8]. Segundo a NBR 15.220-3 [9], para climas predominantemente frios com amplitude térmica diária considerável é indicado o uso de inércia térmica, principalmente durante o inverno e acompanhada de outras estratégias de condicionamento.

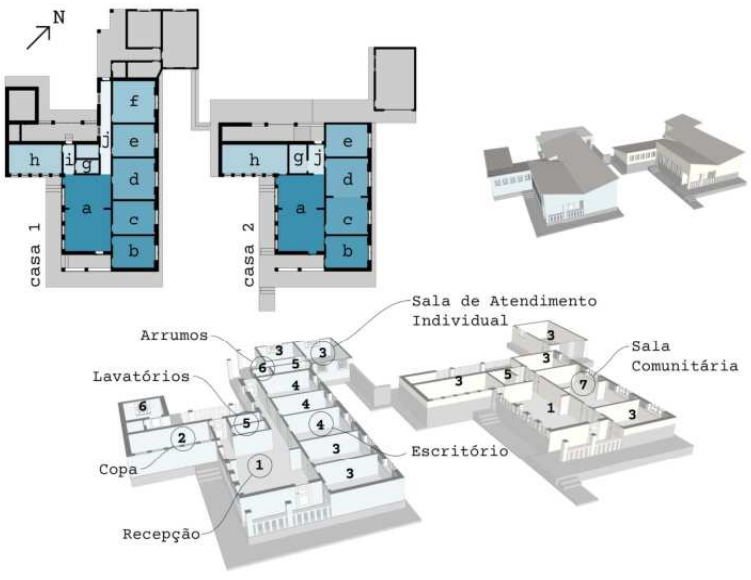
Quando não é possível valer de envoltórias espessas e pesadas, os Materiais de Mudança de Fase (PCMs) agem como eficientes armazenadores de energia (na forma de calor latente), acumulando de 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume [10].

Sendo assim, PCMs para envoltórias normalmente garantem aumento das horas em conforto térmico e economia de energia [11]. Contudo, autores como Sharma e Rai [12], apresentam casos em que isolantes térmicos convencionais exibem maiores vantagens se comparados à aplicação de PCMs.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Divisão Psicossocial (DVP-UFV) é composta por duas edificações (Figura 1) localizadas no campus da Universidade Federal de Viçosa (latitude 20.7° Sul). O município faz parte da Zona Bioclimática 3 [9] e é classificado por Köppen-Geiger como clima quente e temperado (Cwa) com verões quentes e úmidos e invernos frios a amenos.

Figura 1: Modelo digital das edificações e discriminação dos espaços/zonas térmicas



Legenda

Casa 1:
- a Recepção
- b Sala 1
- c Sala 2
- d Sala 3
- e Sala 4
- f Sala 5
- g Banheiros
- h Copa/Cozinha
- i Corredor 2
- j Corredor 1

Casa 2:
- a Recepção
- b Sala 1
- c Sala 2
- d Sala 3
- e Sala 4
- g Banheiros
- h Sala 5 (recondicionada)
- j Corredor 1

Fonte: os autores.

As edificações são térreas, implantadas a uma distância média de 5 metros entre si. As casas foram inicialmente concebidas como moradia para professores, funcionários públicos e familiares atendendo ao projeto Purdue-UREMG (1947-1954), e

posteriormente recondicionadas como espaços institucionais de escritórios, salas de terapia conjunta e consultórios de psicologia e psiquiatria (Figura 1).

Os fechamentos externos das edificações são espessos com alta capacidade térmica e a cobertura é em formato borboleta com laje de concreto e telha de fibrocimento acima de uma fina camada de ar (0.17 m².K/W). Apesar das geometrias semelhantes, a primeira edificação possui 155m² e a segunda 129m² devido à criação de novas edículas para atendimento individual. Nas duas sedes, todos os espaços são naturalmente ventilados. As fachadas principais (voltadas ao logradouro) estão orientadas a Sudeste.

Nesse trabalho, adotamos apenas o espaço original da edificação, excluindo os anexos (espaços não coloridos na planta da Figura 1) que, segundo os funcionários da DVP, não oferecem desconforto. Para definição das fontes de calor, usamos uma Câmera Termográfica da marca FLIR, modelo E60vt (intervalo de medição de temperatura superficial -20° a 50°C). Analisando as imagens termográficas (apresentados adiante na seção 4.0), determinamos as coberturas como fontes explícitas de calor superficial (discutido em resultados).

Durante a etapa de catalogação e medição, levantamos os materiais para paredes externas, internas e cobertura utilizando modelos de referência equivalente [13]. As camadas, espessuras, transmitâncias, capacidades e absortâncias térmicas para paredes externas, internas e cobertura estão listados na Tabela 1. A ordem de listagem aparece do exterior para o interior da edificação, como inserido no *software* de simulação (EnergyPlus). Apesar de apresentarmos a composição das paredes externas e internas, os isolantes e PCMs são incorporados apenas nas coberturas. Portanto, a caracterização serve para apresentação dos componentes construtivos inseridos no processo de simulação.

Consideramos absortâncias (a) de 0.40 para a casa 1 (azul claro) e 0.30 para a casa 2 (amarelo claro) de acordo com a NBR 15.220-2 [12].

Tabela 1: Componentes construtivos das paredes e coberturas

Paredes Externas e Internas					**Cobertura**				
9 furos 14x19x29 cm	Material	e (cm)	Ut (W/m²°C)	Ct KJ/m²°C	Maciça de Concreto	Material	e (cm)	Ut (W/m²°C)	Ct KJ/m²°C
	Argamassa Externa	0.25	1.83	161		Fibrocimento	0.80	2.06	233
	Cerâmica	1.65							
	Câmara de Ar	10.70				Câmara de Ar	0.25		
	Cerâmica	1.65							
	Argamassa Interna	0.25				Concreto	10.00		

Fonte: os autores. Adaptado de: [12,13].

Para as simulações térmicas, adotamos o programa EnergyPlus, criado a partir dos programas BLAST e DOE-2, disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. O programa utiliza o método de cálculo do balanço térmico, validado pelo método *Bestest* da ASHRAE 140 [14], dispensando validação em estudos com geometria, cargas internas e tecnologias de baixa complexidade [15].

As simulações ocorreram para as duas edificações, com as mesmas geometrias externas, materiais construtivos e condições de contorno. Também levantamos os padrões de uso, número de pessoas, equipamentos e condicionamento natural, com a abertura e fechamento das janelas e portas de acordo com o uso real dos ambientes. As diferenças entre os modelos estão na divisão interna dos cômodos, absortâncias e padrões de uso e ventilação natural.

Para o modelo 1 (casa 1), modelamos 10 zonas térmicas nomeadas de 'a' a 'j' (Figura 1). Para o modelo 2 (casa 2), modelamos 8 zonas compatíveis com o modelo 1 e nomeadas de acordo com o mesmo (Figura 1).

Adotamos como arquivo climático padrão o TMY3 para a cidade de Viçosa, considerando as edificações reais situadas nesse município. Definimos como horário de funcionamento dias úteis (segunda-feira à sexta-feira), das 8h às 18h, excluído o período de férias de 07 de dezembro à 02 de março e 06 de julho à 02 de agosto (coletado do calendário escolar regular da graduação de 2019 devido à pandemia do COVID-19); contudo, consideramos as 8.760 horas do ano para análise de conforto. Estabelecemos as cargas térmicas de iluminação e equipamentos elétricos por levantamento e adotamos valores definidos nas tabelas de consumo/eficiência energética do Inmetro [16].

Utilizamos um cronograma real (horas de trabalho e quantidade de funcionários) para emular a abertura e fechamento das janelas de acordo com a temperatura interna. As janelas se abrem quando a temperatura interna ultrapassa 21°C e se fecham gradativamente até vedação completa a 28°C, seguindo a faixa de conforto. Para ventilação, adotamos o *AirflowNetwork:MultiZone:Zone* com modo de controle constante de acordo com a faixa de temperatura selecionada e mínimo fator de abertura de 0.33.

Para a auditoria e proposição de modificações, nos embasamos na NBR 15.220-3 [9] que indica ventilação cruzada e aumento de massa térmica para verão e inverno na Zona Bioclimática 3. Com restrição de manter as características originais da edificação pelo valor histórico modernista, alteramos os modelos internamente, escolhendo diferentes isolantes térmicos para cobertura, bem como três PCMs para nível de comparação.

Utilizando a NBR 15.220-2 [9], selecionamos três isolantes térmicos padrão com densidade, condutividade térmica e calor específico apresentados na Tabela 2. Na mesma tabela, apresentamos os PCMs. Seguindo a metodologia aplicada por Filippini et al. [3], elegemos três temperaturas de mudança de fase diferindo em 3°C cada. Optamos pelos PCMs comerciais, orgânicos e macroencapsulados da empresa Rubitherm GMBH [4], devido ao fácil acesso às propriedades térmicas de mudança de fase dos produtos.

Contemplamos como condicionantes para a seleção dos PCMs as temperaturas de bulbo seco presentes no TMY3 além do calor latente, capacidade e condutividade térmicas, toxicidade e densidade dos materiais [17].

Para simulação com PCMs configuramos o parâmetro *HeatBalanceAlgorithm* com o algoritmo global de transferência de calor *CondFD* (Condução por Diferenças Finitas). Em *HeatBalanceSettings*, no campo *DifferenceSchemes* selecionamos a opção *FullyImplicitOrder* com a constante 0.30. Para inserção do PCM no EnergyPlus, adotamos o método de histerese do material como discutido por Al-Janabi e Kavgic [18]. Utilizamos 20 cálculos por hora como indicado por Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi [19].

Tabela 2: Isolantes Térmicos e PCMs adotados

Isolantes					
Material	Propriedades Térmicas			Espessura (cm)	Fonte
	ρ kg/m³	λ W/(m.K)	C kJ/(kg.K)		
Lã de Vidro	10-100	0.045	0.70	3 6	[12]
Lã de Rocha	20-200	0.045	0.75	3 6	
Poliestireno	15-35	0.040	1.42	3 6	

PCMs						
Material	Temperatura de Mudança de Fase		Propriedades Térmicas		Espessura (cm)	Fonte
	Liquefação	Solidificação	λ W/(m.K)	C kJ/(kg.K)		
RT22HC	20-23 °C	23-20 °C	0.2	2	3 6	[4]
RT25HC	22-26 °C	26-22 °C			3 6	
RT28HC	27-29 °C	29-27 °C			3 6	

Fonte: os autores. Adaptado de: [4,9].

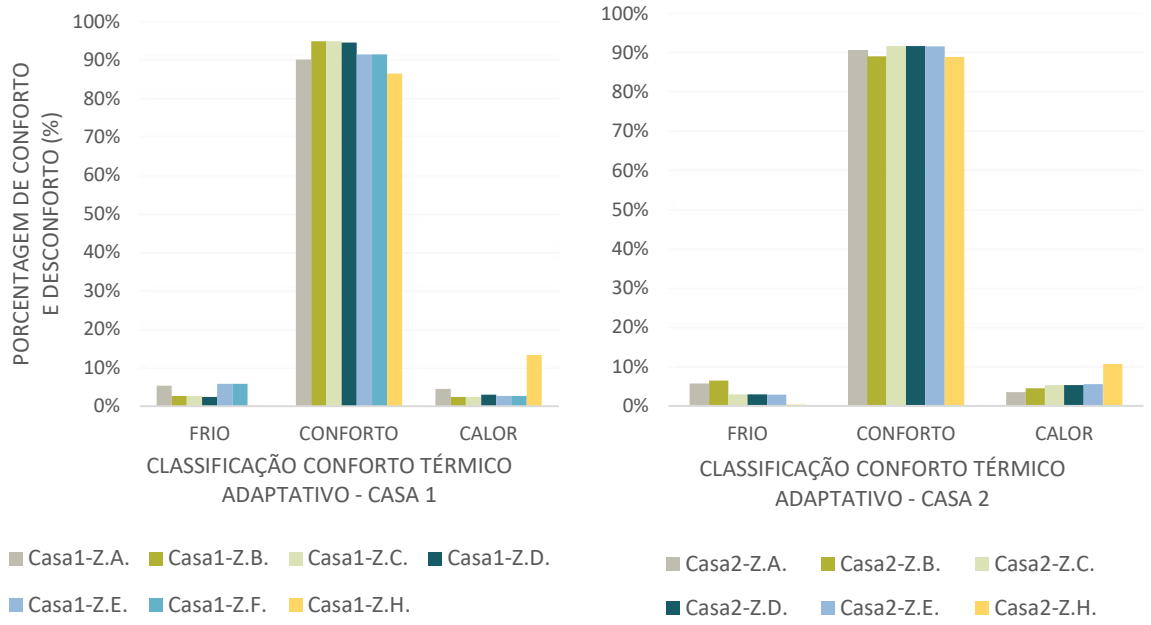
Dessa forma realizamos 24 simulações considerando duas casas (2), 3 isolantes com 2 espessuras cada (6) e 3 PCMs com 2 espessuras cada (6). Em todas as simulações solicitamos como dados de saída a temperatura de bulbo seco externa, a temperatura operativa e o fluxo do ar, variáveis necessárias para determinar os índices de conforto térmico adaptativo, definido pela ASHRAE 55 [20], além das temperaturas superficiais internas para as coberturas, definidas pela medição termográfica como fonte de calor radiante.

Adotamos o conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55 [20] pois o espaço é controlado naturalmente, não existe sistema de condicionamento artificial, a taxa metabólica é adequada, as adaptações físicas e fisiológicas são possíveis e a temperatura externa média é maior que 10°C e menor que 33.5°C. A fim de complementar a análise, visto que, pelos resultados apresentados a seguir o desconforto por calor utilizando o conforto térmico adaptativo é mínimo, utilizamos as medições de temperaturas superficiais internas para investigação da possibilidade de desconforto por temperatura estratificada.

RESULTADOS

A auditoria térmica da sede da DVP-UFV aconteceu via solicitação dos funcionários. Contudo, ao realizar as medições e simulações computacionais, constatamos que os casos base e as edificações reais estão em conforto térmico em, no mínimo, 86.6% dos casos (Figura 2). Dessa forma, a edificação já está em conformidade com os parâmetros da ASHRAE 55 [20].

Figura 2: Conforto térmico adaptativo para os casos base: Casa 1 e Casa 2

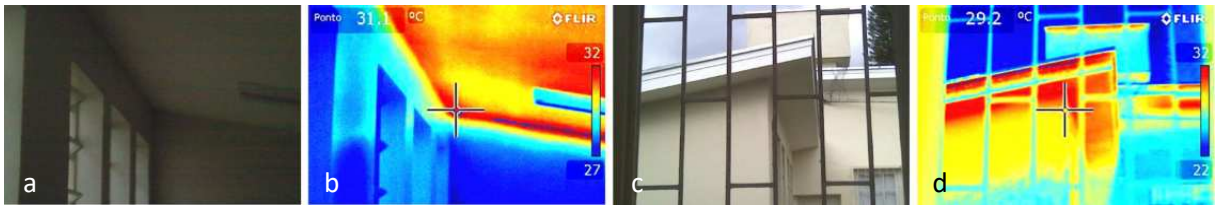


Fonte: os autores.

De acordo com a figura, podemos perceber o paralelismo entre o desconforto por calor e por frio para ambas casas. Para a casa 1, o maior desconforto por frio ocorre para a sala 'a', representativa da recepção (5.8%), devido ao sombreamento por geometria de contorno e pelas paredes voltadas à Sul. O maior desconforto por frio para a casa 2 ocorre para o espaço 'b' (6.4%), uma sala de atendimento individual. O maior desconforto por calor para ambas casas acontece para a zona 'h' (13.3% e 10.7% respectivamente) devido à orientação do telhado borboleta voltado a NO. Os espaços estão na mesma posição em planta, mas representam a cozinha da casa 1 e uma sala de atendimento individual na casa 2. Como simplificação, não apresentamos nos gráficos as zonas de permanência provisória (banheiros e corredores).

Como as medições e simulações para a auditoria indicam conforto em grande parte das horas, investigamos indicadores de desconforto localizado. As medições com a câmera termográfica (FLIR E60vt) (Figura 3abcd) mostram alta temperatura superficial nas coberturas, comparativamente as paredes, pressupondo desconforto por estratificação térmica. Isso ocorre devido à diferença de inércia térmica e absortâncias entre as superfícies verticais (pesadas, espessas e com baixa absortância) e as superfícies das coberturas (leves, finas, e com alta absortância) que geram diferenças de temperatura no sentido vertical.

Figura 3: Imagens da Câmera Termográfica. a: imagem interna Casa1-Z.H. b: imagem térmica interna Casa1-Z.H. c: imagem externa Casa2. d: imagem térmica externa Casa2

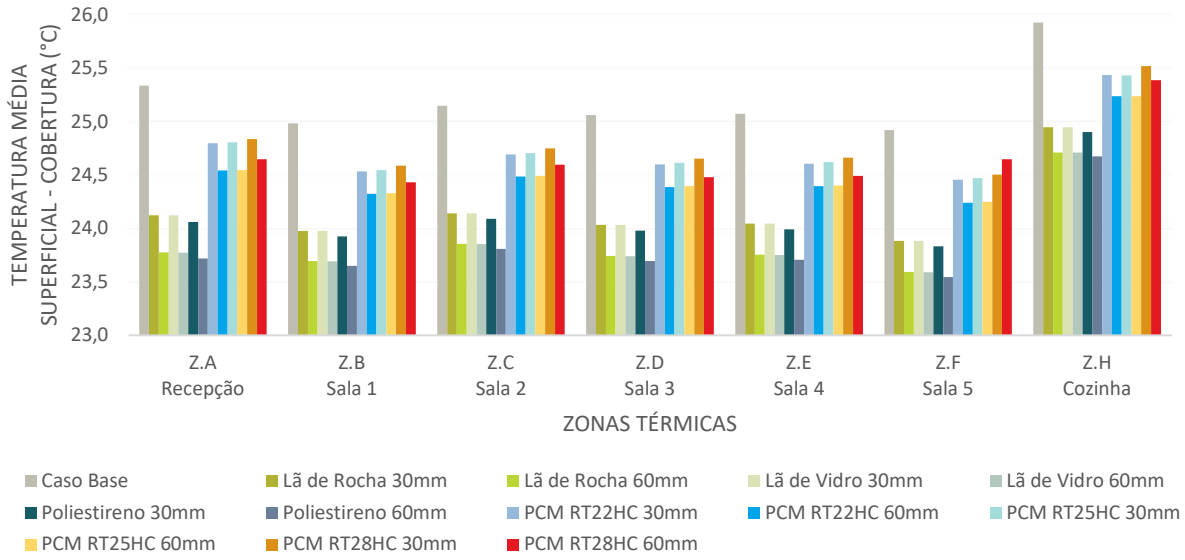


Fonte: os autores.

Visando manter a essência modernista das edificações, que compõem um acervo com 54 outras unidades, nos restringimos apenas a adequações internas. Para avaliar a possibilidade de desconforto localizado, analisamos as temperaturas superficiais internas das coberturas. Como o ambiente está majoritariamente em conforto, não aplicamos a Estimativa do stress por calor em trabalhadores, baseado no índice IBUTG (Índice de bulbo úmido e temperatura de globo), não computando temperaturas de bulbo úmido.

As Figuras 4 e 5 representam todas as médias anuais de temperaturas superficiais internas (para coberturas de cada zona), geradas pela simulação computacional. Em cada barra é possível perceber o impacto da adoção de cada elemento isolante e PCM. Novamente, não apresentamos ambientes de permanência provisória. Dentre os isolantes, a maior redução de temperatura superficial ocorreu com a aplicação da chapa de Poliestireno de 60mm (5.5% de redução) com maior representatividade para a zona 'h' (Casa1.Z.H. Cozinha/Copa).

Figura 4: Temperatura superficial interna (Coberturas) por ambiente da Casa 1

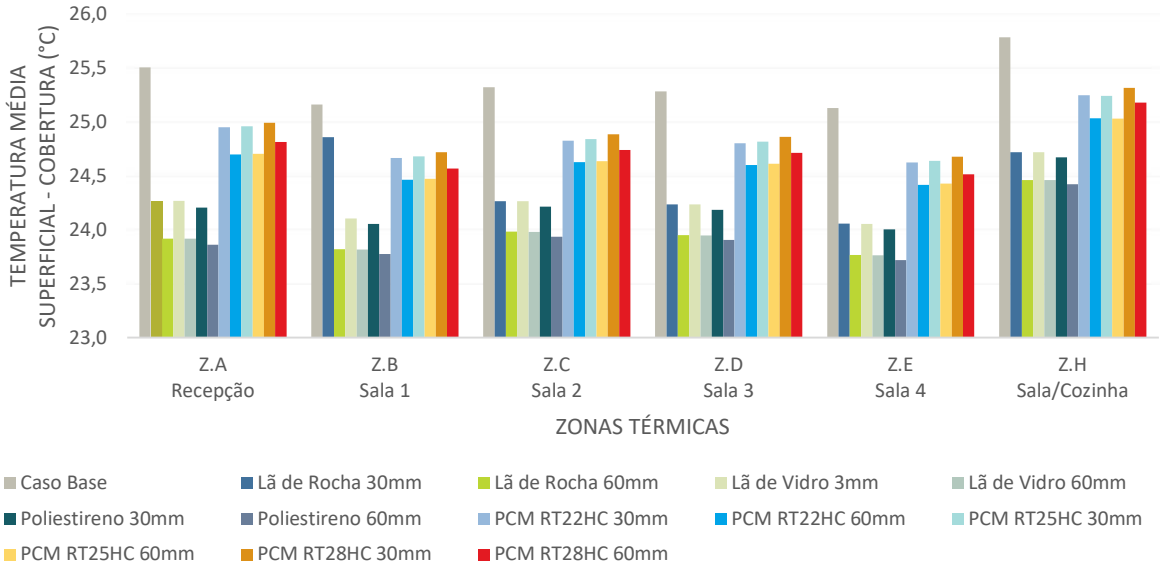


Fonte: os autores.

O mesmo pode ser observado na Figura 5, referente à casa 2. Para os PCMs, vemos uma redução menos significativa das temperaturas superficiais. A saber, o PCM com melhor desempenho foi o RT25HC de 60mm, com decréscimo de 2.7% na média de temperatura anual. De acordo com Auzeby et al. [21], o implemento de PCMs é desejável principalmente em edificações leves, de baixa inércia térmica. Em

edificações como as da DVP-UFV, com paredes pesadas e cobertura leve, os PCMs assumem características mais próximas a isolantes térmicos, auxiliando pouco no aumento de inércia.

Figura 5: Temperatura superficial interna (Coberturas) por ambiente da Casa 2



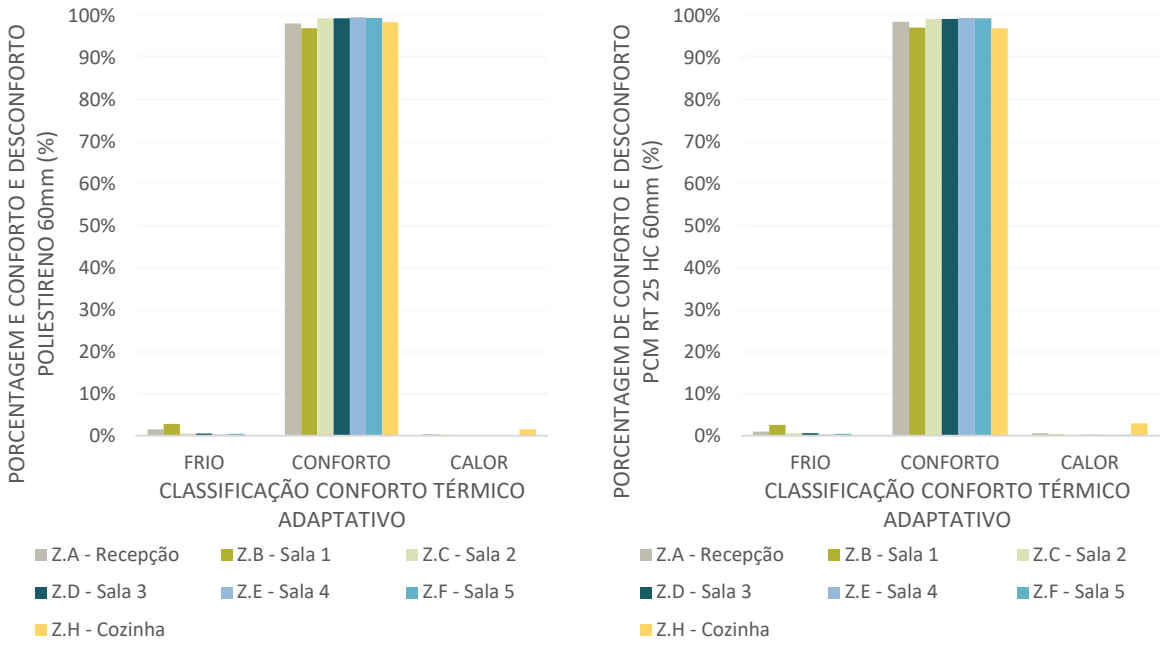
Fonte: os autores.

O uso do Poliestireno de 60mm resultou em 5.6% de redução da temperatura superficial média enquanto o PCM RT25HC foi responsável por 2.8%. Embora uma análise de custo-benefício e retorno financeiro não faça parte do nosso escopo, considerando a disponibilidade comercial e o desempenho dos isolantes comparados aos PCMs, o mais indicado seria adotar o Poliestireno de 60mm em todas as coberturas.

O uso inadequado de isolantes térmicos para um espaço com alta porcentagem de conforto pode acarretar aumento do desconto por frio. Por isso, apresentamos o resultado das simulações (com uso de isolantes e PCMs como discutido anteriormente para temperatura superficial) para conforto térmico adaptativo na Figura 6. Como a simulação convergiu para resultados semelhantes para as duas casas, apresentamos análises visuais apenas para a casa 1. Assim, as análises feitas baseado na Figura 6 valem também para o caso omitido.

A porcentagem de horas em conforto para o isolamento de Poliestireno aumentou em todas as simulações, com os melhores casos atingindo 100% de conforto. A maior redução aconteceu para a zona 'f', sala 5. Os demais espaços atingiram porcentagem mínima de conforto de 97%, referente à zona 'b' (sala 1) anteriormente indicado como o maior caso de desconforto por calor na Figura 5.

Figura 6: Conforto térmico adaptativo utilizando Poliestireno 60mm e PCM RT25HC 60mm



Fonte: os autores.

Utilizando o PCM, a melhora no conforto térmico é de 99.5% para a zona 'e'. Essa zona possui a mesma orientação solar de paredes e de cobertura da zona 'f', indicada como melhor caso para aplicação de Poliestireno. A porcentagem mínima de conforto também é de 97%, agora para a zona 'h'. Os gráficos são similares e os valores de desconforto são pouco representativos. A zona 'h' só aparece com 3% de desconforto para calor devido à alta exposição às orientações Norte, Noroeste, Oeste e Sudoeste, com a cobertura voltada para Noroeste.

CONCLUSÕES

Neste trabalho realizamos levantamentos *in loco* e simulações térmicas para obtenção de conforto térmico adaptativo e temperaturas superficiais internas para auditoria térmica de duas edificações institucionais de assistência à saúde a fim de promover melhoria do desconforto. Adotamos estratégias passivas de isolamento e aumento da inércia térmica, realizando apenas alterações internas para preservação do contexto modernista local. As alterações envolveram o emprego de isolantes térmicos convencionais (lã de rocha e de vidro e poliestireno) e Materiais de Mudança de Fase (PCMs). Avaliamos doze opções de materiais para cada caso, modificando as espessuras elencadas. Ambos modelos se comportaram de forma semelhante devido à pouca variabilidade de parâmetros geométricos e de contorno. Sendo assim, o melhor resultado para os dois casos ocorre com aplicação do isolamento convencional de Poliestireno de 60mm, reduzindo as temperaturas superficiais em até 5.5% e aumentando em até 4% o índice de conforto. A indicação para ambas as casas é o emprego do Isolamento de Poliestireno de 60mm devido à maior disponibilidade, menor preço e melhores resultados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) – Demanda Universal 001/2021, Código de Financiamento APQ-00266-21.

REFERÊNCIAS

[1] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. In Press.

[2] ABRAHÃO, K. C. F. J.; SOUZA, R. G. V. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído,** Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 383-408, 2021. DOI: 10.1590/s1678-86212021000200532.

[3] FILIPPINI, L.; SARTORI, G.; TORRES, M. Análise do Impacto de Materiais de Mudança de Fase no Conforto Térmico de Escola Pública através de Simulação Computacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18, 2020, Porto Alegre. **Anais**[...] Porto Alegre: ANTAC, 2020.

[4] RUBITHERM GMBH. Rubitherm Phase Change Materials. Disponível em: < https://www.rubitherm.eu/>. Acesso em: 23/01/2022.

[5] CARVALHO, M.; MICHALOSKI, A. Fatores que influenciam no conforto térmico no ambiente do trabalho: uma revisão sistemática. 2018. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

[6] QUADROS, B. M. de; MIZGIER, M. O. Conforto térmico em ambientes de internação hospitalar naturalmente ventilado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 113-134, abr./jun. 2020. DOI: 10.1590/s1678-86212020000200391.

[7] CHRISTOPOULOS, S. Desempenho térmico e eficiência energética em ambiente hospitalar: estudo da fachada do setor de internação do Hospital do Coração em Maceió. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

[8] NATEPHRA, W.; MOTAMEDI, A.; YABUKI, N.; FUKUDA, T. Integrating 4D thermal information with BIM for building envelope thermal performance analysis and thermal comfort evaluation in naturally ventilated environments. **Building and Environment,** v. 124, p. 194-208. 2017. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.08.004.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220:** Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

[10] FERREIRA, A.; NÓVOA, P.; MARQUES, A. Multifunctional material systems: a state-of-the-art Review. **Composite Structures,** v. 151, p. 3-35, 2016. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.01.028.

[11] KENZHEKHANOV, S.; MEMON, S.; ADILKHANOVA, I. Quantitative evaluation of thermal performance and energy saving potential of the building integrated with PCM in a subarctic climate. **Energy,** v. 192, p. 116607, 2020. DOI: https:10.1016/j.energy.2019.116607.

[12] SHARMA, V.; RAI, A. C. Performance assessment of residential building envelopes enhanced with phase change materials**. Energy and Buildings,** v. 208, p. 109664, 2020. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109664.

[13] WEBER, F. Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para uso no programa EnergyPlus. (2018). 103 f. Monografia (Engenharia Civil) - Centro Tecnológico Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

[14] AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, ASHRAE. **Standard 140:** Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta, 2020.
[15] MELO, A.; WESTPHAL, F.; MATOS, M. Apostila Do Curso Básico Do Programa EnergyPlus. Florianópolis, p. 24, 2009. Publicação disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf>. Acesso em: 23/01/2022.
[16] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - INMETRO, Qualidade e Tecnologia: Tabelas de Consumo/eficiência energética. Publicação disponível em:< http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>. Acesso em: 24/01/2022.
[17] MAGENDRAN, S.; KHAN, F.; MUBARAK, N.; VAKA, M.; WALVEKAR, R.; KHALID, M.; ABDULLAH, E.; NIZAMUDDIN, S.; KARRI, R. Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. **Nano-structures & Nano-objects,** v. 20, p.1-18, 2019. DOI: 10.1016/j.nanoso.2019.100399.
[18] AL-JANABI, A.; KAVGIC, M. Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: A case study. **Applied Thermal Engineering**, v.162, p.114222, 2019. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114222.
[19] TABARES-VELASCO, P.; CHRISTENSEN, C.; BIANCHI, M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment,** v. 54, p. 186-196, 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.02.019.
[20] AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, ASHRAE. **Standard 55:** Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2020.
[21] AUZEBY, M.; SHEN, W.; UNDERWOOD, V.; TINDALL, J.; CHEN, C.; LING, H.; BUSWELL, R. Effectiveness of Using Phase Change Materials on Reducing Summer Overheating Issues in UK Residential Buildings with Identification of Influential Factors. **Energies,** v. 9, n. 605, p. 1-16, 2016. DOI: 10.3390/en9080605.