XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Mudança climática em Belo Horizonte/MG e as implicações nas recomendações de projeto

Cambio climático en Belo Horizonte/Mg e implicaciones para las recomendaciones de diseño

Climate change in Belo Horizonte/MG and implications for design recommendations

Desempenho térmico do ambiente construído

Carneiro, Amanda

Graduanda, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, amandamedeiroscarneiro@gmail.com

Alves, Luisa

Graduanda, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, luisacristinasilvaalves@gmail.com

Geraldo, Beatriz

Graduanda, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, beatriz.avidago@gmail.com

Ferreira, Camila

Doutora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil,

camilaccferreira@yahoo.com.br

Resumo

Diante das mudanças climáticas e do constante aumento das temperaturas, este artigo analisa o comportamento térmico de uma edificação residencial em Belo Horizonte/MG, avaliando as dinâmicas térmicas e possíveis impactos no conforto ambiental e possíveis alterações das recomendações de projeto ao longo do tempo, com o intuito de antecipar a sua implementação e assim, minimizar os efeitos climáticos na capital mineira. Para isso, foram utilizados arquivos climáticos dos períodos passado, presente e futuro, por meio de simulações termoenergéticas no EnergyPlus. A escolha dos períodos considerou a disponibilidade dos arquivos climáticos para diferentes cenários temporais, permitindo avaliar a modificação ou permanência das estratégias de projeto ao longo dos anos. Os resultados apontam um aumento significativo no desconforto térmico por calor e redução das horas em conforto para o clima futuro e a inércia térmica como uma estratégia mais efetiva para a adaptação das edificações às mudanças climáticas para o clima analisado.

Palavras-chave: Mudança climática. Conforto térmico. Recomendações de projeto arquitetônico. Estratégias passivas.

Resumen

Ante el cambio climático y el constante aumento de las temperaturas, este artículo analiza el comportamiento térmico de un edificio residencial en Belo Horizonte/MG, evaluando la dinámica térmica y los posibles impactos en el confort ambiental, así como los posibles cambios en las recomendaciones de diseño a lo largo del tiempo, con el objetivo de anticipar su implementación y, así, minimizar los efectos climáticos en la capital de Minas Gerais. Para ello, se utilizaron archivos climáticos del pasado, presente y futuro, mediante simulaciones termoenergéticas en EnergyPlus. La elección de los períodos consideró la disponibilidad de archivos climáticos para diferentes escenarios temporales, lo que permitió evaluar la modificación o permanencia de las estrategias de diseño a lo largo de los años. Los resultados indican un aumento significativo del malestar térmico debido al calor y una reducción de las horas de confort para el clima futuro, y la inercia térmica como una estrategia más eficaz para la adaptación de los edificios al cambio climático en el clima analizado.

Palabras clave: Cambio climático. Confort térmico. Recomendaciones de diseño arquitectónico. Estrategias pasivas.

Abstract

Faced with climate change and the constant increase in temperatures, this article analyzes the thermal behavior of a residential building in Belo Horizonte/MG, evaluating thermal dynamics and possible impacts on environmental comfort and possible changes to design recommendations over time, with the aim of anticipating their implementation and thus minimizing climate effects in the capital of Minas Gerais. For this purpose, climate files from the past, present and future periods were used, through thermoenergetic simulations in EnergyPlus. The choice of periods considered the availability of climate files for different temporal scenarios, allowing the evaluation of the modification or permanence of design strategies over the years. The results indicate a significant increase in thermal discomfort due to heat and a reduction in hours of comfort for the future climate and thermal inertia as a more effective strategy for adapting buildings to climate change for the climate analyzed.

Keywords: Climate change. Thermal comfort. Architectural project recommendations. Passive strategies

Introdução

O aumento das temperaturas em efeito combinado com as ilhas de calor urbano têm implicado em um aumento da demanda de energia elétrica para condicionamento artificial de edificações em territórios urbanos (SANTAMOURIS *et al.*, 2015). Para o ano de 2023, a participação do parque edificado no consumo total de energia elétrica no Brasil foi de 51,8%, sendo que desse total, 27,5% podem ser atribuídos às edificações residenciais (EPE, 2024). Ao mesmo tempo, há uma perspectiva de um avanço de 5,4% ano da demanda de energia devido ao uso de condicionadores de ar no setor residencial até 2035 (EPE, 2018). As soluções de condicionamento passivo para edifícios residenciais são essenciais para garantir o conforto térmico e melhorar a eficiência energética diante dos desafios climáticos urbanos.

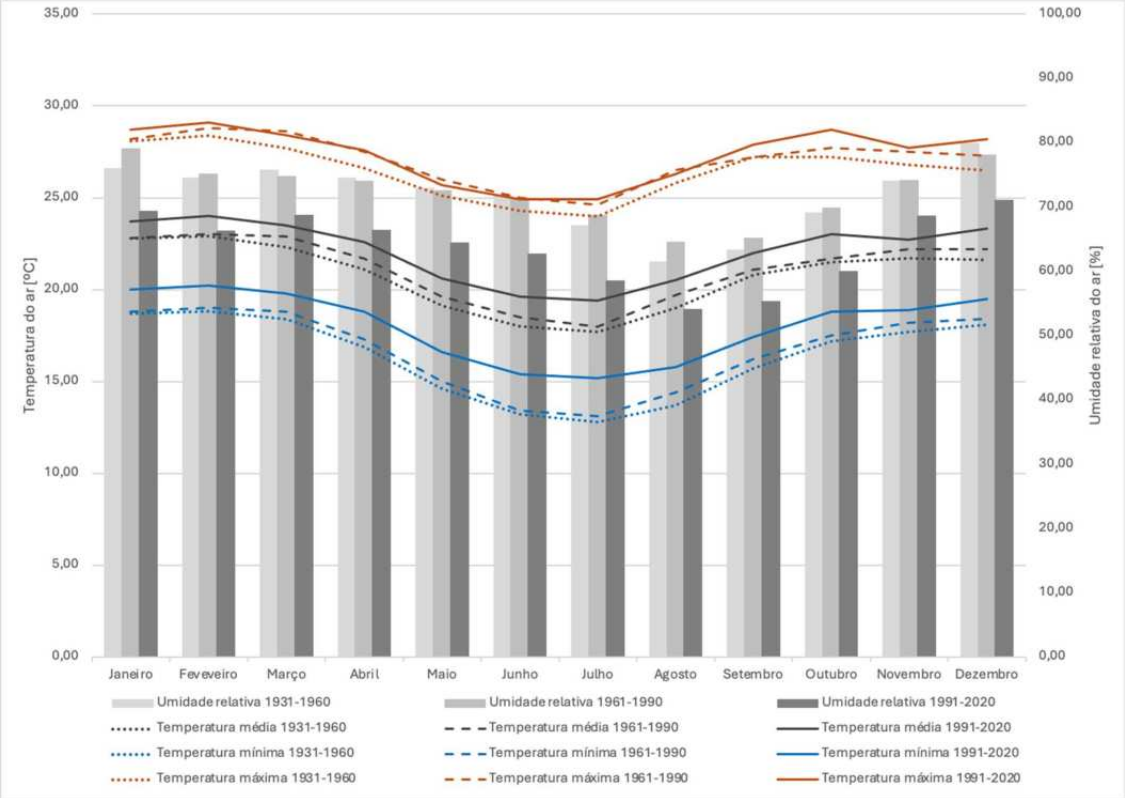
Diante desse cenário, diversos estudos têm buscado entender o impacto de diferentes soluções construtivas no desempenho térmico das edificações, considerando tanto o contexto atual como futuro. Faorlin et al. (2024) analisaram o desempenho térmico de uma habitação unifamiliar em São Paulo/SP, comparando duas envoltórias: uma de concreto e outra de *steel frame*. A envoltória de concreto teve maior carga térmica total, mas temperaturas máximas mais baixas que a de *steel frame* (FAORLIN *et al.*, 2024). Em Cuiabá/MT, um estudo similar mostrou que o uso de paredes isolantes aumentou em cerca de 10% as horas de conforto em relação à alvenaria convencional. (GUARDA, DOMINGOS e SANCHES, 2024). Estes estudos sugerem a importância de análises de recomendações de projeto para o momento atual e futuro.

Neste contexto, destaca-se a cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, como uma das capitais brasileiras com maior aumento da temperatura nos últimos anos. Dados climáticos para os períodos das Normais Climatológicas de 1931 a 1960, 1961 a 1990 e 1991 a 2020 (Figura 1) mostram que as temperaturas média, mínima e máxima aumentaram cerca de 1°C entre os períodos de 1961 a 1990 e de 1991 a 2020. Além disso, a umidade relativa do ar, especialmente em outubro, diminuiu consideravelmente, com uma redução de 9,9% em comparação ao período anterior.

Ferreira, Loura e Assis (2024) avaliaram as alterações no conforto térmico ao longo de uma década para Belo Horizonte em edificações residenciais. As autoras concluíram que houve uma

diminuição das horas de conforto ao longo de 2011 a 2023 de forma geral e em especial nas edificações multifamiliares (FERREIRA, LOURA e ASSIS, 2024).

Figura 1: Dados Climáticos das Normais Climatológicas para a cidade de Belo Horizonte para os períodos de 1931-1960, 1961-1990 e 1991-2020



Fonte: as autoras.

Objetivo

O presente trabalho propõe-se a analisar o impacto das alterações de temperatura e umidade nas recomendações de projeto de edificações residenciais para a cidade de Belo Horizonte.

Metodologia

O estudo foi realizado a partir da análise da relação entre as condições climáticas pretéritas (2003 a 2017), atuais (2009 a 2023) e as projeções indicadas no arquivo climático futuro, 2036 a 2065,

conforme a disponibilidade de arquivos climáticos, de Belo Horizonte e as recomendações de projeto para o clima local. Dessa forma, a partir de um estudo de caso, foram utilizados três arquivos climáticos que representassem os diferentes períodos para a cidade de Belo Horizonte, sendo seus dados aplicados em simulações de desempenho térmico para a verificação dos impactos das mudanças climáticas na cidade.

Estudo de caso

Para investigar as implicações das mudanças climáticas nas recomendações de projeto em Belo Horizonte/MG, foi selecionado uma tipologia representativa para a cidade em análise a ser utilizada como estudo de caso. Esta definição foi baseada em estudos de levantamento do setor residencial brasileiro (TELLES, 2016). O modelo escolhido consiste em uma residência multifamiliar de quatro pavimentos com quatro unidades por pavimento, constituída por sala de estar integrada à cozinha e área de serviço, um banheiro, um dormitório e uma suíte, além de uma pequena sacada, conforme planta representada na Figura 2 a seguir.

Figura 2: Estudo de caso (A) planta da unidade habitacional e (B) planta do pavimento tipo.



(A) (B)

Fonte: Adaptado de Telles (2016).

Simulações

A análise do comportamento térmico do estudo de caso foi executada no programa EnergyPlus© versão 23.1.0. Cada ambiente foi considerado uma zona térmica individual, sendo os resultados solicitados para os ambientes de permanência prolongada. O modelo de simulação seguiu as

características e dimensões do projeto apresentado na Figura 2. Foram analisados três pavimentos: o térreo, um intermediário e o superior.

A constituição das envoltórias caracterizada no programa EnergyPlus© foram a cobertura composta por telha metálica com poliestireno expandido (EPS 4cm), laje pré-moldada (12cm) formada por concreto (4cm), EPS (7cm) e argamassa (1cm) (U = 0,53 W/m^{2}K e CT = 176 kJ/m^{2}K) e dois tipos de paredes externas, sendo uma delas de concreto maciço (10cm) sem revestimentos (U = 4,40 W/m^{2}K e CT = 240 kJ/m^{2}K), e a outra com função isolante (11,25 cm), constituída por uma placa de gesso (1,25 cm), lã de rocha (9 cm) e uma placa cimentícia (1 cm) (U = 0,45 W/m^{2}K e CT = 33 kJ/m2K). Além disso, o vidro usado nas aberturas foi o vidro comum de espessura 3 mm. As características termofísicas dos materiais estão indicadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** abaixo.

Tabela 1: Características dos materiais usados nas simulações

Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade	Calor específico [J/kg.m]	Resistência térmica [m.K/W][1]
Telha metálica	0,001	55	7800	460	
Concreto maciço	0,100	0,97	1800	1000	
Placa gesso	0,0125	0,35	900	870	
Placa cimentícia	0,010	0,13	550	960	
Concreto laje	0,040	1,75	2200	1000	
Argamassa laje	0,010	1,15	2000	1000	
Lã de rocha	0,090	-	-	-	0,90
EPS	0,040	-	-	-	2,00
EPS	0,070	-	-	-	2,00

[1] Para materiais isolantes apenas com entrada de dados no objeto "*Material No Mass*" no EnergyPlus.

Fonte: as autoras.

A ventilação natural foi modelada no módulo "*Airflow Network*" do programa e o controle do modo de ventilação aplicado foi o da ASHRAE 55, o que significa que as janelas e portas, durante 24h em todos os espaços da edificação, serão consideradas abertas somente se as temperaturas dentro dos ambientes estiverem superiores aos níveis de conforto. Os coeficientes de pressão foram calculados pelo programa. Os coeficientes de descarga adotados foram de 0,65 para as portas e de 0,60 para as janelas, valores recomendados para as aberturas adotadas.

O padrão das cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos) embasou-se na referência da ABNT NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Arquivos climáticos

Para analisar diferentes períodos temporais e identificar as possíveis mudanças no clima de Belo Horizonte foram empregues os arquivos climáticos disponíveis no formato TMY para três períodos distintos, os quais são: 2003 a 2017 como representação do período pretérito, 2009 a 2023 como representação do período presente e 2026 a 2065 como representação do clima futuro. Os períodos foram definidos conforme a disponibilidade de arquivos climáticos para a cidade. Os dois primeiros foram arquivos obtidos na base de dados do *Climate OneBuilding*[1] da estação do Carlos Prates, região essa com maior adensamento. Já o arquivo futuro foi gerado a partir do arquivo TMY de 2009 a 2023 com o Future Weather Generator versão 2.2.0 para o cenário SSP1-4.5.

Recomendações pelas simulações

As recomendações das envoltórias serão efetuadas com base na análise das horas de conforto anuais conforme o modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). Para isso, foram utilizados dados de temperatura neutra de conforto, temperatura operativa interna e temperatura externa do ar, em intervalos horários. A partir desses dados, a faixa de conforto foi estabelecida e comparada com as temperaturas operativas para determinar a condição de conforto. O modelo de conforto utilizado foi o da ASHRAE 55, com uma faixa de conforto de 80%, ajustada conforme a velocidade do ar interno.

Resultados

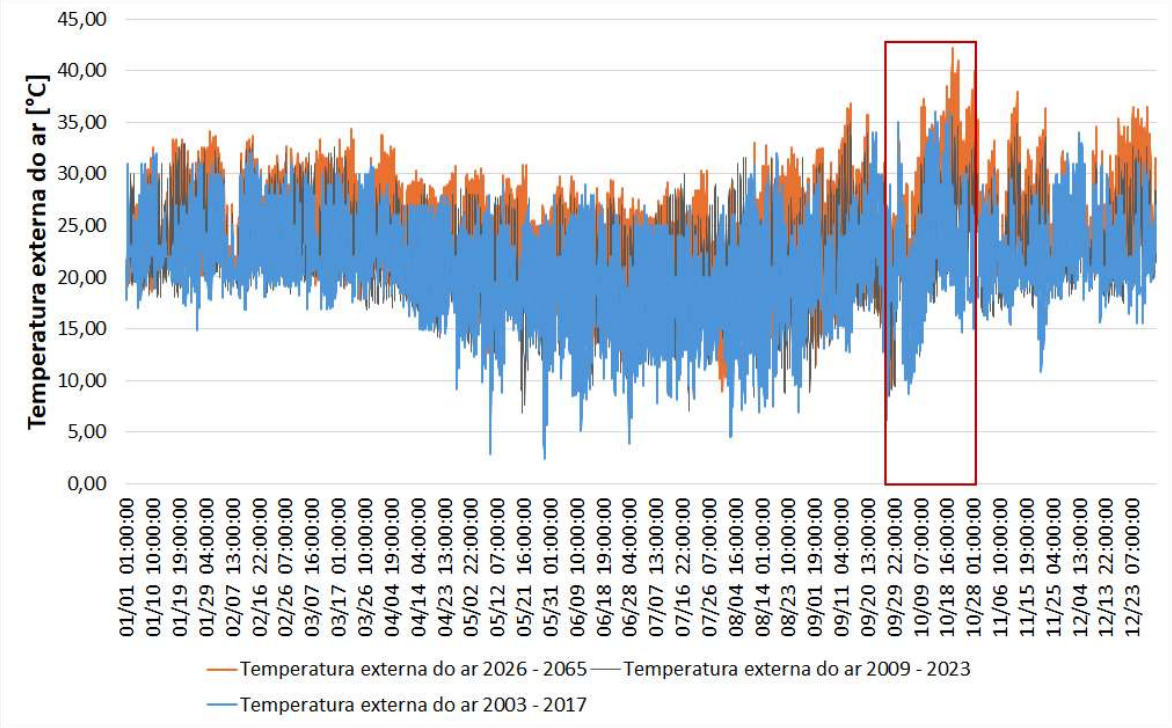
As temperaturas externas do ar, em °C, para cada um dos períodos (pretérito, presente e futuro) são apresentadas na Figura 3. O período pretérito (2003 a 2017) está representado pela linha azul, o período presente em linha cinza (2009 a 2023) e o período futuro em linha laranja (2026 a 2065).

Nota-se haver um aumento nas temperaturas mais baixas e assim como nas temperaturas mais altas entre os períodos. No caso desta última, este aumento sobressai no mês de outubro (destacado em vermelho) quando as temperaturas estão em ascensão e a umidade ainda baixa.

[1] https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html#IDMG_Minas_Gerais-7

Para o período pretérito, a temperatura média anual foi de 20,9°C, a menor temperatura registrada foi de 2,5°C e a maior de 36,0°C. Já para o período presente os valores encontrados foram de 21,8°C, 6,9°C e 35,6°C, respectivamente. Por fim, para o período futuro as temperaturas foram 23,4°C, 8,6°C e 42,3°C. É perceptível um aumento progressivo das temperaturas médias anuais entre os períodos, assim como o aumento significativo do menor valor do período pretérito para o presente e da maior temperatura do período presente em relação ao período futuro, tendência essa também observada pelos dados das Normais Climatológicas.

Figura 3: Temperatura externa do ar para o período pretérito, presente e futuro

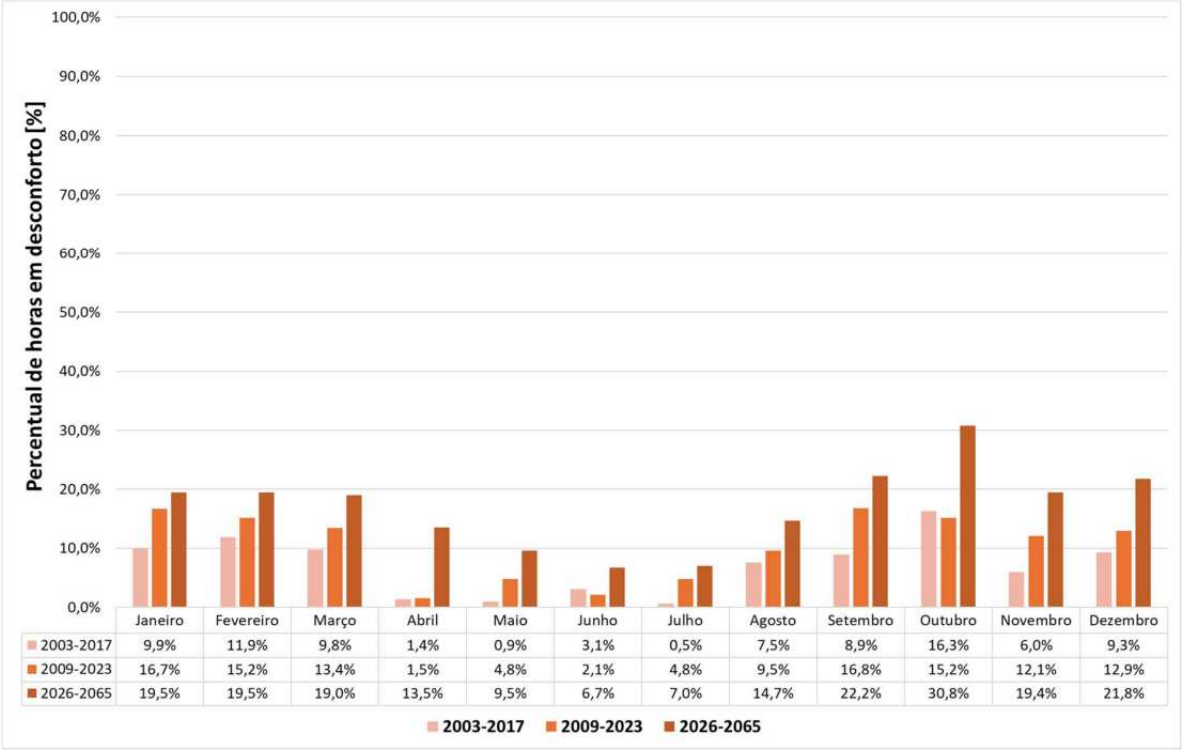


Fonte: Autoras

A avaliação das horas de desconforto térmico por calor também indicou tendências significativas ao longo do tempo. Para o período de 2003-2017, as horas de desconforto a partir da temperatura externa representam 7,1% do ano, para 2009-2023 representam 10,4% do ano e para 2050 representam 17,0% do ano, revelando um aumento expressivo.

O percentual de horas em desconforto por meses é mostrado na Figura 4 e permite identificar padrões a partir da variação dos períodos do ano. Os períodos pretérito, presente e futuro são representados em ordem crescente da cor mais clara para a mais escura, respectivamente. Nesse sentido, há uma tendência constante de aumento entre os três períodos e que segue padrões conforme a temperatura e umidade características de cada estação. De maio a junho, tem-se os menores percentuais de desconforto, uma vez que são caracterizados como períodos frios, com umidade baixa e uma temperatura média reduzida. Todavia, esses percentuais mínimos seguem um crescimento. Há uma intensificação dessa conjuntura em períodos de transição como abril e outubro, que apresentam as maiores variações percentuais. No mês de outubro, especificamente, o período futuro apresentou um pico de 30,8%, um aumento de metade do percentual em relação aos períodos anteriores. Já no mês de abril, a variação do período futuro indica um aumento dez vezes maior. Portanto, fica evidente que o aumento das temperaturas médias influencia de maneira proporcional no aumento das horas de desconforto por calor.

Figura 4: Horas de desconforto por calor a partir da temperatura externa

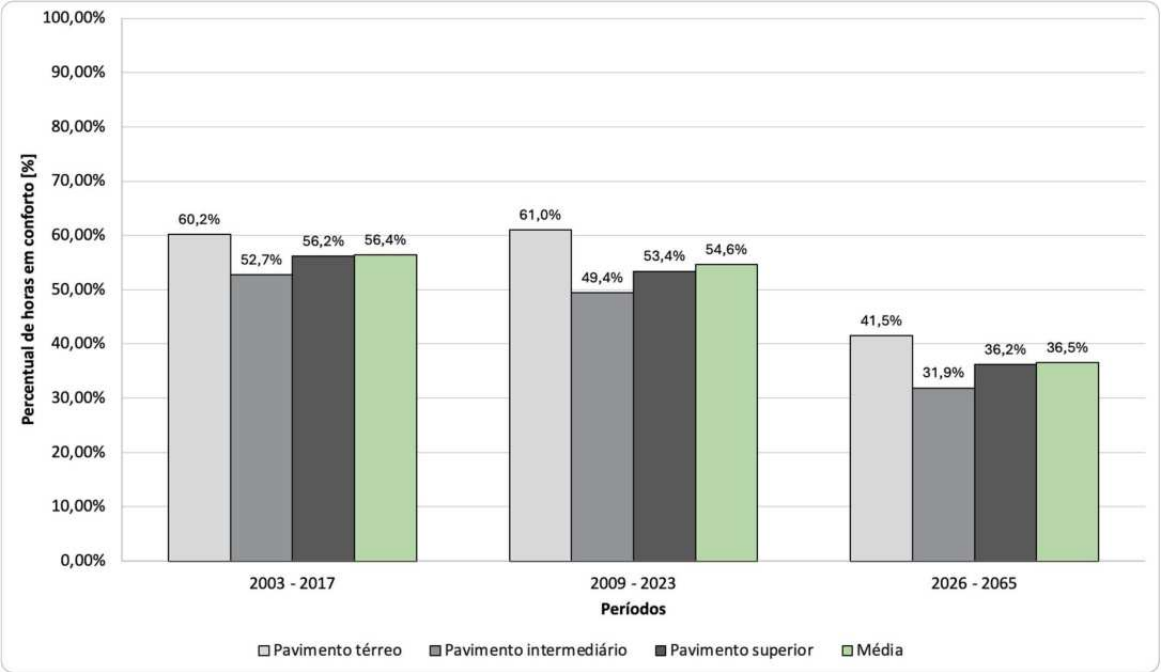


	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
2003-2017	9,9%	11,9%	9,8%	1,4%	0,9%	3,1%	0,5%	7,5%	8,9%	16,3%	6,0%	9,3%
2009-2023	16,7%	15,2%	13,4%	1,5%	4,8%	2,1%	4,8%	9,5%	16,8%	15,2%	12,1%	12,9%
2026-2065	19,5%	19,5%	19,0%	13,5%	9,5%	6,7%	7,0%	14,7%	22,2%	30,8%	19,4%	21,8%

Fonte: Autoras

Como produto dos resultados obtidos pelas análises do desempenho das duas envoltórias propostas, serão apresentados dois gráficos, um deles exibindo as porcentagens de horas em conforto da edificação simulada com a parede de concreto maciço (Figura 5), e o outro revelando as porcentagens relacionadas à parede isolante (Figura 6) para os três períodos de interesse. Os três pavimentos analisados são indicados no gráfico como: primeiro pavimento em cinza claro, o pavimento intermediário em cinza médio e o pavimento superior em cinza escuro. Além disso, a média entre os pavimentos de cada período temporal estudado foi representada graficamente pela cor verde.

Figura 5: Percentual de horas em conforto para a parede de concreto maciço nos períodos pretérito, presente e futuro.

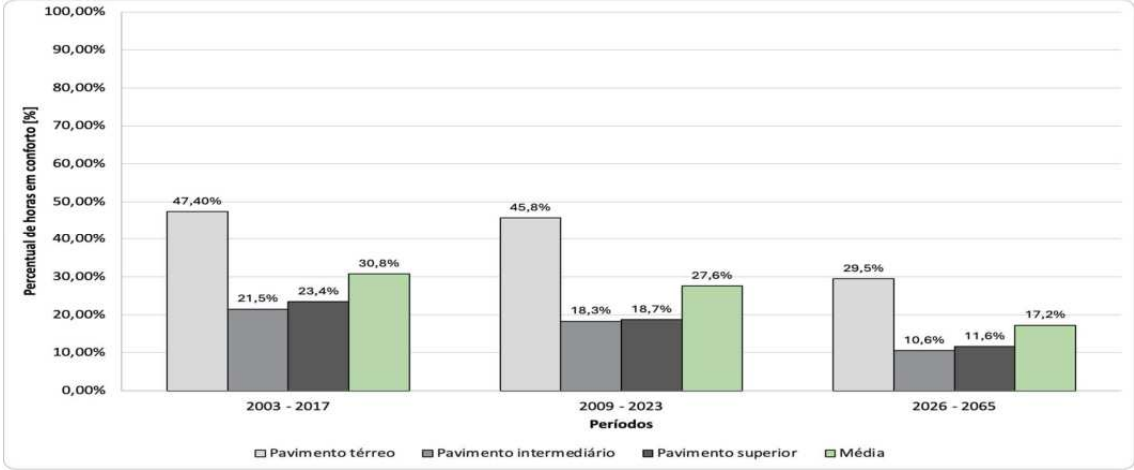


Fonte: as autoras.

Os resultados dos percentuais de horas de conforto obtidos para o estudo de caso com paredes de concreto indicaram que, nos três períodos analisados, o primeiro pavimento apresenta melhor conforto devido ao contato com o solo, enquanto o pavimento intermediário apresenta o menor percentual de conforto. Ao comparar os três períodos, observa-se uma pequena redução nas horas de conforto entre os períodos passado e presente, mas uma diferença significativa entre os períodos de 2009-2023 e 2026-2065, indicando uma diminuição gradual do conforto ambiental

na edificação. Resultados semelhantes foram observados para as paredes isolantes, com maior redução no percentual de conforto entre os períodos presente e futuro, em comparação com os períodos passado e presente.

Figura 6: Percentual de horas em conforto para a parede de materiais isolantes nos períodos pretérito, presente e futuro.



Fonte: as autoras.

Comparando as duas envoltórias, para os períodos analisados, as paredes isolantes apresentaram uma redução considerável nas horas de conforto. No período atual, foi em média de 54,6% de horas de conforto para paredes de concreto e 28,0% para paredes isolantes. No período futuro, com temperaturas mais elevadas, mantém-se a mesma tendência (36,5% em média para a primeira face a 17,0% para a segunda). Os resultados obtidos por simulação comprovam a relevância da inércia térmica das paredes, maior do que o isolamento, para o estudo de caso e clima analisado. O motivo desse fato seria que, com a redução da umidade do ar, há um aumento da amplitude térmica diária, favorecendo o uso da inércia térmica e, como efeito disso, diminuindo a amplitude térmica interna.

Contrapondo as duas paredes analisadas, voltando o foco à diferença das propriedades termofísicas destas, enquanto a parede constituída somente de concreto maciço possui baixo isolamento (U = 4,40 W/m^{2}K) e maior inércia térmica (CT = 240 kJ/m^{2}K), a parede com uma camada de lã de rocha possuir um alto isolamento térmico (U = 0,53 W/m^{2}K) e uma inércia térmica intermediária (CT = 176 kJ/m^{2}K) e menor que a parede de concreto. O resultado revela

que, com condicionamento passivo, como foi considerado na simulação realizada, o isolamento térmico das envoltórias não foi um benefício no clima da localidade examinada, mas sim uma desvantagem, já que em todos os períodos, o percentual de horas em conforto da parede isolante foi pelo menos 12% menor que a parede de concreto, que nem mesmo argamassa interna e externa possui.

Logo, conclui-se que o isolamento térmico de envoltórias, na cidade de Belo Horizonte, não é a melhor solução para o aumento do conforto ambiental dos edifícios, e sim o uso de inércia térmica. Isso porque a inércia térmica, em um clima tropical quente e seco prolongado como o da região, responde melhor para o caso de condicionamento passivo. O motivo desse fato seria que, com a umidade do ar mais baixa, o calor atmosférico ocasiona o aquecimento do ar no período do dia e resfriamento no período da noite, o que aumenta a amplitude térmica diária, favorecendo o uso da inércia térmica para resfriamento durante o período do dia com as temperaturas mais altas e aquecimento da edificação no período da noite com temperaturas mais amenas e, como efeito disso, diminuindo a amplitude térmica interna.

Conclusão

Entender o comportamento térmico das edificações residenciais diante da mudança climática é crucial. Este estudo analisou como as variações de temperatura e umidade afetam as recomendações de projeto em Belo Horizonte. Utilizando simulações observou-se um aumento de temperaturas do ar, especialmente nos meses de setembro e outubro, o que incrementa o desconforto térmico. Foram simulados dois tipos de envoltórias para uma mesma edificação, mostrando que as paredes pesadas melhoram o conforto térmico diante das temperaturas crescentes, mais do que uma parede isolante, tanto para o período presente quanto futuro. Para a edificação e clima analisado, a inércia térmica apresentou-se como uma estratégia de condicionamento passivo mais efetiva para a adaptação da edificação às mudanças climáticas.

Referências bibliográficas

ABNT. **NBR 15.575**: Edifícios Habitacionais - Desempenho parte 1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA

TÉCNICAS. Rio de Janeiro. 2021.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Atlanta. 2017.

EPE. **Nota Técnica EPE 030/2018:** Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em enficiência energética. EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 43. 2018.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2024:** Ano base 2023. EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Rio de Janeiro. 2024.

FAORLIN, M. N. et al. Projeções futuras: Desempenho térmico de duas envoltórias para uma habitação unifamiliar em São Paulo. In: E**ncontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Maceió: ANTAC. 2024.

FERREIRA, C. C.; LOURA, R. M.; ASSIS, E. S. D. Alterações no conforto térmico de edificações residenciais ao longo de uma década em Belo Horizonte (MG). In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**. Maceió: ANTAC. 2024.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. D. Estudo do clima brasileiro: reflexão sobre a adaptação climática e recomendações arquitetônicas a partir das Tabelas de Mahoney. In: **Encontro Nacional e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Cosntruído**. Palmas: ANTAC. 2021. p. 949-957.

GUARDA, E. L. A. D.; DOMINGOS, R. A. A.; SANCHES, J. C. M. Impactos das Mudanças Climáticas em uma Habitação de Interesse Social em Cuiabá-MT. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**. Maceió: ANTAC. 2024.

HARRIS, A. L. N. D. C. **Metodologias baseadas na Teoria dos Sistemas Nebulosos (Fuzzy Systems Theory) para o Tratamento das Informações Subjetivas do Projeto Arquitetônico**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 160. 1999.

SANTAMOURIS, M. et al. On the impact of urban heat island and global warming on the power powerdemand and electricity consumption of buildings—A review. **Energy and Buildings**, 98, 2015. 119-124.

TELLES, C. D. P. **Proposta de simplificação do RTQ-R**. Mestrado -Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 118 p. 2016.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais e do CNPq para o desenvolvimento desta pesquisa.