ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE SISTEMAS DE PAREDE: DESEMPENHO TÉRMICO, CUSTO E CO_2 INCORPORADO

MULTICRITERIA ANALYSIS OF WALL SYSTEMS: THERMAL PERFORMANCE, COST, AND EMBODIED CO_2

Vítor Freitas Mendes [1]; Poliana Evangelista Arcanjo [2]; Marcos Paulo Costa Tavares [3]; Alexandre Santana Cruz [4]; Júlia Castro Mendes [5].

[1]Doutorando | vitor.mendes@ifmg.edu.br | IFMG | Sta. Luzia, Brasil; [2]Graduanda em Eng. Civil | polyarcanjo19@gmail.com | IFMG | Sta. Luzia, Brasil; [3]Graduando em Eng. Civil | marcos0268@gmail.com | IFMG | Sta. Luzia, Brasil; [2]Doutorando | alexandre.cruz@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; [3]Doutora | juliacastro.mendes@ufjf.br | UFJF | Juiz de Fora, Brasil.

Resumo:
Este estudo avaliou o desempenho térmico, econômico e ambiental de quatro sistemas de parede (cerâmico estrutural, cerâmico de vedação, concreto estrutural e concreto de vedação) aplicados a uma edificação unifamiliar simulada em três cidades brasileiras representativas de diferentes zonas bioclimáticas. Foram utilizadas simulações termoenergéticas com base nos métodos de Carga Térmica (CT), Graus-Hora (GH) e Autonomia Térmica (AT), com análises realizadas tanto em horário de ocupação quanto de forma contínua. O bloco cerâmico de vedação apresentou os melhores indicadores térmicos, com redução de até 8,7% em GH e 9,5% em CT, mas também os maiores custos e emissões de CO_2 incorporado. O bloco cerâmico estrutural, por sua vez, destacou-se como a solução mais equilibrada, com redução de até 64% no custo de aquisição e 19,9% nas emissões, mantendo desempenho térmico intermediário. A análise multicritério, considerando dois cenários de ponderação, confirmou sua superioridade em termos de custo-benefício. Concluiu-se que a escolha do sistema de parede impacta a sustentabilidade e o conforto térmico da edificação.

Palavras-chave:
Simulação termoenergética; Desempenho passivo; Zoneamento bioclimático; Materiais de construção; Eficiência energética.

Abstract:
This study evaluated the thermal, economic, and environmental performance of four wall systems (structural ceramic, non-structural ceramic, structural concrete, and non-structural concrete) applied to a single-family residence simulated in three Brazilian cities representing different bioclimatic zones. Thermo-energetic simulations were conducted using the Cooling Load (CT), Degree-Hours (GH), and Thermal Autonomy (AT) methods, with analyses performed both during occupancy hours and continuously throughout the year. The non-structural ceramic block showed the best thermal indicators, with reductions of up to 8.7% in GH and 9.5% in CT, but also had the highest acquisition costs and embodied CO_2 emissions. The structural ceramic block, in turn, stood out as the most balanced solution, with up to 64% reduction in acquisition cost and 19.9% in emissions, while maintaining intermediate thermal performance. The multicriteria analysis, considering two weighting scenarios, confirmed its superiority in terms of cost-benefit. The study concludes that wall system selection plays a critical role in building sustainability and thermal performance.

Keywords:
Thermal simulation; Passive performance; Bioclimatic zoning; Building materials; Energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil exerce um impacto significativo sobre o meio ambiente, sendo responsável por grande parte do consumo de recursos naturais, demanda energética e emissões de gases de efeito estufa (Lopes *et al.*, 2023). Nesse cenário, a escolha de materiais e soluções construtivas com menor pegada de carbono tem se mostrado fundamental para mitigar os impactos negativos do setor e viabilizar construções mais sustentáveis. Entre os principais fatores que influenciam a sustentabilidade de uma edificação estão o desempenho térmico da envoltória, os custos associados aos materiais e sistemas adotados, e as emissões incorporadas durante a fase de produção e construção.

Entre os elementos construtivos, as paredes de vedação se destacam por sua alta representatividade volumétrica na obra, o que as torna componentes-chave no desempenho térmico e no impacto ambiental e financeiro da edificação (Gonzales, Oliveira e Amarante, 2020; Cruz et al., 2024). Além de influenciarem diretamente o conforto térmico, essas paredes têm peso relevante no custo total da construção e na emissão de CO_2 incorporado, devido à grande quantidade de material envolvido. Seu desempenho térmico é determinado, sobretudo, por duas propriedades físicas: a transmitância térmica, que está associada à capacidade de isolamento da parede frente às trocas de calor com o ambiente externo (ABNT, 2024); e a capacidade térmica, relacionada à inércia térmica do sistema, ou seja, à sua habilidade de armazenar calor e atenuar variações de temperatura interna (ABNT, 2024). A escolha dos materiais que compõem essas vedações, portanto, impacta não apenas o desempenho passivo da edificação, mas também sua dependência de climatização artificial, seu custo inicial e sua pegada de carbono (Cruz *et al.*, 2024).

Além das propriedades térmicas e ambientais dos materiais, é importante considerar a função estrutural da parede. Sistemas de alvenaria estrutural, em que os blocos desempenham também a função estrutural na edificação, eliminam a necessidade de vigas e pilares em concreto armado, o que pode reduzir o consumo total de materiais e o impacto ambiental da obra. Já as paredes de vedação, utilizadas em conjunto com estruturas independentes, tendem a oferecer maior flexibilidade de projeto e modulação. Essa distinção entre função estrutural e vedação influencia diretamente os custos e o desempenho térmico final, exigindo análises específicas para cada contexto construtivo.

No Brasil, os sistemas de alvenaria mais utilizados envolvem o uso de blocos cerâmicos ou de concreto, ambos vazados, com características térmicas distintas. Os blocos cerâmicos, fabricados a partir de argila, apresentam menor condutividade térmica e menor emissão de CO_2 incorporado, enquanto os blocos de concreto, que contêm cimento em sua composição, tendem a acumular e liberar calor mais lentamente, mas apresentam maior impacto ambiental em sua produção (Sugiyama *et al.*, 2016; Pérez *et al.*, 2024; Lamberts *et al.*, 2020).

A eficiência térmica de uma edificação está fortemente relacionada às propriedades dos materiais que compõem sua envoltória, especialmente em climas onde as variações de temperatura são significativas e a climatização artificial nem sempre é viável. O desempenho térmico das vedações influencia diretamente o conforto dos ocupantes e a necessidade (ou não) de sistemas de climatização. Nesse contexto, diferentes métodos podem ser utilizados para avaliar o comportamento térmico das edificações, incluindo o Graus-hora (GH), que mensura a severidade das condições fora da zona de conforto em condições ventiladas naturalmente; a Autonomia Térmica (AT), que indica a capacidade da edificação de manter o conforto térmico sem considerar o uso de sistemas AVAC; e a Carga Térmica (CT), que estima o consumo de energia associado à climatização artificial, sendo aplicável a cenários com uso de AVAC. A análise conjunta desses indicadores permite compreender tanto o desempenho passivo quanto os efeitos da climatização ativa sobre os diferentes sistemas construtivos.

Embora diversos estudos nacionais avaliem individualmente o desempenho térmico, os custos e os impactos ambientais de materiais de vedação, ainda são limitadas as análises que integram esses fatores sob diferentes contextos climáticos, diferentes métricas de desempenho térmico ativo e passivo e para diferentes paredes estruturais e de vedação. Diante disso, o objetivo deste estudo é

avaliar, de forma comparativa e integrada, o desempenho térmico, econômico e ambiental de diferentes sistemas de parede — cerâmicos e de concreto, estruturais e de vedação — aplicados a uma edificação unifamiliar simulada em três cidades brasileiras representativas de zonas bioclimáticas distintas. Dois cenários de decisão são propostos: o primeiro com ênfase na climatização ativa e nos aspectos econômicos e ambientais da construção; o segundo, com foco no desempenho térmico passivo ao longo do tempo. Ao integrar diferentes métricas de desempenho térmico em múltiplos climas, este estudo oferece subsídios para decisões construtivas mais contextualizadas e tecnicamente fundamentadas, capazes de equilibrar conforto, economia e responsabilidade ambiental.

2. MÉTODOS

Neste estudo, foram realizadas simulações termoenergéticas, levantamento de custos e estimativas de emissões de CO_2 incorporado com o objetivo de avaliar o desempenho térmico, o impacto econômico e o impacto ambiental de quatro sistemas de parede aplicados a uma edificação unifamiliar de pequeno porte, localizada em três cidades brasileiras representativas de diferentes zonas bioclimáticas: Canela/RS (Zona Bioclimática 1R – ZB1R), Rio de Janeiro/RJ (ZB4A) e Petrolina/PE (ZB6B), conforme classificação da ABNT NBR 15220-3 (2024).

A edificação avaliada apresenta área construída de 40 m² e tipologia residencial unifamiliar, composta por sala, cozinha, banheiro e dois dormitórios (Figura 1). Os quatro sistemas analisados diferem quanto ao tipo de bloco empregado (cerâmico ou de concreto) e à função estrutural da parede (estrutural ou de vedação). Como se verifica na Figura 2, os sistemas 1 e 2 utilizam blocos cerâmicos com 14 cm de espessura, revestidos com argamassa de 2,5 cm em ambas as faces; o sistema 1 é composto por bloco cerâmico estrutural, enquanto o sistema 2 emprega bloco cerâmico de vedação. Já os sistemas 3 e 4 adotam blocos de concreto com as mesmas espessuras e acabamento, sendo o sistema 3 do tipo estrutural e o sistema 4, de vedação.



Figura 1: Edificação simulada.
Fonte: os autores (2025).

Para a análise do desempenho térmico, foram aplicados três métodos complementares: Carga Térmica (CT), Graus-Hora (GH) e Autonomia Térmica (AT). O método CT estima a energia demandada para manter o ambiente termicamente confortável por meio de climatização ativa, considerando sistemas AVAC. As temperaturas de setpoint adotadas para aquecimento e resfriamento foram de 21°C e 23°C, respectivamente, conforme diretrizes da NBR 15575 (ABNT, 2023). O método GH quantifica a severidade do desconforto térmico em edificações sem climatização artificial, medindo o desvio acumulado das temperaturas internas em relação à zona de conforto (Mendes et al., 2024a). Já o método AT calcula a porcentagem de tempo em que a edificação permanece dentro da faixa operativa de conforto térmico de forma passiva, ou seja, sem o acionamento de sistemas ativos (Krelling et al., 2024). Para ambos os métodos passivos (GH e AT), foi considerada a faixa de temperatura operativa de 18°C a 26°C, de forma a estabelecer somente uma faixa de análise, seguindo o cenário mais conservador proposto pela NBR 15575-1 (ABNT, 2023) para avaliação de desempenho sem climatização mecânica. Optou-se por não

separar GH e CT em aquecimento e resfriamento para permitir uma análise mais abrangente e comparável entre climas, considerando o desempenho térmico ao longo de todo o ano.

As simulações foram realizadas com o software EnergyPlus® v22.1, configurado segundo os parâmetros estabelecidos na NBR 15575-1 (ABNT, 2023), incluindo o padrão de ocupação residencial previsto na norma. Embora a norma não trate diretamente do método de graus-hora, ela fornece os procedimentos básicos para análises de desempenho térmico em condições ativas e passivas. Para a caracterização climática, foram utilizados os arquivos TMYx (*Typical Meteorological Year*) correspondentes às três cidades analisadas.

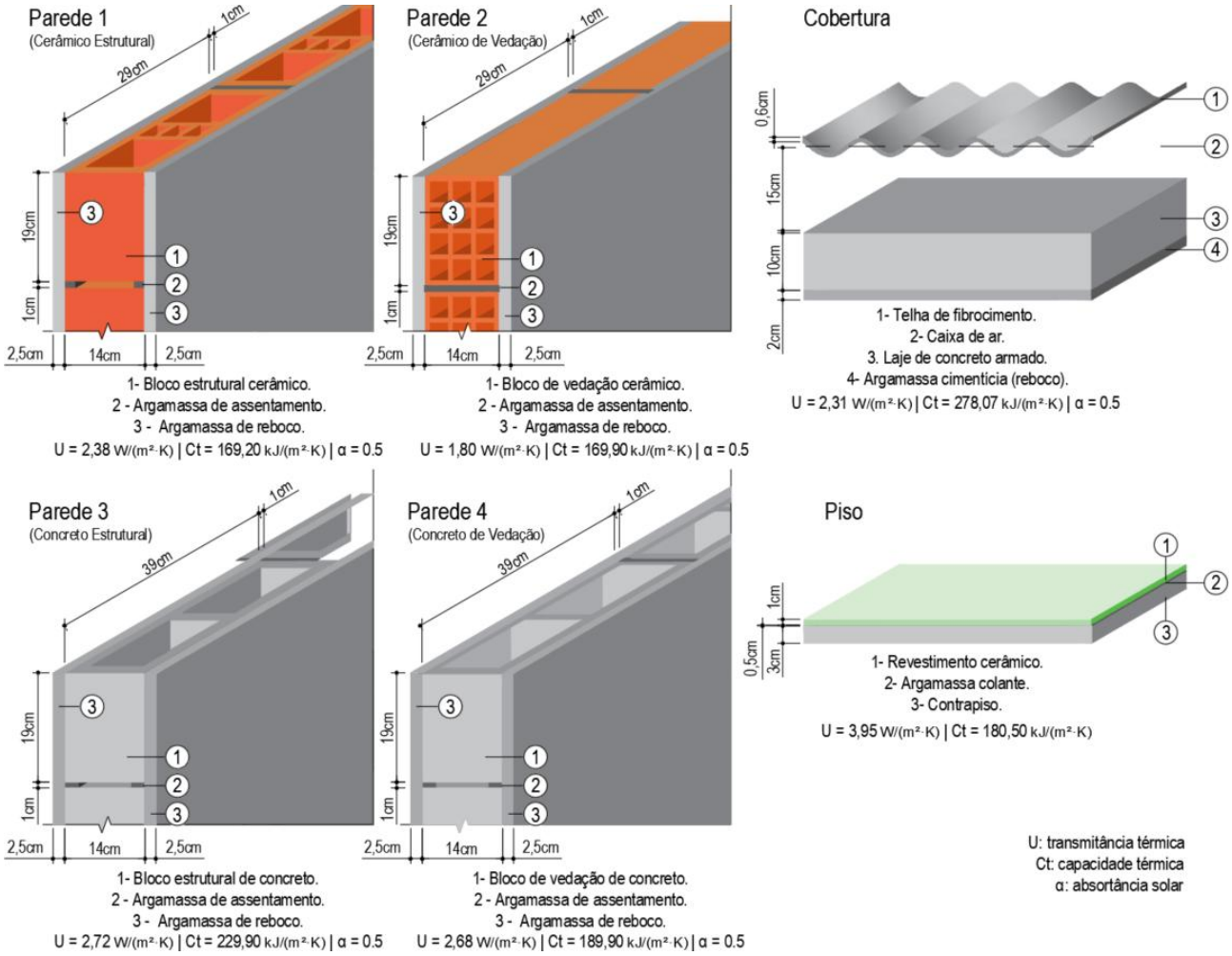


Figura 2: Sistemas construtivos adotados.
Fonte: os autores (2025).

Para a avaliação do desempenho térmico passivo, considerou-se duas formas: (1) apenas as horas de ocupação (avaliação restrita: AT e GH restrito), conforme definido pelo padrão da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2023) e (2) considerando todas as horas do ano (avaliação contínua: AT e GH contínuo), como feito por alguns autores (Mendes *et al.*, 2024a). Essa distinção permite uma análise mais abrangente, que considera tanto o comportamento térmico da edificação ao longo de todo o ciclo diário quanto situações específicas de uso, como o conforto de ocupantes em *home office*, a presença contínua de animais domésticos ou trabalhadores(as) residenciais (Mendes *et al.*, 2024b). A adoção de ambos os critérios amplia a aplicabilidade dos resultados, contribuindo para decisões mais alinhadas a diferentes perfis de exigência de conforto térmico.

As análises de custo e de emissões de CO_2 incorporado foram realizadas com base em duas fontes principais: o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC). O SINAPI, atualizado mensalmente, disponibiliza planilhas de composição de custos de serviços e insumos da construção

civil por unidade federativa. Neste estudo, foram utilizadas as planilhas referentes ao mês de março de 2025, considerando o estado correspondente a cada cidade analisada. Já o SIDAC fornece estimativas das emissões de CO_2 associadas à fabricação de materiais de construção, abrangendo o ciclo de produção desde a extração das matérias-primas até a etapa final de industrialização. As informações disponíveis referem-se ao cenário nacional, sem desagregação por estado. Para fins deste estudo, foram utilizadas as médias dos intervalos de emissões apresentados pelo SIDAC.

Para incorporar os impactos econômicos e ambientais das paredes de vedação em sistemas estruturais independentes, considerou-se que essas paredes são executadas em concreto armado, prática comum no contexto brasileiro. Adotou-se a metodologia proposta por Mattos (2019), que estabelece relações simplificadas para estimar o volume de concreto da superestrutura, o peso do aço e a área de fôrmas necessárias, com finalidade orçamentária. Essa abordagem também foi aplicada à laje maciça, possibilitando a estimativa do conteúdo de aço de forma compatível com os demais elementos estruturais.

Com base nas formulações de Mattos (2019), o volume total de concreto (Vconcreto) foi calculado como o produto da área construída da edificação (Aedificação) por uma espessura média de 14 cm (Equação 1). O peso de aço (Paço) foi obtido pela multiplicação do volume de concreto por uma taxa média de 86,5 kg/m³ (Equação 2). Para estimativas de custo, assumiu-se uma distribuição uniforme entre barras de aço CA-50 com diâmetros de 6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm. A área de fôrmas (Afôrmas) foi estimada a partir da aplicação de um coeficiente de 13 m²/m³ sobre o volume de concreto (Equação 3). Por fim, para diferenciar os elementos verticais e horizontais, o volume da laje foi segregado do volume correspondente a vigas e pilares, permitindo a aplicação separada das fórmulas a cada tipo de componente (paredes de vedação e laje maciça).

$V_{concreto}\,[m^3] = \; A_{edificação}[m^2] \times 0{,}14\,m$ (Equação 1)
$P_{\text{aço}}\,[kg] = \; V_{concreto}\,[m^3] \times 86{,}5 kg/m^3$ (Equação 2)
$A_{fôrmas}\,[m^2] = \; V_{concreto}\,[m^3] \times 13 m^2/m^3$ (Equação 3)

Para a comparação final entre os sistemas de parede, foi realizada uma análise multicritério com base em dois cenários de ponderação, utilizando como referência o percentual de melhoria de cada sistema em relação ao pior desempenho observado em cada critério. No Cenário 1, voltado à climatização ativa e à sustentabilidade econômica e ambiental, os pesos adotados foram: 0,4 para Carga Térmica (CT), 0,35 para emissões de CO_2 incorporado e 0,25 para custo. Já o Cenário 2 priorizou o desempenho térmico passivo, com pesos de 10% para GH contínuo, 0,1 para AT contínuo, 0,15 para GH restrito, 0,15 para AT restrito, 0,25 para CO_2 e 0,25 para custo. Essa abordagem permite avaliar os sistemas sob diferentes prioridades de projeto, considerando tanto o desempenho passivo ou ativo quanto os impactos ambientais e financeiros.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. RESULTADOS E DISCUSSÃO GERAL

Os resultados apresentados na Tabela 1 e na Figura 3 evidenciam variações significativas tanto nos valores absolutos quanto relativos de desempenho térmico entre os sistemas construtivos avaliados, e essas diferenças se acentuam conforme a região climática e o método de avaliação utilizado. Em climas frios como o de Canela, os valores de GH e CT são elevados: o pior sistema alcança mais de 1.580.000 graus-hora e cerca de 4.100 kWh, respectivamente. Já em climas quentes, como Petrolina e Rio de Janeiro, esses valores são notavelmente menores (GH em torno de 13.000 a 14.000 °C·h e CT entre 1.700 e 7.300 kWh), ainda que o AT apresente variações menos acentuadas. Tais diferenças ocorrem não apenas pelas condições climáticas externas, mas também pelo efeito combinado da transmitância térmica e da capacidade térmica dos sistemas, que respondem de maneira distinta ao desempenho térmico, segundo o clima e o padrão de avaliação.

No que se refere ao impacto ambiental e ao custo de aquisição dos sistemas construtivos, os resultados apontam vantagem consistente do bloco cerâmico estrutural sobre os demais. Este

sistema apresentou até 19,9% menos emissões de CO_2 associadas à produção dos materiais e até 64,08% menor custo de aquisição em comparação ao sistema mais oneroso, considerando os dados de todas as regiões. Essa economia decorre principalmente da substituição de vigas e pilares em concreto armado – elementos que implicam alto custo e elevada pegada ambiental, por uma solução monolítica em alvenaria estrutural cerâmica (Tauli e Nese, 2023).

Canela/RS							
Sistema de parede	CT (kWh)	AT restrito	GH restrito (°C·h)	AT contínuo	GH contínuo (°C·h)	CO2e (kCO2e/m²)	Custo (R$/m²)
1: Cerâmico Est.	4003,75	59,878% (melhor)	15695,6	46,807%	15695,6	2476,17 (melhor)	27.634,90 (melhor)
2: Cerâmico Ved.	3714,62 (melhor)	59,631% (pior)	15311,8 (melhor)	46,682% (pior)	15311,8 (melhor)	3091,49 (pior)	69.698,65
3: Concreto Est.	4071,90	59,741%	15733,9	46,857% (melhor)	15733,9	2934,61	33.487,36
4: Concreto Ved.	4106,43 (pior)	59,836%	15803,4 (pior)	46,823%	15803,4 (pior)	2811,16	71.584,58 (pior)
Rio de Janeiro/RJ							
Sistema de parede	CT (kWh)	AT restrito	GH restrito (°C·h)	AT contínuo	GH contínuo (°C·h)	CO2e (kCO2e/m²)	Custo (R$/m²)
1: Cerâmico Est.	1761,18	86,309%	2988,1	64,231%	5312,4	2476,17 (melhor)	31.410,88 (melhor)
2: Cerâmico Ved.	1739,62 (melhor)	86,495% (melhor)	2694,2 (melhor)	64,954% (melhor)	4981,6 (melhor)	3091,49 (pior)	73.624,06
3: Concreto Est.	1911,56 (pior)	86,218% (pior)	2841,8	64,300%	5335,9	2934,61	34.652,29
4: Concreto Ved.	1823,93	86,240%	3010,4 (pior)	64,094% (pior)	5409,6 (pior)	2811,16	87.451,66 (pior)
Petrolina/PE							
Sistema de parede	CT (kWh)	AT restrito	GH restrito (°C·h)	AT contínuo	GH contínuo (°C·h)	CO2e (kCO2e/m²)	Custo (R$/m²)
1: Cerâmico Est.	7137,92	39,323%	13335,5	24,121%	13838,3	2476,17 (melhor)	29.553,79 (melhor)
2: Cerâmico Ved.	6714,67 (melhor)	40,361% (melhor)	12603,3 (melhor)	25,194% (melhor)	12923,2 (melhor)	3091,49 (pior)	65.941,50
3: Concreto Est.	7386,60	39,235%	13486,8	23,630% (pior)	14045,1	2934,61	33.892,15
4: Concreto Ved.	7349,14 (pior)	39,018% (pior)	13580,6 (pior)	23,664%	14151,4 (pior)	2811,16	69.454,83 (pior)

Tabela 1: Resultado Geral.
Fonte: os autores (2025).

Do ponto de vista térmico, os blocos cerâmicos de vedação foram os que proporcionaram melhores desempenhos passivos em GH em todas as localidades analisadas. Em Canela, por exemplo, a alvenaria com bloco cerâmico de vedação apresentou uma redução de 3,11% em relação ao pior sistema para GH avaliado em todas as horas do ano. Em Petrolina, essa diferença chega a 8,68%, o que confirma o efeito da baixa transmitância térmica (1,80 W/(m²·K)) na contenção do fluxo de calor entre o exterior e o interior da edificação. A presença de vazios no bloco, que formam câmaras de ar, é o principal contribuinte para esse isolamento (ABNT, 2024). Em contraste, os blocos de concreto estrutural e de vedação, com transmitâncias próximas de 2,7 W/(m²·K), i.e., cerca de 50% maiores (ABNT, 2024), tendem a permitir maior troca térmica com o ambiente, prejudicando o conforto interno em cenários de resfriamento e aquecimento passivo.

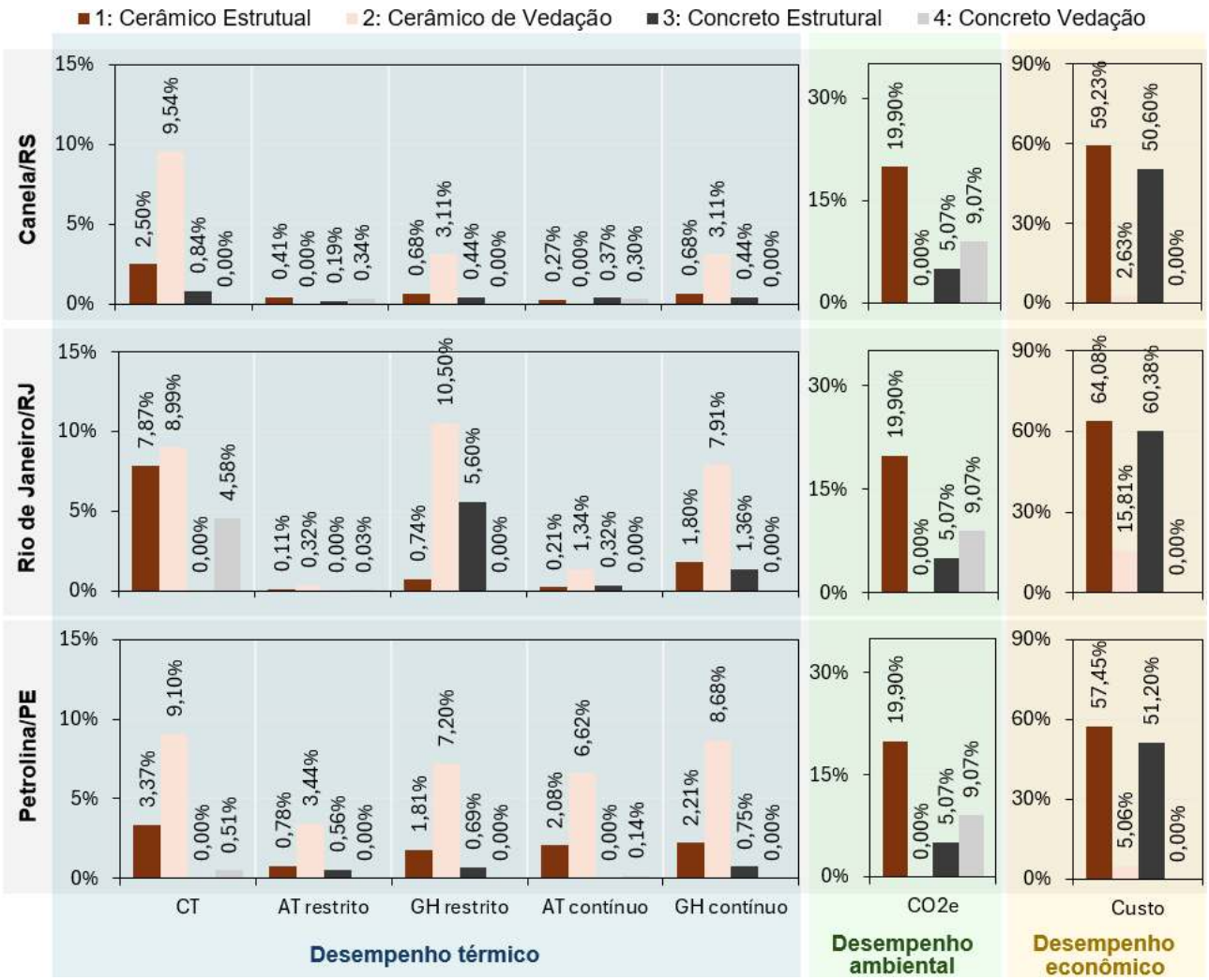


Figura 3: Porcentagem de melhorias para cada critério.
Fonte: os autores (2025).

Contudo, quando a métrica de avaliação é o AT, especialmente ao longo de todo o tempo (e não apenas durante a ocupação), há uma inversão nos desempenhos observados em Canela. O sistema de bloco estrutural de concreto obteve o maior percentual de horas em conforto ao longo do ano, superando ligeiramente os demais, mesmo com maior transmitância térmica. Esse resultado pode ser parcialmente atribuído à alta capacidade térmica do sistema (229,9 kJ/(m²·K)), que permite ao ambiente amortecer as variações bruscas de temperatura ao longo do dia, especialmente em contextos com grande amplitude térmica (Mendes *et al.*, 2025). No entanto, é importante destacar que o sistema também apresenta a maior transmitância térmica entre os avaliados (2,72 W/(m²·K)), o que tende a favorecer a troca de calor com o exterior e, portanto, comprometer o isolamento térmico da edificação. A combinação desses dois fatores pode explicar o melhor desempenho observado no indicador AT total. Ainda assim, a diferença percentual entre os sistemas foi inferior a 0,4%, o que sugere que os efeitos positivos da inércia não compensam integralmente as perdas por condução térmica em regimes contínuos sem climatização artificial.

A partir dessas observações, reforça-se um ponto identificado em outros estudos da literatura: o *ranking* de desempenho térmico de um mesmo sistema pode se alterar significativamente conforme o método de avaliação adotado (Mendes *et al.*, 2024b). Enquanto o método CT (consumo com AVAC) valoriza sistemas de baixa inércia e alto isolamento, como o cerâmico de vedação, os métodos baseados em AT e GH, especialmente em climas frios, podem indicar vantagens em sistemas com maior capacidade térmica, como os blocos de concreto. Assim, a escolha do método de avaliação deve estar alinhada ao cenário real de uso da edificação: padrões de ocupação, limites

de temperatura de conforto e, principalmente, a existência ou não de sistemas de climatização ativa (Mendes *et al.*, 2024b).

Por fim, a análise de climatização ativa (CT) demonstrou o melhor desempenho para o bloco cerâmico de vedação em todas as regiões. As reduções no consumo de energia mensal para climatização chegam a 9,54% em Canela, 8,99% no Rio de Janeiro e 9,10% em Petrolina, quando comparado ao pior sistema. Esses valores confirmam que sua combinação de baixa transmitância térmica e menor capacidade térmica (169,9 kJ/(m²·K)) favorece o funcionamento de sistemas AVAC, permitindo resposta térmica mais rápida aos *setpoints* fixados. Por outro lado, os sistemas com blocos de concreto foram sistematicamente os piores nas três regiões: no clima frio (Canela), o de vedação apresentou os piores valores de GH e CT; em climas quente e ameno (Petrolina e Rio de Janeiro), o de concreto estrutural teve o pior desempenho. Esses resultados reforçam que, em contextos de projeto preocupados com o desempenho térmico e a eficiência energética, o uso de blocos de concreto deve ser cuidadosamente avaliado ou compensado com outras estratégias de conforto.

3.2. EQUILIBRANDO OS CRITÉRIOS ANALISADOS

A análise multicritério aplicada aos sistemas de vedação evidencia que o bloco cerâmico estrutural é a solução mais equilibrada nos três climas e nos dois cenários avaliados. A Tabela 2 discrimina esses resultados. Embora ele não apresente o melhor desempenho térmico absoluto, destaca-se por reunir desempenho térmico aceitável, menor impacto ambiental (até 19,9% de redução nas emissões incorporadas) e o menor custo de aquisição (com até 64% de economia em relação aos sistemas mais onerosos). Essa combinação levou o sistema a obter as maiores pontuações tanto no cenário com foco em eficiência energética e sustentabilidade econômica (cenário 1), quanto naquele que valoriza o conforto térmico passivo em diferentes horários e contextos de ocupação (cenário 2).

Cenário 1 – Foco em AVAC + Sustentabilidade Econômica/Ambiental (CT: 40%, CO_2: 35%, R$: 35%)				
Cidade	Melhor Bloco	Pontuação obtida	Faixa de variação de pontuação na localidade	Principais Razões
Canela	1: Cerâmico Est.	0,295	(0,295–0,032)	Melhor custo + menor CO_2 + bom desempenho energético (CT)
Rio de Janeiro	1: Cerâmico Est.	0,325	(0,325–0,050)	Melhor custo e CO_2, desempenho energético competitivo
Petrolina	1: Cerâmico Est.	0,284	(0,284–0,034)	Menor custo inicial, menor CO_2, CT apenas 6% acima do melhor
Cenário 2 – Foco em Desempenho Térmico Passivo + Sustentabilidade (GH contínuo: 10%, AT contínuo: 10%, GH restrito: 15%, AT restrito: 15%, CO_2: 25%, R$: 25%)				
Cidade	Melhor Bloco	Pontuação obtida	Faixa de variação de pontuação na localidade	Principais Razões
Canela	1: Cerâmico Est.	0,206	(0,206–0,014)	Desempenho térmico estável + menor CO_2 + menor custo
Rio de Janeiro	1: Cerâmico Est.	0,213	(0,213–0,023)	Conforto térmico passivo equilibrado + baixo impacto ambiental + custo baixo
Petrolina	1: Cerâmico Est.	0,202	(0,202–0,023)	Bom desempenho térmico + baixo custo + menor CO_2

Tabela 2: Panorama equilibrado.
Fonte: os autores (2024).

A interpretação dos resultados ponderados da tabela mostra que, mesmo em regiões quentes como Petrolina, onde o bloco cerâmico de vedação apresenta melhor isolamento térmico (com até 8,7% de redução em GH total), sua baixa performance em custo e impacto ambiental compromete sua indicação geral. Já os sistemas em bloco de concreto, tanto estrutural quanto de vedação,

apresentaram desempenho inferior em praticamente todos os critérios, com destaque negativo para transmitância térmica elevada e impacto ambiental intermediário.

Na prática, esses resultados reforçam a necessidade de balancear desempenho térmico, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental na escolha do sistema construtivo. Em projetos com restrições orçamentárias ou que envolvam certificações ambientais, o bloco cerâmico estrutural representa uma escolha segura e tecnicamente justificada. Em contrapartida, em edificações onde o conforto térmico passivo é a principal exigência, como escolas sem AVAC, moradias sociais com alta densidade ou edificações em zonas muito quentes, o uso do bloco cerâmico de vedação pode ser recomendado, desde que seu maior custo e impacto ambiental sejam compensados por estratégias complementares, como a realização de estudos de payback ambiental e econômico que considerem o ciclo de vida completo da edificação, incluindo não apenas os ganhos operacionais com menor demanda por climatização, mas também os efeitos sobre etapas posteriores, como manutenção, durabilidade, adaptabilidade do sistema construtivo e desmonte ao fim da vida útil. Cabe destacar, no entanto, que estas análises se referem a edificações residenciais unifamiliares. Em edificações com uso distinto, como escolas ou escritórios, com maior densidade de ocupação e cargas internas elevadas, o desempenho térmico pode estar condicionado a outros fatores, e o isolamento da envoltória tende a assumir um papel mais relevante.

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o desempenho térmico, econômico e ambiental de quatro sistemas de parede – cerâmico estrutural, cerâmico de vedação, concreto estrutural e concreto de vedação – em uma edificação unifamiliar simulada em três cidades brasileiras com distintas zonas bioclimáticas: Canela/RS, Rio de Janeiro/RJ e Petrolina/PE. Foram aplicados três métodos de avaliação térmica (CT, GH e AT), com análises realizadas tanto em horário de ocupação quanto de forma contínua. Os resultados demonstraram que o bloco cerâmico de vedação apresentou os melhores indicadores de desempenho térmico, com redução de até 8,7% nos graus-hora (GH) em Petrolina e até 9,5% no consumo energético (CT) em Canela, devido à sua menor transmitância térmica (1,80 W/m²·K). No entanto, esse sistema também apresentou os maiores custos de aquisição e emissões de CO_2 incorporado. Já o bloco cerâmico estrutural demonstrou o melhor equilíbrio geral, com economia de até 64% no custo inicial e redução de 19,9% nas emissões em relação ao sistema mais oneroso, mantendo desempenho térmico intermediário em todos os climas analisados.

A análise multicritério confirmou que o bloco cerâmico estrutural é o sistema mais vantajoso nos dois cenários avaliados, conciliando custo, impacto ambiental e desempenho técnico, e sendo particularmente adequado a projetos com restrições orçamentárias ou metas de sustentabilidade. Já o bloco de vedação cerâmico pode ser recomendado em contextos em que o conforto térmico passivo é prioritário, desde que seu maior impacto ambiental e custo sejam compensados por estratégias complementares. Os resultados reforçam a importância de decisões construtivas baseadas em análises integradas e contextuais, e demonstram que a escolha do sistema de parede pode influenciar significativamente a eficiência térmica, econômica e ambiental de edificações, sobretudo em países de clima diverso como o Brasil. Estudos como este ampliam a base de conhecimento técnico disponível e fornecem subsídios concretos para a formulação de políticas públicas, regulamentações e boas práticas em projetos de edificações mais sustentáveis e equitativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 15575-1 - Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 1:** Requisitos gerais. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2023.

ABNT. **NBR 15220-3 - Desempenho térmico em edficações. Parte 3:** Zonemaneto bioclimático por desempenho. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2024.

CRUZ, A. S.; CALDAS, L. R.; MENDES, V. F.; MENDES, J. C.; BASTOS, L. E. G. Multi-objective optimization based on surrogate models for sustainable building design: A systematic literature review. **Building and Environment**, v. 266, p. 112147, 2024. doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112147

GONZALES, F. D.; OLIVEIRA, D. L.; AMARANTE, M. D. S. Patologias na construção civil. **Revista Braz Cubas,** v. 6, n. 1, p. 128-139, 2020.

KRELLING, A. F.; LAMBERTS, R.; MALIK, J.; ZHANG, W.; SUN, K.; HONG, T. Defining weather scenarios for simulation-based assessment of thermal resilience of buildings under current and future climates: A case study in Brazil. **Sustainable Cities and Society**, v. 107, p. 105460, 2024. doi.org/10.1016/j.scs.2024.105460

LAMBERTS, R.; MELO, A. P.; TRIANA, M. A.; MACHADO, R. M. S.; KAMIMURA, A. M.; BRACHT, M. K. **Análise de custo/benefício de parâmetros de eficiência energética em Habitações de Interesse Social**. [S.l.]. 2020.

LOPES, C. M. N.; MENDES, V. F.; GARCIA, D. R.; MENDES, J. C. Residues in cement-based composites: Occurrence mapping in Brazil. **Case Studies in Construction Materials,** v. 18, p. e01763, 2023. doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01763

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamentos de obras**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

MENDES, F. V.; CRUZ, A. S.; GOMES, A. P.; MENDES, J. C. A systematic review of methods for evaluating the thermal performance of buildings through energy simulations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 189, p. 113875, 2024a. doi.org/10.1016/j.rser.2023.113875

MENDES, F. V.; CRUZ, A. S.; GOMES, A. P.; MENDES, J. C. Exploring the impact of evaluation methods on Global South building design—A case study in Brazil. **Building Simulation,** p. 1-21, 2024b. doi.org/10.1007/s12273-024-1160-3

MENDES, V. F.; CARVALHO, A. R.; CASTRO, J. A.; MENDES, J. C. Impact of the type and thickness of coating mortars produced with waste on the thermal performance of buildings. **Ambiente Construído,** v. 25, p. e139195, 2025. doi.org/10.1590/s1678-86212025000100854

PÉREZ, O. F. A.; ARRIETA, V. S.; OSPINA, J. H. G.; HERRERA, S. H.; ROJAS, C. F. R.; NAVARRO, A. M. S. Carbon dioxide emissions from traditional and modified concrete. **A review. Environmental Development,** v. 52, p. 101036, 2024. doi.org/10.1016/j.envdev.2024.101036

SUGIYAMA, T.; KUSUMOTO, K; OHASHI, M.; KAMIYA, A. Environmental Friendly Ceramic Building Materials. **Key Engineering Materials,** v. 690, p. 150-155, 2016. doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.690.150

TAULI, C. A.; NESE, F. J. M. **Alvenaria Estrutural**. São Paulo: Blücher, 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências de fomento CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Código Financeiro 001 – bolsa de doutorado para Vítor Mendes e Alexandre Cruz) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – projeto 305818/2023-6 para Júlia Mendes). Os autores também agradecem ao IFMG – Campus Santa Luzia, pelas bolsas de iniciação científica de Poliana Arcanjo e Marcos Tavares.