



<http://revistarebram.com/index.php/revistauniara>

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DA ESCOLA MUNICIPAL DO PROJETO DE REASSENTAMENTO DE BENTO RODRIGUES, MARIANA-MG

Adriano Pinto Gomes*; Raissa Martins da Silva Araujo*; Rovadavia Aline de Jesus Ribas; Carmem Miranda Lage**.

* Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto.

** Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto.

*Autor para correspondência e-mail: adriano.gomes@ifmg.edu.br

PALAVRAS-CHAVE

Desempenho Térmico
Programa EnergyPlus
Edifício Intitucional

KEYWORDS

Thermal Performance
EnergyPlus Program
Intititutional Building

RESUMO: O estudo do comportamento térmico de edificações tem-se mostrado cada vez mais importante na busca por um ambiente equilibrado termicamente, favorecendo o conforto dos usuários e consequente maior rendimento das atividades a serem desenvolvidas no local. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho térmico da Escola Municipal de Bento Rodrigues. Busca-se também analisar estratégias de projeto que impactam no desempenho térmico da edificação, a fim de subsidiar decisões na execução da obra e em futuras construções na região. Analisa-se por meio de uma análise paramétrica o impacto da orientação solar; do número de renovações de ar por hora; e dos tipos de paredes, pisos e coberturas. O procedimento de avaliação adotado neste trabalho é baseado em simulações computacionais no programa EnergyPlus adotando-se como critérios de avaliação as diretrizes da norma NBR 15575. Os resultados referentes às temperaturas internas, gerados pelas simulações no programa EnergyPlus demonstraram que as salas de aula da Escola Municipal de Bento Rodrigues apresentam, de modo geral, desempenho térmico adequado. Nas simulações computacionais das análises paramétricas, verificou-se que, considerando a Zona Bioclimática 3, a abertura das salas deve estar orientada para o norte ou para o sul; a ventilação natural das salas é um condicionante importante na retirada do excesso de calor do ambiente; as características dos fechamentos indicados pela norma NBR 15575 proporcionam um desempenho térmico adequado; e a escolha do acabamento de piso não gera alterações significativas no comportamento térmico da edificação.

ANALYSIS OF THE THERMAL PERFORMANCE OF THE MUNICIPAL SCHOOL OF THE RESETTLEMENT PROJECT IN BENTO RODRIGUES, MARIANA-MG

ABSTRACT: The study of the thermal behavior of buildings has shown itself to be increasingly important in the search for a thermally balanced environment, favoring the comfort of users and, consequently, greater performance in the activities to be developed on site. The objective of this work is to evaluate the thermal performance of the Escola Municipal de Bento Rodrigues. It also seeks to analyze design strategies that impact the thermal performance of the building, to support decisions in the execution of the work and in future constructions in the region. A parametric analysis is performed to analyze: the impact of solar orientation; the number of air changes per hour; and the types of walls, floors and roofs. The evaluation procedure adopted in this work is based on computer simulations in the EnergyPlus program, adopting as evaluation criteria the guidelines of standard NBR 15575. The results referring to the internal temperatures, generated by the simulations in the EnergyPlus program, demonstrated that the classrooms of the Escola Municipal de Bento Rodrigues present, in general, an adequate thermal performance. In the computational simulations of the parametric analyses, it was found that, considering Bioclimatic Zone 3, the opening of the rooms must be oriented to the north or to the south; the natural ventilation of the rooms is an important condition in the removal of excess heat from the environment; the characteristics of the closures indicated by the NBR 15575 standard provide adequate thermal performance; and the choice of floor finishing does not generate significant changes in the building's thermal behavior.

Recebido em: 10/02/2022

Aprovação final em: 17/04/2022

DOI: <https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2022.v25i2.1338>

INTRODUÇÃO

O desempenho térmico pode ser caracterizado como uma resposta global do projeto arquitetônico em relação às trocas térmicas entre o ambiente externo e o ambiente construído. Para Viana, Souza e Gomes (2019), o desempenho térmico está intimamente ligado à adequação do sistema de fechamento interno e externo da edificação, a um sistema eficiente de ventilação, resfriamento ou aquecimento, com um projeto arquitetônico que seja adequado às variáveis climáticas locais. De forma complementar, para a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), o desempenho diz respeito ao comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas, e a forma do seu estabelecimento é dada por meio da definição de requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos ou premissas) e métodos de avaliação, que sempre permitem a mensuração clara do seu atendimento.

Assim, a avaliação do desempenho térmico de uma edificação, tanto as artificialmente condicionadas quanto as naturalmente ventiladas, consiste em se verificar se as condições do ambiente interno são satisfatórias quanto ao conforto térmico proporcionado aos ocupantes (GOMES, 2007). Construções com um desempenho térmico baixo resultam em desconforto para os ocupantes, o que pode prejudicar a saúde deles e, futuramente, levá-los a optarem por um ambiente condicionado artificialmente.

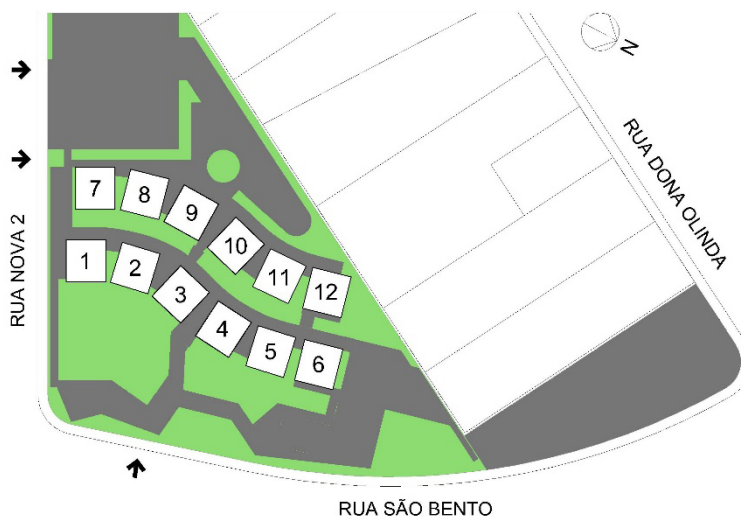
O conhecimento do comportamento térmico de uma edificação tem-se apresentado importante na busca de se adequar a arquitetura do edifício ao clima local, motivando a utilização dos materiais e técnicas de construção mais favoráveis para determinada condição ambiental, de forma a atender aos critérios de desempenho térmico. As normas relacionadas ao desempenho térmico e/ou eficiência energética de edificações, atualmente em vigor no Brasil, são as NBR 15220 (ABNT, 2005): Desempenho térmico de edificações e a NBR 15575 (ABNT, 2013): Edificações habitacionais - Desempenho. Para realizar um estudo e análise do desempenho térmico, a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) recomenda que as realizações das simulações computacionais sejam executadas no programa EnergyPlus (DOE, 2020a).

A avaliação de desempenho térmico de edificações também apresenta uma face social, uma vez que a qualificação dos ambientes de longa permanência favorece um aumento no nível da qualidade de vida das pessoas. Assim, a necessidade de melhorar o bem-estar dos usuários de uma edificação da comunidade de Bento Rodrigues, associada à busca pela otimização do desempenho térmico da edificação, norteiam os estudos desta pesquisa, utilizando ferramentas computacionais para simulações energéticas de edificações.

Bento Rodrigues foi o primeiro povoado atingido e totalmente destruído com o rompimento da barragem de Fundão, operada pela Samarco Mineração S.A., em novembro de 2015. A comunidade pertence ao município de Mariana, MG, e seu local de origem se localizava a 24 km da cidade sede. Após a tragédia e diversas reuniões e assembleias, decidiu-se que a área onde seria reassentada a nova comunidade seria o terreno da Lavoura, situada a 8 km de Mariana. Desde então, foram iniciados os processos de planejamento urbanístico e construção das edificações. Dentre os equipamentos públicos constantes no projeto, há a Escola Municipal de Bento Rodrigues, que atenderá o ensino infantil e fundamental - crianças entre 4 e 14 anos, aproximadamente. Sua construção vem acontecendo desde o ano de 2020, e se apresenta inacabada até o atual momento da pesquisa (FUNDAÇÃO RENOVA, 2020).

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho térmico da Escola Municipal de Bento Rodrigues. Busca-se também analisar estratégias de projeto que impactam no desempenho térmico da edificação, a fim de subsidiar decisões na execução da obra e em futuras construções na região.

A Escola Municipal de Bento Rodrigues está inserida em um meio residencial, cercada pelos terrenos e quadras onde já se começaram a edificar as futuras residências dos atingidos. O prédio escolar é composto por 2 (dois) pavilhões com salas de aula posicionadas longitudinalmente no eixo Norte-Sul, em dois níveis, conforme pode ser observado na Figura 1. Em destaque, os 2 (dois) pavilhões de salas de aula contendo as 12 salas, os acessos de pedestres e lotes vizinhos.

Figura 1 – Planta esquemática da Escola Municipal de Bento Rodrigues.

Fonte: Elaborado pelos autores.

METODOLOGIA

Neste trabalho realiza-se uma análise de desempenho térmico de uma edificação escolar naturalmente ventilada por meio de simulação computacional. Aplicando-se análises paramétricas, busca-se também analisar outras decisões de projeto que possam interferir no desempenho térmico da edificação. O procedimento de avaliação adotado neste trabalho é baseado nas diretrizes da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), que, embora seja direcionada a edificações habitacionais, ela é utilizada como uma referência, pois aborda a avaliação de desempenho térmico em ambientes de longa permanência, como no caso de salas de aula. Neste capítulo são apresentados os elementos necessários às simulações computacionais e os procedimentos que embasam o desenvolvimento do trabalho.

PARÂMETROS GERAIS

As simulações computacionais são realizadas no programa EnergyPlus versão 9.4.0 (DOE, 2020a). O algoritmo de solução do balanço de calor adotado é o ConductionTransferFunction (CTF), que considera apenas o calor sensível, desconsiderando o armazenamento ou a difusão da umidade pelos elementos da construção. Em relação aos algoritmos para cálculo do coeficiente de convecção em superfícies, adota-se o TARP (Thermal Analysis Research Program) para a face interna e externa de todas as superfícies de transferência de calor no modelo. O algoritmo TARP correlaciona o coeficiente de transferência de calor com a orientação da superfície e a diferença entre a temperatura do ar na zona térmica e na superfície (DOE, 2020b).

CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Neste trabalho, a simulação computacional é realizada considerando os dias típicos de projeto. Segundo a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), os dias típicos de projeto são definidos como dias reais, caracterizados pelas variáveis: temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar incidente em superfície horizontal. No dia típico de projeto de verão, considera-se o dia mais quente do ano segundo a média do período dos últimos dez anos; e no dia típico de inverno, o dia mais frio do ano segundo a média do mesmo período.

Conforme recomendação contida na norma NBR 15575 (ABNT, 2013), na falta de dados para a cidade

onde se encontra a habitação, recomenda-se utilizar os dados climáticos de uma cidade com características climáticas semelhantes e na mesma zona bioclimática brasileira. Como a região de implantação do Projeto de Reassentamento de Bento Rodrigues – MG não possui dados disponíveis dos dias típicos de projeto, optou-se por adotar os dados da cidade de Belo Horizonte – MG (Tabela 1), que também encontra-se na Zona Bioclimática 3 - ZR3, de acordo com a classificação contida na norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

Tabela 1 – Localização geográfica da cidade de Belo Horizonte/MG.

UF	Zona Bioclimática	Latitude(°)	Longitude (°)	Altitude [m]
MG	ZB3	19,93S	43,93W	850

Fonte: NBR 15575 (ABNT, 2013).

Para obter os dados dos dias típicos de projeto da cidade de Belo Horizonte – MG, deve-se recorrer aos dados disponíveis na norma NBR 15575 (ABNT, 2013). Consultando a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) pode-se obter: a temperatura máx./mín. diária [°C], a amplitude diária de temperatura [°C] e a temperatura de bulbo úmido [°C] dos dias típicos de projeto de verão e inverno. No entanto, nos dados disponibilizados nessa norma, não há referência sobre o dia e o mês a que se refere o dia típico estabelecido e não há dados de pressão atmosférica e de velocidade e direção do vento. Embora nas tabelas de dados de dias típicos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) esteja disponibilizado um valor de radiação solar (Wh/m²) para cada um dos dias típicos, não é possível utilizar esse dado na simulação computacional. Isto porque, para inserir os dados de radiação solar manualmente no programa, é preciso criar uma rotina (grupo Schedule no EnergyPlus) com valores horários (menu Schedule:Day:Hourly no EnergyPlus) de radiação solar direta e difusa (Wh/m²), para verão e inverno.

Como não há todos esses dados horários disponíveis nas tabelas da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), buscou-se, no arquivo climático do EnergyPlus – arquivo EPW (DOE, 2020c), um dia com valores próximos à temperatura máxima e amplitude citada na norma para se obterem os dados que faltam do dia típico de verão, e um dia com valores próximos à temperatura mínima e amplitude citada na norma para se obterem os dados que faltam do dia típico de inverno - abordagem baseada no trabalho de Guarda, Durante e Callejas (2020). Após identificar os dias com essas características no arquivo EPW (20/fev e 24/jun), foi realizada uma nova simulação computacional solicitando nos relatórios do programa os dados climáticos que faltavam para caracterizar os dias típicos de projeto (pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, radiação solar direta e difusa). Nas Tabelas 2, 3 e 4 são apresentados os dados que constam na norma NBR 15575 (ABNT, 2013) e no arquivo EPW (DOE, 2020c) para a caracterização dos dias típicos; e na Tabela 5, apresentam-se os valores de temperaturas do solo, que são adotados nas simulações computacionais.

Tabela 2 – Dados dos dias típicos de Belo Horizonte – MG.

	Dia típico de verão	Dia típico de inverno
Temperatura máxima diária (°C)	32	---
Temperatura mínima diária (°C)	---	8,7
Amplitude diária de temperatura (°C)	10,3	12,6
Temperatura de bulbo úmido (°C)	21,7	16,0

Fonte: NBR 15575 (ABNT, 2013).

Tabela 3 – Dados horários de radiação solar do arquivo EPW de Belo Horizonte – MG.

Data/Hora	Dia típico de verão		Data/Hora	Dia típico de inverno	
	Radiação solar difusa	Radiação solar direta		Radiação solar difusa	Radiação solar direta
	[W/m ²]	[W/m ²]		[W/m ²]	[W/m ²]
02/20 01	0	0	06/24 01	0	0
02/20 02	0	0	06/24 02	0	0
02/20 03	0	0	06/24 03	0	0
02/20 04	0	0	06/24 04	0	0
02/20 05	0	0	06/24 05	0	0
02/20 06	3	75	06/24 06	0	0
02/20 07	23	549	06/24 07	13	75
02/20 08	42	696	06/24 08	58	383
02/20 09	72	830	06/24 09	92	607
02/20 10	127	817	06/24 10	117	718
02/20 11	195	790	06/24 11	132	765
02/20 12	240	699	06/24 12	139	786
02/20 13	201	621	06/24 13	138	785
02/20 14	223	757	06/24 14	128	753
02/20 15	128	823	06/24 15	110	682
02/20 16	114	711	06/24 16	82	543
02/20 17	61	636	06/24 17	46	289
02/20 18	24	496	06/24 18	4	24
02/20 19	3	64	06/24 19	0	0
02/20 20	0	0	06/24 20	0	0
02/20 21	0	0	06/24 21	0	0
02/20 22	0	0	06/24 22	0	0
02/20 23	0	0	06/24 23	0	0
02/20 24	0	0	06/24 24	0	0

Fonte: DOE, 2020c.

Tabela 4 – Dados do arquivo EPW dos dias representativos de Belo Horizonte – MG.

	Dia típico de verão	Dia típico de inverno
Mês	2	6
Dia	20	24
Pressão atmosférica [Pa]	92806	92782
Velocidade do vento [m/s]	1,97	0
Direção do vento [N=0]	50	0

Fonte: DOE, 2020c.

Tabela 5 – Temperaturas do solo de Belo Horizonte – MG.

Mês	Temp. do Solo (°C)	Mês	Temp. do Solo (°C)	Mês	Temp. do Solo (°C)
JAN	24,0	MAI	19,8	SET	22,3
FEV	23,0	JUN	19,6	OUT	23,5
MAR	21,8	JUL	20,0	NOV	24,3
ABR	21,0	AGO	21,0	DEZ	24,5

Fonte: DOE, 2020c.

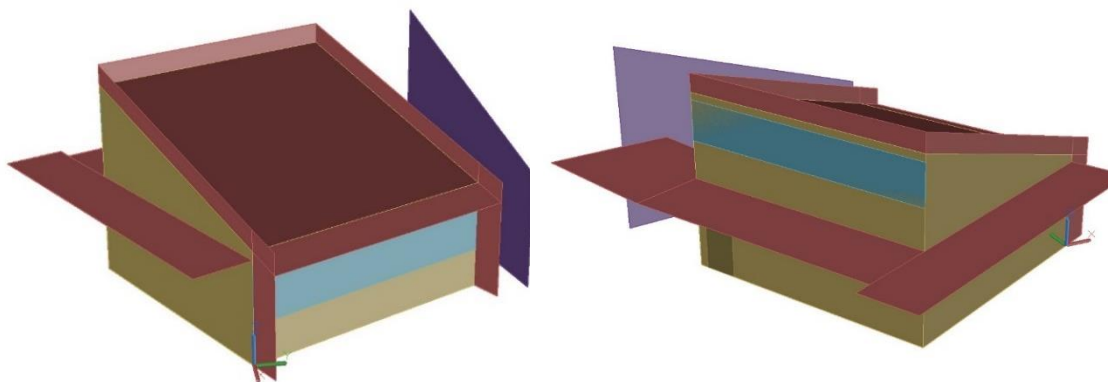
ROTINAS DE USO E OCUPAÇÃO

Seguindo as recomendações contidas na norma NBR 15575 (ABNT, 2013), a simulação computacional é realizada desconsiderando-se as fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas e equipamentos), pois a intenção do método contido na norma é avaliar a envoltória. Assim, não foram criadas rotinas relacionadas às cargas internas. No entanto, adotou-se apenas uma rotina no programa para especificar que a ventilação natural é representada por uma taxa constante e está sempre disponível.

MODELO GEOMÉTRICO

Para a modelagem da geometria da edificação no EnergyPlus, cada sala de aula é representada por uma zona térmica, com dimensões de base de 7,57m por 8,16m entre os eixos das paredes. O pé-direito é variável, sendo o valor mínimo de 2,81m e o máximo de 5,06m. Ao invés de fazer a simulação computacional considerando toda a edificação, devido à complexidade do projeto, que pode gerar incertezas na entrada de dados no programa, optou-se por modelar as salas de aula isoladamente com a condição específica de sombreamento do entorno imediato. Na Figura 2, por exemplo, apresenta-se o modelo geométrico da sala de aula 1 com as placas específicas de sombreamento. Essa abordagem somente é possível uma vez que as 12 salas de aula possuem as mesmas dimensões e características de construção. Na Figura 3, apresentam-se as 12 salas de aula com as condições particulares de orientação solar e sombreamento devido ao entorno edificado.

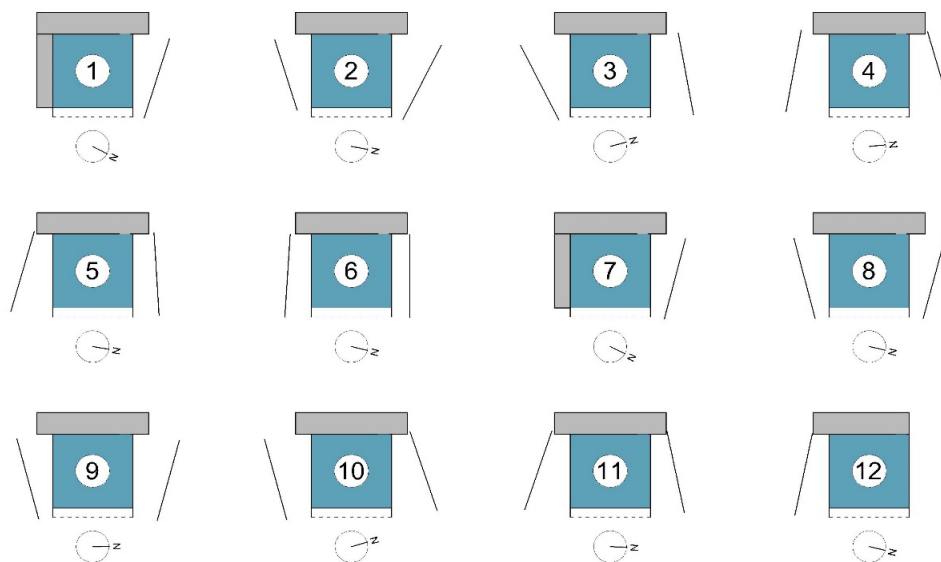
Figura 2 – Modelo geométrico da Sala de Aula 1 gerado após a simulação computacional no EnergyPlus.



a) Figura 2a – Modelo geométrico da sala de aula 1 – frente

b) Figura 2b – Modelo geométrico da sala de aula 1 – fundos

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – Condições de contorno de cada sala de aula analisada.

Fonte: Elaborado pelos autores.

COMPOSIÇÃO DOS FECHAMENTOS

O sistema de fechamento das salas de aula possui a seguinte composição: Estrutura: concreto armado; Paredes: bloco de concreto revestido em ambas as faces por argamassa; Piso: laje de piso em concreto e acabamento em granilite; Cobertura: laje de cobertura em concreto maciço, camada de ar e telha cerâmica; Portas: duas lâminas de compensado e camada de ar interna; e Janelas: esquadria em metalon e vidro comum.

Ressalta-se que nas simulações computacionais realizadas no EnergyPlus os materiais utilizados foram considerados conforme descritos no projeto arquitetônico. As propriedades termofísicas desses materiais utilizados na composição dos fechamentos são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades Termofísicas dos materiais utilizados nos fechamentos da edificação.

Fechamento	Material	Espessura (m)	Propriedades Termofísicas		
			ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	c [J/kg.K]
Parede	Argamassa	0,015	2100	1,15	1000
	Bloco de concreto	0,190	1040	0,25	960
Cobertura	Concreto cobertura	0,167	2400	1,75	1000
	Telha Cerâmica	0,010	2000	1,05	920
Piso	Concreto piso	0,15	2400	1,75	1000
	Piso granilite	0,012	1900	1,00	840
Portas	Compensado	0,005	550	0,15	2300
Janelas	Vidro comum	0,003	2500	1,00	840

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005); CLARKE (1985).

ANÁLISES PARAMÉTRICAS

Nas análises paramétricas são variados os parâmetros descritos na Tabela 7. Optou-se por analisar condicionantes de projeto que influenciam diretamente no desempenho térmico da edificação, tais como: orientação solar, taxa de renovação de ar por hora e composições de fechamentos (verticais, cobertura e acabamento de piso). Nessas simulações computacionais paramétricas, busca-se a analisar outras composições de fechamento e condições de contorno não consideradas na avaliação do desempenho térmico do caso base, em que a edificação é avaliada como no projeto.

Utiliza-se como objeto de estudo a Sala de Aula 12 em condição padrão – CP (taxa de ventilação em 1ren/h - renovação de ar por hora), que apresentou as temperaturas internas mais elevadas dentre as salas de aula analisadas. Na realização das simulações paramétricas, foram mantidas as composições de fechamento de piso, paredes e cobertura do projeto arquitetônico original, sendo modificado apenas o parâmetro em análise. Dessa forma, ao analisar o fechamento vertical, por exemplo, as demais composições de materiais se mantêm como no projeto original. As propriedades termofísicas dos materiais utilizados na composição dos fechamentos das análises paramétricas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 7 - Parâmetros de variação.

Variáveis		Níveis			
1	Orientação solar (Azimute) [°]	0; 90; 180; 270			
2	Taxa de renovação de ar por hora	1; 5; 10			
3	Fechamento vertical	Composição			
			U [W/(m ² .K)]	CT [kJ/m ² K]	
		FV1	Sem revestimento interno Tijolo maciço (10,0cm x 6,0cm x 22,0cm)	3,65	158
			Sem revestimento externo		
		FV2	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0cm x 14,0cm x 24,0cm)	2,46	150
			Argamassa externa (2,5cm)		
		FV3	Placa de gesso acartonado (1,25cm) Lã de rocha (9cm) Placa cimentícia (1cm)	0,45	33
				U [W/(m ² .K)]	CT [kJ/m ² K]
4	Cobertura	COB1	Cobertura de telha de barro (1,0cm) com laje de concreto de 20cm	1,84	458
		COB2	Cobertura de telha fibrocimento com forro de madeira (1,0cm)	2,02	21
		COB3	Laje maciça 10,0cm Câmara de ar (> 5,0cm) Telha metálica 0,1cm Poliuretano 4,0cm Telha metálica 0,1cm	0,55	230
5	Acabamento de piso	PISO1	Piso em madeira		
		PISO2	Piso cerâmico		
		PISO3	Piso em granito		

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 8 - Propriedades termofísicas dos materiais utilizados nas análises paramétricas (continua).

Material	Espessura (m)	Propriedades Termofísicas			
		ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	c [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
Tijolo maciço	0,10	1800	1,00	920	---
Argamassa	0,025	2100	1,15	1000	---
Bloco cerâmico	0,09	1600	0,90	920	---
Gesso acartonado	0,0125	750	0,35	840	---
Lã de rocha	0,09	110	0,045	750	---

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005); CLARKE (1985).

Tabela 8 - Propriedades termofísicas dos materiais utilizados nas análises paramétricas (conclusão).

Material	Espessura (m)	Propriedades Termofísicas			
		ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	c [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
Placa cimentícia	0,01	2200	0,95	840	---
Telha Cerâmica	0,01	2000	1,05	920	---
Concreto cobertura	0,1/0,2	2400	1,75	1000	---
Telha fibrocimento	0,01	1800	0,95	840	---
Forro de madeira	0,01	450	0,10	2300	---
Câmara de ar	---	---	---	---	0,21
Telha metálica	0,001	7800	55	460	---
Poliuretano	0,04	35	0,030	1670	---
Piso madeira	0,005	510	0,12	1380	---
Piso cerâmico	0,01	2000	1,2	850	---
Piso granito	0,015	2880	3,49	840	---

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005); CLARKE (1985).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões compreendem duas partes. A primeira contém a avaliação do desempenho térmico das 12 salas de aula previstas no projeto arquitetônico; enquanto, na segunda parte, é realizada a análise paramétrica.

A avaliação das 12 salas de aula considera quatro condições: CP (condição padrão); S (com sombreamento); V (com ventilação); e SV (com sombreamento e ventilação). Para cada condição de avaliação é também considerado três tons de cores na face exterior do fechamento vertical: C (cor clara); M (cor média); e E (cor escura). Dessa forma, ao realizar a simulação computacional das 12 salas de aula, considerando quatro condições de avaliação e três tons de fechamentos externos em cada sala de aula, obteve-se um total de 144 casos modelados na avaliação de desempenho térmico no período de verão. No inverno, de acordo com as recomendações da NBR 15575 (ABNT, 2013), a avaliação das 12 salas de aula

considera apenas a CP (condição padrão) e os três tons de cores na face exterior do fechamento vertical, totalizando 36 casos modelados.

A análise paramétrica considera a variação dos parâmetros descritos na Tabela 7. Nas condições de verão e inverno, são considerados quatro orientações solares diferentes; três taxas de renovação de ar por hora; três tipos de fechamento vertical; três tipos de composição de cobertura; e três tipos de acabamento de piso. Por meio da simulação computacional da Sala de Aula 12 em CP e da variação desses parâmetros, obteve-se 32 casos modelados.

Para o verão, foram consideradas: i) a condição padrão (CP), em que a taxa de ventilação é de 1ren/h, sem dispositivo de sombreamento; ii) a condição com sombreamento (S), em que mantém a taxa de 1ren/h porém aplica-se o dispositivo de proteção solar; iii) a condição com ventilação (V), com taxa de 5ren/h e janelas sem proteção; iv) e a condição ventilação e sombreamento (SV), em que a taxa de ventilação é de 5ren/h com a inserção de sombreamento. E para a o inverno foi considerada apenas a condição padrão (CP), conforme recomenda a norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

AVALIAÇÃO DAS SALAS DE AULA

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os resultados obtidos de temperaturas internas máximas no verão e mínimas no inverno, considerando as salas de aula de 1 a 12 da Escola Municipal de Bento Rodrigues. As células destacadas em amarelo são as que não atendem aos critérios da norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

Tabela 9 – Resultados da avaliação do desempenho térmico da edificação no Verão.

Te, máx. 32,0 COR	Temperaturas internas máximas (°C) / Condição											
	CP			S			V			SV		
C	M	E	C	M	E	C	M	E	C	M	E	
Sala1	31,7	32,2	32,5	29,9	30,1	30,2	31,4	31,6	31,7	30,4	30,6	30,6
Sala 2	31,9	32,3	32,6	29,9	30,1	30,2	31,5	31,7	31,8	30,4	30,6	30,6
Sala 3	32,0	32,4	32,7	29,9	30,1	30,2	31,5	31,7	31,9	30,5	30,6	30,7
Sala 4	32,0	32,4	32,7	29,9	30,1	30,2	31,6	31,7	31,8	30,5	30,6	30,6
Sala 5	31,9	32,3	32,6	29,9	30,1	30,2	31,5	31,7	31,8	30,4	30,6	30,6
Sala 6	31,9	32,3	32,6	29,9	30,1	30,2	31,5	31,7	31,8	30,4	30,6	30,6
Sala 7	31,7	32,2	32,5	29,9	30,1	30,2	31,4	31,6	31,8	30,4	30,6	30,6
Sala 8	31,9	32,3	32,6	29,9	30,1	30,2	31,5	31,7	31,8	30,5	30,6	30,6
Sala 9	32,0	32,3	32,6	29,9	30,1	30,2	31,5	31,7	31,8	30,4	30,6	30,6
Sala10	32,0	32,4	32,7	29,9	30,1	30,2	31,5	31,7	31,9	30,5	30,6	30,7
Sala11	32,0	32,3	32,6	29,9	30,1	30,2	31,6	31,7	31,8	30,5	30,6	30,6
Sala12	31,9	32,4	32,7	30,0	30,2	30,3	31,5	31,7	31,9	30,5	30,6	30,7

Fonte: Elaborado pelos autores.

Te, máx. = valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C;

COR = cor da face exterior do fechamento vertical (“C” cor clara: $\alpha = 0,3$; “M” cor média: $\alpha = 0,5$; “E” cor escura: $\alpha = 0,7$);

CP = condição padrão (ambiente com ventilação somente por infiltração através de frestas em janelas e portas, a uma taxa de 1 ren/h, sem sombreamento das janelas);

S = com sombreamento (com proteção solar externa ou interna, como cortinas, venezianas, ou outros elementos que impeçam a entrada da radiação solar direta ou reduzam em 50% a incidência da radiação solar global no ambiente);

V = com ventilação (ambiente ventilado com 5 ren/h no período de verão);

SV = com sombreamento e ventilação (com as duas opções anteriores).

Tabela 10 – Resultados da avaliação do desempenho térmico da edificação no inverno.

Te, mín.	COR	Temperaturas internas mínimas (°C) da sala de aula para CP											
		Sala 1	Sala 2	Sala 3	Sala 4	Sala 5	Sala 6	Sala 7	Sala 8	Sala 9	Sala 10	Sala 11	Sala 12
8,7	C	16,9	17,0	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	17,0	17,0	16,9	16,9	17,2
	M	17,1	17,2	17,1	17,1	17,1	17,0	17,1	17,1	17,2	17,1	17,1	17,4
	E	17,1	17,2	17,2	17,2	17,1	17,0	17,1	17,2	17,3	17,1	17,1	17,5

Fonte: Elaborado pelos autores.

Te, mín. = valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C;

COR = cor da face exterior do fechamento vertical (“C” cor clara: $\alpha = 0,3$; “M” cor média: $\alpha = 0,5$; “E” cor escura: $\alpha = 0,7$);

CP = condição padrão (ambiente com ventilação somente por infiltração através de frestas em janelas e portas, a uma taxa de 1 ren/h, sem sombreamento das janelas).

De acordo com os valores apresentados nas Tabelas 9 e 10, referentes às temperaturas internas, em condições de verão e inverno, as salas de aula apresentam, de modo geral, um desempenho térmico adequado. Ressalta-se o fato de que as 12 salas de aula são idênticas entre si em questões técnicas e de construção, diferindo-se somente na orientação solar e nas obstruções do entorno imediato, posto que nenhuma está posicionada de forma idêntica à outra; o que foi levado em consideração nas simulações computacionais.

No verão, as salas apresentaram temperaturas máximas em torno de 32°C quando analisadas nas condições padrão - CP (taxa de renovação = 1/h e sem sombreamento) e considerando-se o valor da absorvância à radiação solar $\alpha = 0,3$ (cores claras). Porém, ao se elevar o valor da absorvância (α) para 0,5 e para $\alpha = 0,7$ (cores médias e escuras, respectivamente), na mesma condição padrão, nenhuma sala atendeu ao critério de desempenho térmico mínimo (M) estabelecido na norma NBR 15575 (ABNT, 2013), em que a temperatura interna máxima tem que ser menor ou igual à temperatura externa máxima. Cada sala de aula analisada apresentou um acréscimo médio de 0,3°C na temperatura interna quando simulada com o valor de $\alpha = 0,5$; e um acréscimo médio de 0,6°C quando utilizado o valor de $\alpha = 0,7$.

Para as análises feitas sob condições de ventilação (V), sombreamento (S) e ventilação e sombreamento (SV), as temperaturas internas máximas, para todos os valores de absorvância solar, estão dentro do critério de desempenho térmico mínimo (M), de acordo com a norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

Em relação às simulações computacionais realizadas em condições de inverno, a análise permite concluir que todas as 12 salas de aula se adequam ao critério mínimo de desempenho térmico, ao apresentar temperaturas internas mínimas iguais ou superiores à temperatura externa mínima, acrescida de 3°C.

Destaca-se a Sala de Aula 12, com as aberturas orientadas no eixo leste-oeste. Neste ambiente foram encontradas as maiores temperaturas, nas condições padrão, tanto para verão quanto para inverno, para todos os valores de absorvância solar analisados. Tal característica está relacionada ao fato de que a parede voltada para o norte não possui sombreamento, condição essa que, quando no verão, é caracterizada pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013) como situação crítica.

Por fim, em suma, considerando-se o critério de avaliação da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) para o verão, em que o valor máximo diário da temperatura do ar interior deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior, a edificação analisada atende ao critério mínimo da norma para o verão em quase todas as condições, com exceção apenas quando a edificação não está sendo ventilada, ou seja, apenas com infiltração através de frestas (taxa de 1 ren/h) e cores de tons médios e escuros. Mesmo assim, neste caso os valores das temperaturas internas ficam bem próximas da temperatura máxima externa. Para o inverno, considerando o critério de avaliação da norma NBR 15575 (ABNT, 2013),

em que os valores mínimos diários da temperatura do ar interior devem ser sempre maiores ou iguais à temperatura mínima externa acrescida de 3°C, considerando a condição padrão, a edificação atende ao critério da norma para o inverno em todas as condições, atingindo o nível superior.

SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS

Nesta etapa são apresentados os resultados obtidos das simulações paramétricas, considerando a orientação solar da edificação, a ventilação natural do ambiente, a composição do fechamento vertical, da cobertura e o acabamento de piso.

ORIENTAÇÃO SOLAR DA EDIFICAÇÃO

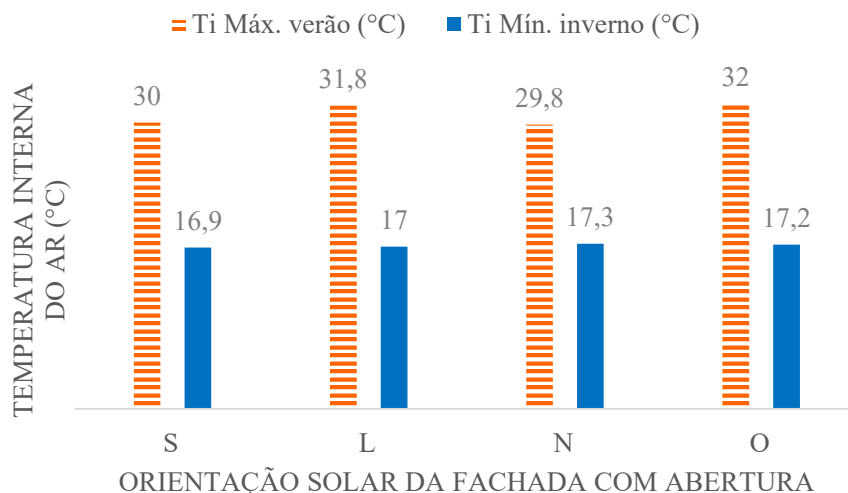
O primeiro parâmetro analisado é a orientação solar da edificação e sua influência nas temperaturas internas das salas de aula. Considera-se como objeto de estudo a Sala de Aula 12, que apresentou a condição mais crítica na avaliação de desempenho térmico no período do verão, ou seja, as maiores temperaturas internas. Nas análises, a orientação solar é considerada de forma que a fachada principal com janela fica orientada conforme os azimutes apresentados na Tabela 11. Considerou-se apenas a condição padrão (CP) e a cor clara nas paredes ($\alpha = 0,3$) para se obterem os resultados, destacando-se as temperaturas internas máximas e mínimas, para verão e inverno, respectivamente, apresentados na Figura 4.

Tabela 11 – Orientação solar da abertura da Sala de Aula 12.

Azimute (°)	Orientação solar
0	Sul
90	Leste
180	Norte
270	Oeste

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 – Temperaturas internas máximas e mínimas da Sala de Aula 12, conforme orientação solar da fachada principal com abertura.



Fonte: Elaborado pelos autores.

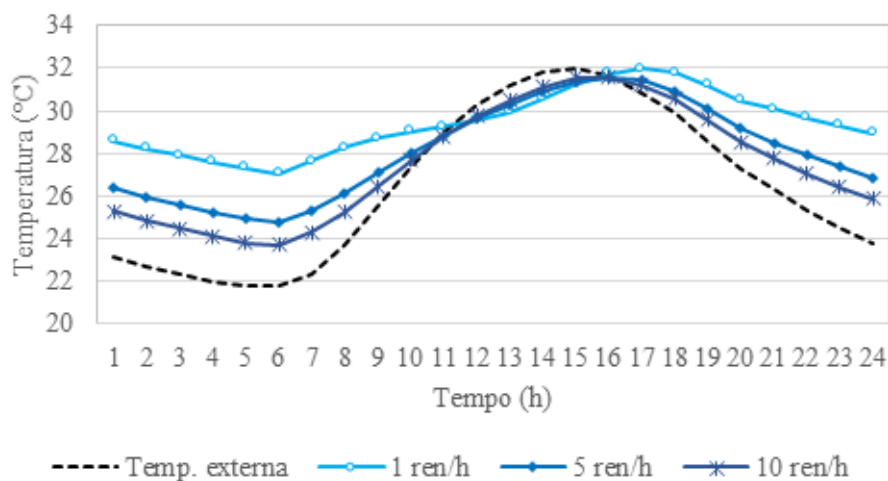
Ao analisar os resultados, observa-se que as temperaturas internas mais elevadas no período de verão são obtidas com a orientação solar da abertura voltada para o Leste ou para o Oeste. De acordo com a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), no verão, configura-se condição crítica quando se tem abertura voltada para o Oeste e parede exposta voltada para o Norte; situações essas encontradas na sala em análise, justificando as altas temperaturas internas para orientação solar da abertura voltada para o Oeste. Já a fachada Leste se torna crítica por receber radiação solar direta em quase todo o período da manhã, tornando o ambiente interno mais aquecido ao longo do dia. Este mesmo resultado foi obtido por Santos, Gomes e Ribas (2021). Elaborado pelos autores concluíram que as aberturas da fachada principal voltadas para o norte ou sul proporcionam um desempenho térmico mais adequado, com temperaturas máximas menores no verão.

No período do inverno, houve pouca variação na temperatura interna, sendo que a orientação da abertura para o Norte implicou no maior valor. Durante o inverno, as trajetórias solares mais baixas permitem que a radiação solar entre no ambiente diretamente, aquecendo-o e aumentando sua temperatura interna.

VENTILAÇÃO NATURAL DO AMBIENTE

De forma simplificada, a ventilação natural de um ambiente pode ser representada por meio da adoção de uma taxa de renovação de ar por hora (ren/h). Neste tópico, é avaliada a influência de diferentes números de ren/h para representar: infiltração de ar (1 ren/h) e ventilação natural (5 ren/h), de acordo com a norma NBR 15575 (ABNT, 2013); e uma taxa para representar um número alto de trocas de ar por hora devido ao efeito chaminé (10 ren/h). Nas Figuras 5 e 6, apresenta-se a influência da adoção do número de ren/h nas temperaturas internas do ambiente para verão e inverno, respectivamente.

Figura 5 – Temperaturas internas da Sala de Aula 12, considerando o dia típico de verão.

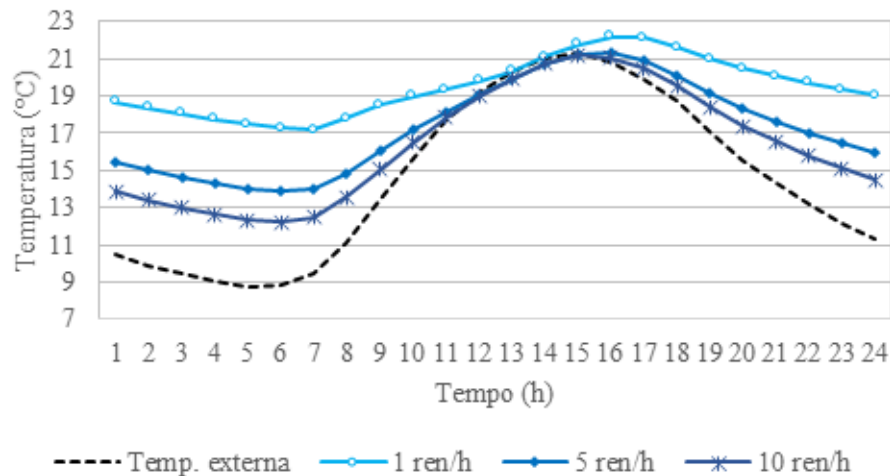


Fonte: Elaborado pelos autores.

Pode-se observar que, ao aumentar o número de ren/h, o perfil de temperatura interna se aproxima do perfil de temperatura externa, independente se é considerado o dia típico de verão ou inverno. Esse fato ocorre, pois, a ventilação natural pela ação dos ventos contribui na retirada do excesso de calor do ambiente. Assim, uma vez que a temperatura do ar externo é menor que a do ar interno, o resfriamento da estrutura torna-se produto da convecção, e, com isso, as trocas de calor são ativadas pela velocidade do ar. Ou seja, quanto maior for o número de renovações do ar por hora, mais trocas de calor acontecem, favorecendo o resfriamento interno. Nesse sentido, é importante também considerar o posicionamento das aberturas em

função da direção do vento predominante para potencializar as trocas de calor. Dependendo do arranjo proposto, o vento pode auxiliar ou não na ventilação do ambiente por efeito chaminé (CARMARGOS *et al.*, 2018).

Figura 6 – Temperaturas internas da Sala de Aula 12, considerando o dia típico de inverno.



Fonte: Elaborado pelos autores.

COMPOSIÇÃO DO FECHAMENTO VERTICAL

Os resultados obtidos comparando os três fechamentos verticais analisados neste trabalho, categorizados como: FV1, FV2 e FV3, são apresentados nas Tabelas 12 e 13, para verão e inverno, respectivamente. Nas simulações computacionais, considerou-se a condição padrão (CP), cor clara nas paredes ($\alpha = 0,3$) e orientação solar da abertura para o Oeste (condição mais crítica).

Tabela 12 – Resultados da avaliação dos fechamentos verticais no verão.

ZB	Te, máx.	Condição	COR	Fechamento	Temperatura interna máxima (°C) Sala de Aula 12
3	32,0	CP	Clara	FV1	32,7
				FV2	32,1
				FV3	34,6

Fonte: Elaborado pelos autores.

ZB = zona bioclimática definida na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Te, máx. = valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C

CP = condição padrão (ambiente com ventilação somente por infiltração através de frestas em janelas e portas, a uma taxa de 1 ren/h, sem sombreamento das janelas)

COR = cor da face exterior do fechamento vertical (cor clara: $\alpha = 0,3$)

Tabela 13 – Resultados da avaliação dos fechamentos verticais no inverno.

ZB	Te, mín.	Condição	COR	Fechamento	Temperatura interna mínima (°C)
					Sala de Aula 12
3	8,7	CP	Clara	FV1	15,8
				FV2	16,4
				FV3	15,7

Fonte: Elaborado pelos autores.

ZB = zona bioclimática definida na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Te, mín. = valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C

CP = condição padrão (ambiente com ventilação somente por infiltração através de frestas em janelas e portas, a uma taxa de 1 ren/h, sem sombreamento das janelas)

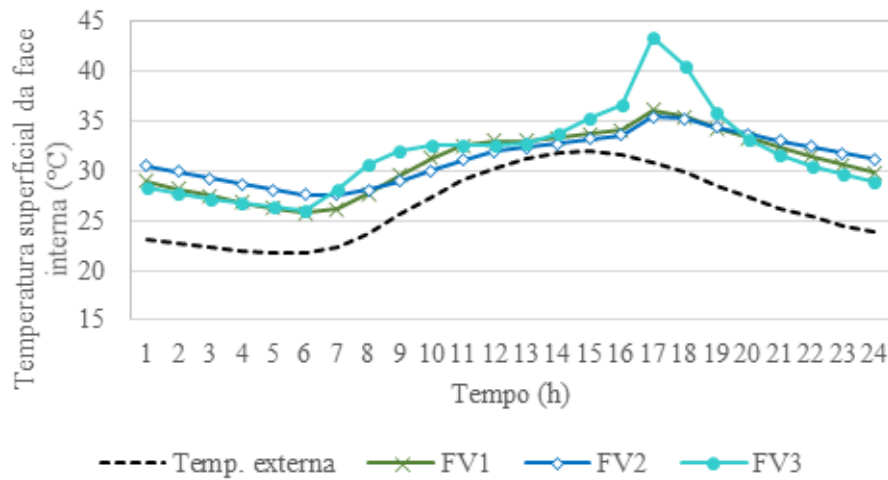
COR = cor da face exterior do fechamento vertical (cor clara: $\alpha = 0,3$)

Observa-se que, embora os fechamentos analisados não sejam capazes de proporcionar o atendimento ao nível mínimo de desempenho térmico no verão em relação à norma NBR 15575 (ABNT, 2013), considerando as condições de contorno adotadas neste caso, posto que a temperatura externa máxima é 32°C, o uso do fechamento FV2 (argamassa + bloco cerâmico + argamassa) proporciona o menor valor de temperatura máxima no verão. A composição FV2 possui características indicadas pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005), ou seja, o valor $U = 2,46 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ e $CT = 150 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ do fechamento FV2 atendem ao critério estabelecido pela norma.

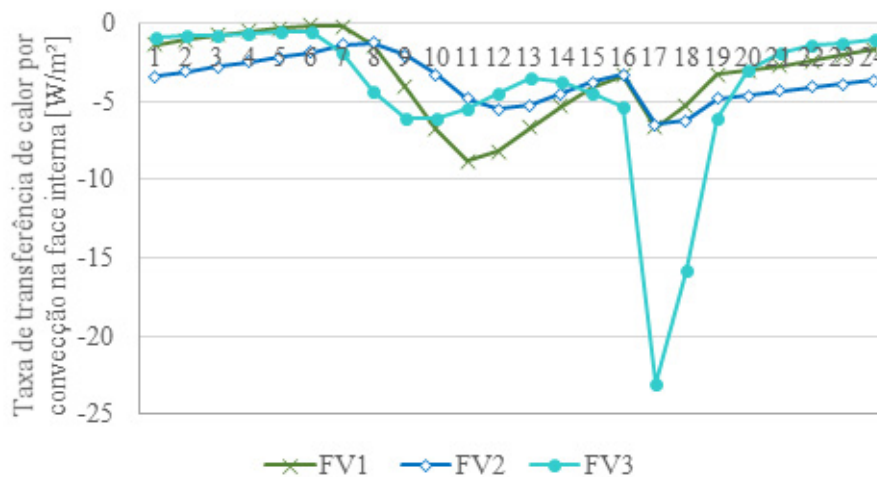
Ao observar os valores de transmitância térmica e capacidade térmica dos fechamentos FV1 e FV3, nota-se o não atendimento integral à norma NBR 15575 (ABNT, 2013). O alto valor da transmitância apresentado pela composição FV1 faz com que haja uma alta taxa de transferência de calor por condução, implicando na variação de temperatura entre verão e inverno ainda maior, porém a capacidade térmica da composição tornou essa variação mais amena, pois favoreceu o atraso térmico.

O uso da composição de fechamento FV3 (placa de gesso + lã de rocha + placa cimentícia) implica na maior temperatura interna no verão. Esse comportamento vai ao encontro do que afirma Viana, Souza e Gomes (2019), os quais afirmam que nem sempre um fechamento vertical isolante proporciona o melhor desempenho térmico, pois dificulta as perdas de calor nas horas em que a temperatura externa está mais baixa que a interna. O uso de material isolante dificulta os ganhos e as perdas de calor. Como ilustra-se na Figura 7, a temperatura superficial interna da parede voltada para o oeste é maior na composição FV3 e a taxa de transferência de calor por convecção é a maior dentre os três casos analisados (Figura 8).

Na análise do período de inverno, o FV3 gera as menores temperaturas internas mínimas, em função do isolamento dos fechamentos verticais e consequente diminuição nos ganhos de calor. O fechamento FV3 apresenta o menor valor de capacidade térmica dentre as composições analisadas. Esta característica confere ao material uma maior suscetibilidade à variação de temperatura exterior. Da mesma maneira, no inverno, as temperaturas internas se apresentam baixas devido ao fechamento ter baixa capacidade de retenção de calor, deixando a temperatura interna variar semelhante à externa.

Figura 7 – Temperaturas superficiais da face interna da parede da fachada oeste no dia típico de verão.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8 – Taxa de transferência de calor por convecção por área da parede da fachada oeste no dia típico de verão.

Fonte: Elaborado pelos autores.

COMPOSIÇÃO DA COBERTURA

Nesta análise, os resultados obtidos de temperatura interna máxima e temperatura interna mínima das simulações computacionais para as composições de cobertura, nomeadas neste trabalho de COB1, COB2 e COB3, são apresentados nas Tabelas 14 e 15, referentes a temperaturas internas máximas e temperaturas internas mínimas, para verão e inverno, respectivamente. As condições de contorno adotadas são as mesmas da análise de composição do fechamento vertical.

Tabela 14 – Resultados da avaliação das coberturas no verão.

ZB	Te, máx.	Condição	COR	Fechamento	Temperatura interna máxima (°C)
					Sala de Aula 12
3	32,0	CP	Clara	COB1	31,7
				COB2	35,2
				COB3	31,2

Fonte: Elaborado pelos autores.

ZB = zona bioclimática definida na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Te, máx. = valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C

CP = condição padrão (ambiente com ventilação somente por infiltração através de frestas em janelas e portas, a uma taxa de 1 ren/h, sem sombreamento das janelas)

COR = cor da face exterior do fechamento vertical (cor clara: $\alpha = 0,3$)

Tabela 15 – Resultados da avaliação das coberturas no inverno.

ZB	Te, mín.	Condição	COR	Fechamento	Temperatura interna mínima (°C)
					Sala de Aula 12
3	8,7	CP	Clara	COB1	17,3
				COB2	14,8
				COB3	17,2

Fonte: Elaborado pelos autores.

ZB = zona bioclimática definida na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Te, mín. = valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C

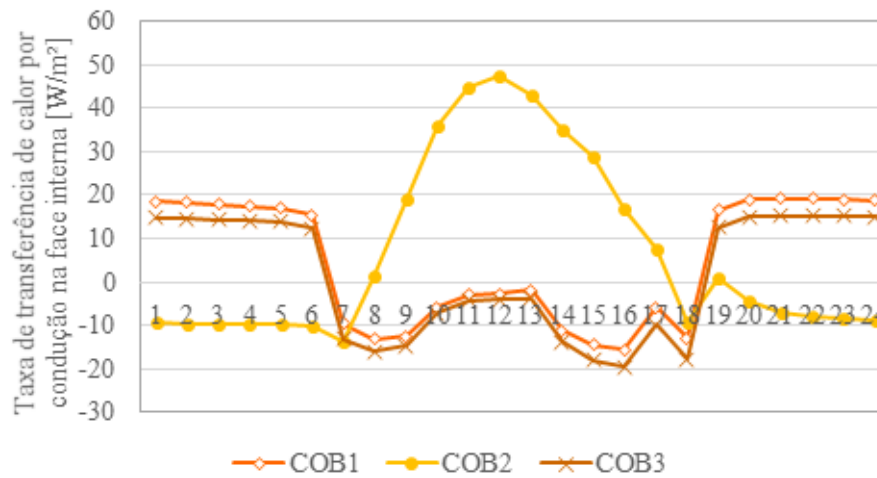
CP = condição padrão (ambiente com ventilação somente por infiltração através de frestas em janelas e portas, a uma taxa de 1 ren/h, sem sombreamento das janelas)

COR = cor da face exterior do fechamento vertical (cor clara: $\alpha = 0,3$)

Ao utilizar a cobertura com telha sanduiche (COB3), no verão, a temperatura interna máxima fica inferior ao limite permitido para o desempenho mínimo, enquanto que no inverno as temperaturas internas mantem-se adequadas aos critérios da norma 15575 (ABNT, 2013). Conforme pode-se observar nas Figuras 9 e 10, a cobertura COB3 possui a menor transmitância dentre os três fechamentos horizontais analisados, e consequentes menores taxas de transferência de calor por condução.

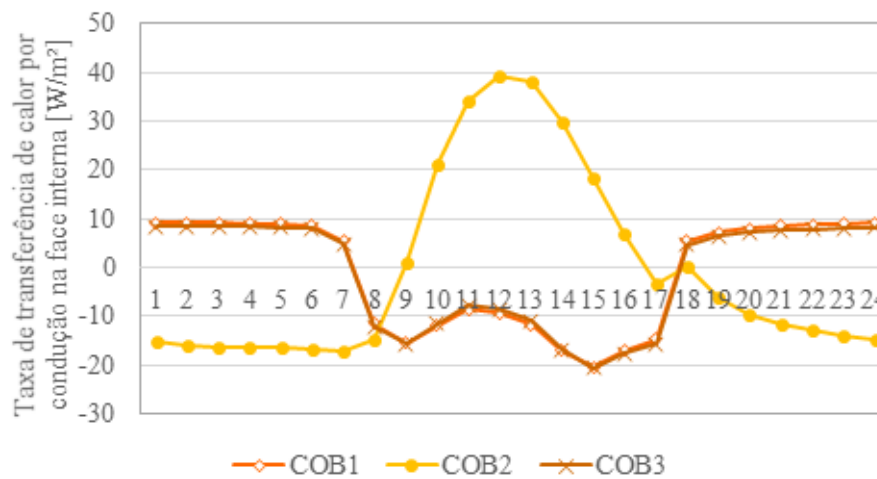
E, caso seja considerado uma zona de ventilação entre a telha sanduiche e a laje de cobertura, o desempenho térmico da edificação seria ainda melhor (VIANA; SOUZA; GOMES, 2019).

Figura 9 – Taxa de transferência de calor por condução por área das coberturas analisadas – Dia típico de verão.



Fonte: Elaborado pelos autores.

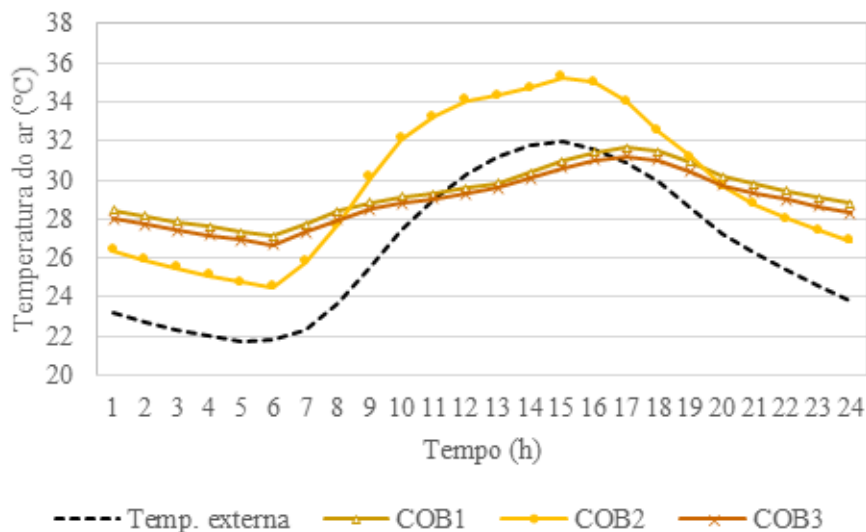
Figura 10 – Taxa de transferência de calor por condução por área das coberturas analisadas - Dia típico de inverno.



Fonte: Elaborado pelos autores.

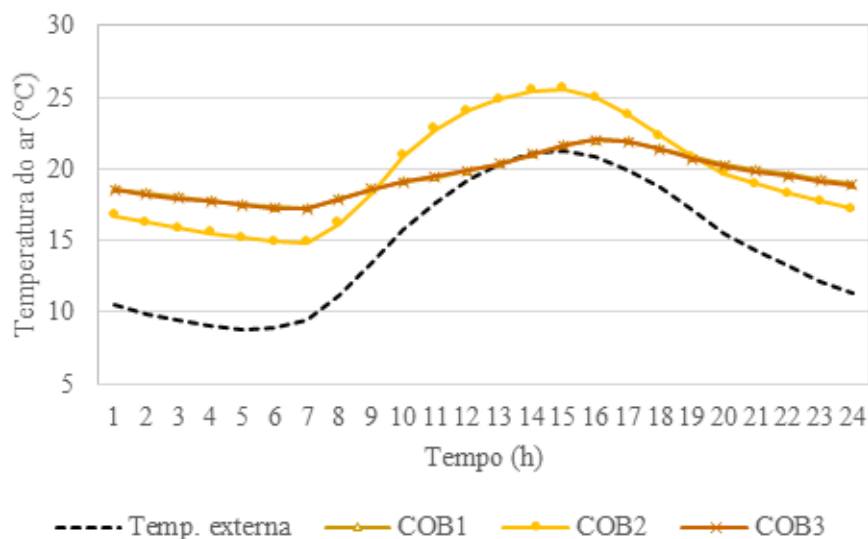
O uso da cobertura com maior transmitância – COB2 (telha fibrocimento com forro de madeira) implica no pior desempenho térmico dentre os três casos. A COB 2 apresentou o maior valor de temperatura interna no verão e menor valor de temperatura no inverno, ou seja, foi o fechamento com maior variação de temperatura interna, dentre os analisados (Figura 11 e Figura 12). O seu alto valor de transmitância térmica unido ao baixo valor de capacidade térmica, ou seja, alta taxa de transferência de calor com baixa capacidade de retenção, faz com que a temperatura interna varie rápida e igualmente à temperatura externa.

Figura 11 – Evolução temporal da temperatura do ar considerando diferentes tipos de cobertura - Dia típico de verão.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 12 – Evolução temporal da temperatura do ar considerando diferentes tipos de cobertura - Dia típico de inverno.



Fonte: Elaborado pelos autores.

ACABAMENTO DE PISO

A simulação computacional nesta fase considera o acabamento do piso e suas implicações nas temperaturas internas da Sala de Aula 12. Nas Tabelas 16 e 17 apresentam-se os resultados das três condições analisadas (PISO1, PISO2 e PISO3), referentes a temperaturas internas máximas e temperaturas internas mínimas, para verão e inverno, respectivamente.

Conforme pode-se observar nas Tabelas 16 e 17, o uso de piso cerâmico (PISO2) ou de piso em granito (PISO3) não gera alterações significativas no comportamento térmico da edificação. No entanto, o uso

de acabamento de piso em madeira (PISO1) implica em temperaturas internas um pouco mais elevadas no período de verão.

Tabela 16 – Resultados da avaliação do acabamento de piso no verão.

ZB	Te, máx.	Condição	COR	Fechamento	Temperatura interna máxima (°C)
					Sala de Aula 12
3	32,0	CP	Clara	PISO1	32,3
				PISO2	31,9
				PISO3	31,9

Fonte: Elaborado pelos autores.

ZB = zona bioclimática definida na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Te, máx. = valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C

CP = condição padrão (ambiente com ventilação somente por infiltração através de frestas em janelas e portas, a uma taxa de 1 ren/h, sem sombreamento das janelas)

COR = cor da face exterior do fechamento vertical (cor clara: $\alpha = 0,3$)

Tabela 17 – Resultados da avaliação do acabamento de piso no inverno.

ZB	Te, mín.	Condição	COR	Fechamento	Temperatura interna mínima (°C)
					Sala de Aula 12
3	8,7	CP	Clara	PISO1	17,2
				PISO2	17,2
				PISO3	17,2

Fonte: Elaborado pelos autores.

ZB = zona bioclimática definida na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Te, mín. = valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C

CP = condição padrão (ambiente com ventilação somente por infiltração através de frestas em janelas e portas, a uma taxa de 1 ren/h, sem sombreamento das janelas)

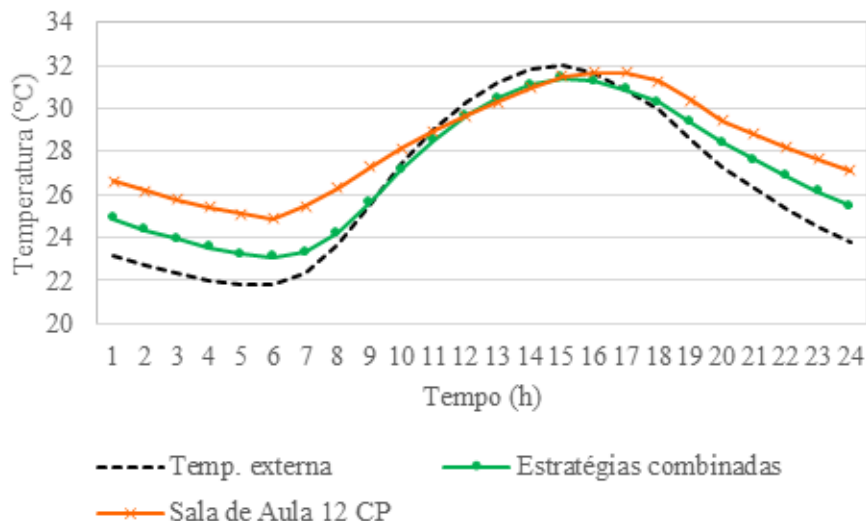
COR = cor da face exterior do fechamento vertical (cor clara: $\alpha = 0,3$)

Retomando a Tabela 8, percebe-se que o valor do calor específico do piso em madeira é de 1380 J/Kg.K, sendo o maior dentre os materiais analisados neste item (o calor específico de piso cerâmico e granito são 850 J/Kg.K e 840 J/Kg.K, respectivamente). Sabe-se que o calor específico está diretamente relacionado à capacidade térmica e ao atraso térmico. Assim, tem-se que o piso em madeira, possui, então, maior capacidade de retenção de calor, e, portanto, apresenta temperatura levemente maior dentre os casos analisados.

COMBINAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS

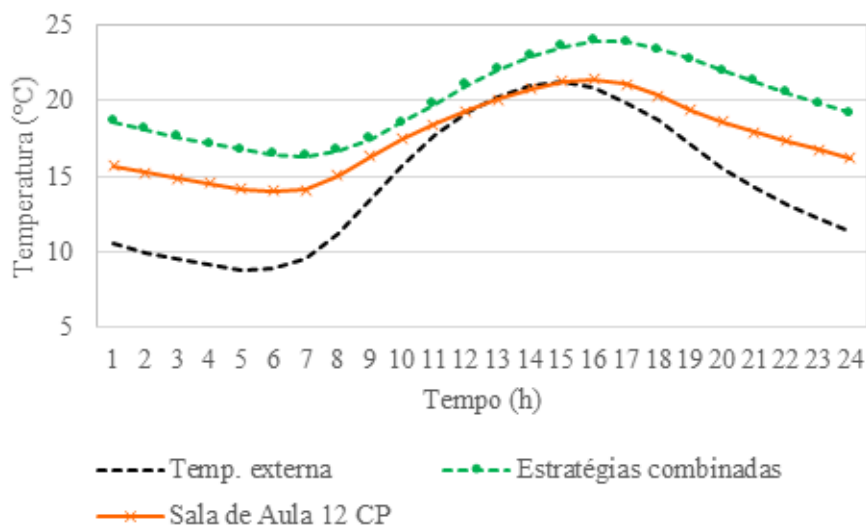
Neste item é analisado o uso simultâneo das estratégias que obtiveram os melhores resultados para o verão e inverno: fachada com abertura de janela voltada para o Sul; 10 renovações de ar por hora para representar a ventilação no período de verão e 1 renovação de ar por hora para representar a infiltração no período de inverno; fechamento vertical FV2; cobertura COB3; e acabamento de piso PISO2. Nas Figuras 13 e 14, são apresentados os resultados considerando a combinação das estratégias no verão e inverno, respectivamente.

Figura 13 – Evolução temporal da temperatura do ar considerando o uso simultâneo das estratégias - Dia típico de verão.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 14 – Evolução temporal da temperatura do ar considerando o uso simultâneo das estratégias - Dia típico de inverno.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Comparando-se os resultados obtidos com o uso concomitante das melhores estratégias com os resultados da simulação do projeto arquitetônico original da Sala de Aula 12 em condição padrão, observa-se que as estratégias consideradas são fundamentais para melhoria do desempenho térmico da edificação. No verão, as estratégias conjuntas reduziram não só o pico da temperatura máxima, que já estava dentro dos limites da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), mas também as temperaturas internas ao longo de todo o dia típico de verão; enquanto, no inverno, houve um aumento considerável nas temperaturas internas ao longo de todo o dia típico de inverno.

CONCLUSÃO

Neste trabalho considerou-se um edifício escolar situado em uma região atingida por um desastre, que irá receber alunos que vivenciaram o drama de perder suas casas, bens pessoais e entes queridos. Dessa forma, maior é a necessidade de um ambiente adequado, apto e confortável para recebê-los. Em busca desse objetivo se delineou esta pesquisa, que teve como objeto de estudo a Escola Municipal de Bento Rodrigues, que está sendo construída no projeto de reassentamento da comunidade de Bento Rodrigues. Comunidade essa, que foi acometida pelo rompimento da Barragem de Fundão, em novembro de 2015, que destruiu completamente o local.

Foi realizada a análise do desempenho térmico do ambiente escolar, focada nas salas de aula, por meio de simulações computacionais no programa EnergyPlus. Os resultados referentes às temperaturas internas, gerados pelas simulações no programa EnergyPlus demonstraram que as salas de aula apresentam, de modo geral, desempenho térmico adequado. Em todas as salas, sob condições padrão e absorvância $\alpha = 0,3$, as temperaturas internas atenderam ao desempenho mínimo, segundo a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), tomada como referência.

Após a realização das análises computacionais no programa EnergyPlus e conclusão de que a Sala de Aula 12 apresentou as maiores temperaturas sob condição padrão, este ambiente foi submetido a análises paramétricas. Verificou-se que, considerando a Zona Bioclimática 3, a abertura das salas deve estar orientada para o norte ou para o sul; a ventilação natural das salas é um condicionante importante no projeto, pois contribui na retirada do excesso de calor do ambiente; as características dos fechamentos indicados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013) proporcionam um desempenho térmico adequado; e a escolha do acabamento de piso não gera alterações significativas no comportamento térmico da edificação.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005. 72 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013. 280 p.
- CAMARGOS, B. H. L.; SOUZA, H. A.; GOMES, A. P.; LADEIRA, A.; REIS, R. A.; MAPA, L. P. P. Naturally ventilated industrial sheds: an investigation about the influence of wind direction in flow rate efficiency in continuous roof vents. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 37, n. 1, p. 1-18, 2018.
- CLARKE, J. A. **Energy Simulation in Building Design**. Boston, USA: Adan Hilger Ltd, 1985. 388p.
- DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Version 9.4.0**. 2020. Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>. Acesso em: 12 out. 2020a.
- DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Version 9.4.0 Documentation**: Input Output Reference. 2020b.
- DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Weather Data**. 2020. Disponível em: <https://energyplus.net/weather>. Acesso em: 12 nov. 2020c.

FUNDAÇÃO RENOVA. 2020. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org>. Acesso em: 20 jun. 2020.

GOMES, A. P. **Avaliação do desempenho térmico de edificações unifamiliares em *light steel framing***. 2007. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GUARDA, E. L. A.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Parâmetros climáticos para simulação de desempenho térmico segundo a NBR 15.575. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. e019014, 2020.

VIANA, F. S.; SOUZA, H. A.; GOMES, A. P. Residência em contêiner: comparativo de estratégias para a melhoria do desempenho térmico. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019011, 2019.

SANTOS, L. L. F.; GOMES, A. P.; RIBAS, R. A. J. Avaliação pós-ocupação e análise do desempenho térmico em habitação de interesse social com sistema de construção em concreto moldado in loco. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 6, p. 47831-47838, 2021.