

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE TÉRMICA DE PAREDE TROMBE E PAREDES VERDES EM EDIFÍCIO  
HABITACIONAL NA CIDADE DE PORTO ALEGRE

por

Rodrigo Echer

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Echer, Rodrigo  
ANÁLISE TÉRMICA DE PAREDE TROMBE E PAREDES VERDES  
EM EDIFÍCIO HABITACIONAL NA CIDADE DE PORTO ALEGRE /  
Rodrigo Echer. -- 2021.  
20 f.  
Orientadora: Leticia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. EnergyPlus. 2. Conforto Térmico. 3. Parede  
Trombe. 4. Parede Verde. I. Jenisch Rodrigues,  
Leticia, orient. II. Título.

Rodrigo Echer

ANÁLISE TÉRMICA DE PAREDE TROMBE E PAREDES VERDES EM EDIFÍCIO  
HABITACIONAL NA CIDADE DE PORTO ALEGRE

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, maio de 2021

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmã por acreditarem no meu potencial como estudante e ser humano.  
Aos meus colegas pelas horas de estudo divididas e aos meus amigos pelo suporte nos momentos de tristezas e alegrias.

*Um dia, alguém me mostrou um copo de água que estava meio cheio.  
E ele disse: "Está meio cheio ou meio vazio?".  
Então eu bebi a água. Acabou-se o problema.*

*Alejandro Jodorowsky*

Echer, Rodrigo. **ANÁLISE TÉRMICA DE PAREDE TROMBE E PAREDES VERDES EM EDIFÍCIO HABITACIONAL NA CIDADE DE PORTO ALEGRE.** 2021. 20p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## RESUMO

Diante da crescente demanda mundial por energia, faz-se necessário buscar iniciativas que favoreçam um melhor emprego dos recursos disponíveis. Dentre as muitas opções estão as iniciativas de climatização passiva. O presente trabalho visa o estudo de dois desses elementos, empregados em uma edificação de interesse habitacional na cidade de Porto Alegre, a parede trombe e as chamadas paredes verdes. Busca esclarecer suas capacidades em fornecer conforto térmico aos ocupantes, baseado no método adaptativo. Fazendo uso do software *EnergyPlus*, simulou-se inicialmente a edificação sem qualquer elemento de climatização e posteriormente estudou-se os efeitos individuais dos aparatos na fachada norte da casa. O algoritmo *TrombeWall* é utilizado para simular a parede trombe, enquanto a parede verde descrita como uma camada exterior à parede utilizando o método de transferência de calor e umidade (HAMT) do programa. Verifica-se que a parede trombe diminui as horas de conforto térmico em todas as estações do ano, exceto no inverno onde há um acréscimo de 26,6% nas horas de conforto, com aumento médio de 2,9°C para o período. A parede verde revela-se favorável ao conforto térmico em todas as estações, chegando a aumentar em 15,68% as horas de conforto anuais, quando comparada com a edificações desprotegida.

**PALAVRAS-CHAVE:** *EnergyPlus*, Conforto Térmico, Parede Trombe, Parede Verde.

Echer, Rodrigo. **THERMAL ANALYSIS OF TROMBE AND GREEN FAÇADES IN A RESIDENTIAL BUILDING IN THE CITY OF PORTO ALEGRE**. 2021. 20p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## ABSTRACT

Faced with the growing worldwide demand for energy, it is necessary to look for initiatives that favor a better use of available resources. Between many options there are passive air conditioning initiatives. This paper aims to study two of these elements, used in a residential building in the city of Porto Alegre, the trombe wall and the so-called green façade, seeking to clarify their capabilities in providing thermal comfort to the occupants, based on the adaptive method. Using EnergyPlus software, the building was initially simulated without any climatization element and later the effects of the individual elements on the northern façade of the house were studied. The TrombeWall native algorithm in EnergyPlus is used to simulate the trombe wall, while the green wall is described as an outer layer to the wall using the program's heat and moisture transfer method (HAMT). The trombe wall is found to decrease thermal comfort hours in all seasons except winter, where there is a 26.6% increase in comfort hours, with an average increase of 2.9°C for the period. The green façade proves to be favorable for thermal comfort in all seasons, increasing the annual comfort hours by 15.68%, when compared to the unprotected building.

**KEYWORDS:** EnergyPlus, Thermal Comfort, Trombe Wall, Green Façade

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1- (A) PAREDE TROMBE NÃO VENTILADA; (B) PAREDE TROMBE COM ABERTURA PARA INVERNO; (C) PAREDE TROMBE COM ABERTURA PARA VERÃO; FONTE: ADAPTADO DE (CAVALCANTI, 2013) 3
- FIGURA 2: CLASSIFICAÇÃO DAS PAREDES VERDES. AUTOR: SOUSA, 2020. 5
- FIGURA 3: BALANÇO DE ENERGIA PARA PAREDES EXTERNAS. (ADAPTADO DE ENERGYPLUS, U.S.D. OF E. ENGINEERING REFERENCE, 2015) 7
- FIGURA 4: BALANÇO DE ENERGIA PARA PAREDES INTERNAS (ADAPTADO DE ENERGYPLUS, U.S.D. OF E. ENGINEERING REFERENCE, 2015) 8
- FIGURA 5: FAIXA DE TEMPERATURA CONFORTO TÉRMICO PARA EDIFICAÇÕES NATURALMENTE VENTILADAS, MÉTODO ADAPTATIVO. AUTOR: DE DEAR, 1998, ADAPTADA. 9
- FIGURA 6: PLANTA BAIXA DA EDIFICAÇÃO E ORIENTAÇÃO GEOGRÁFICA. AUTOR: GARÇA, 2012, ADAPTADA. 10
- FIGURA 7: HORAS DE CONFORTO TÉRMICO ANUAL 12
- FIGURA 8: HORAS DE CONFORTO TÉRMICO PARA: (A) VERÃO; (B) OUTONO; (C) INVERNO; (D) PRIMAVERA 13
- FIGURA 9: PERFIL DE TEMPERATURA DO QUARTO 1 PARA UMA SEMANA DE JANEIRO 14
- FIGURA 10: PERFIL DE TEMPERATURA DO QUARTO 1 PARA UMA SEMANA DE AGOSTO 15

## NOMENCLATURA

<i>Símbolos</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>
$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$C_p$	Calor específico	[J/kgK]
$\dot{Q}$	Carga térmica	[W]
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> K]
$q''$	Fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$Nu$	Número de Nusselt	Adimensional
$Ra$	Número de Rayleigh	Adimensional
$Max$	Máximo	Lógico
$k$	Condutividade térmica	[W/mK]
$a$	Relação altura/largura de cavidade	Adimensional
$\frac{\partial H}{\partial T}$	Capacidade de armazenamento de calor	[J/m <sup>3</sup> C]
$k^w$	Condutividade térmica dependente da umidade	[W/mC]
$h_v$	Entalpia de evaporação da água	[J/kg]
$C_z \frac{dT_z}{dt}$	Taxa de energia armazenada	[W]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
$N_{Superfície}$	Número de superfícies	Adimensional
$N_{Zonas}$	Número de zonas térmicas	Adimensional
$N_{sl}$	Número de superfícies de cargas internas convectivas	Adimensional
 <i>Abreviaturas</i>		
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	
HAMT	Combined Heat and Moisture Transfer Model	

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
2.1. Casa passiva.....	1
2.2. Parede Trombe.....	2
2.2.1. Coeficiente de convecção .....	3
2.2.2. Troca radiante no interior da cavidade .....	3
2.3. Paredes Verdes.....	3
2.4. EnergyPlus .....	5
2.4.1. Zonas térmicas.....	5
2.4.2. Balanço de energia nas superfícies.....	6
2.5. Conforto Térmico .....	7
2.6. Arquivo climático .....	8
3. METODOLOGIA.....	8
3.1. Casa escolhida.....	9
3.2. Parede trombe .....	10
3.3. Parede verde.....	10
3.4. Conforto térmico.....	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	11
5. CONCLUSÃO.....	15
6. Referências Bibliográficas.....	16

## 1. INTRODUÇÃO

Diante de uma crescente demanda mundial por energia, faz-se necessário repensar abordagens que favoreçam um melhor emprego dos recursos disponíveis. Dentre as muitas opções ao alcance estão as técnicas de climatização passiva de ambientes, que levam em conta as potencialidades do clima local e das características que circundam a edificação, entre elas a incidência de radiação solar, ventilação natural e propriedades térmicas dos materiais construtivos, visando diminuir, ou até mesmo eliminar, a utilização de climatizadores mecânicos tradicionais. (SCHERER, 2015)

Um desses sistemas passivos é a parede trombe. Solução que consiste em uma parede de elevada inércia térmica, protegida externamente por uma camada de vidro e separada por uma pequena câmara de ar que pode ser ventilada ou não. A parede tem a função de captar e acumular energia proveniente da radiação solar. Devido à grande inércia térmica dos materiais utilizados na construção, é capaz de irradiar calor para dentro do cômodo adjacente durante a noite ou quando for mais solicitado (CAVACANTI et. al, 2011). Dependendo dos aspectos construtivos da parede, pode-se favorecer o aquecimento dos ambientes da construção ou auxiliar a ventilação natural.

Outra técnica acessível é a parede verde, que consiste na proteção externa da parede da edificação com plantas, trepadeiras ou fazendo uso de elementos construtivos que permitam utilizar outro tipo de vegetação. Ao cobrir a parede do prédio, a vegetação atua como dispositivo de sombreamento, além de amenizar o calor através da transpiração e respiração, favorecendo o conforto térmico. Nos meses frios, a estrutura age como isolamento térmico, atenuando as perdas de calor indesejáveis. (JOHNSTON e NEWTON, 2004)

Este trabalho pretende analisar o comportamento térmico de uma edificação dotada das soluções passivas citadas anteriormente, localizada na cidade de Porto Alegre através do software *EnergyPlus*, distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, capaz de realizar a simulação de carga térmica e análise energética em edificações e seus sistemas. Espera-se verificar a capacidade das técnicas passivas propostas de oferecer conforto térmico ao interior do ambiente de estudo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Casa passiva

O conceito de casa passiva diz respeito à obtenção de conforto higratérmico com baixo consumo de energia. Pacheco, 2013, diz que Feist e Adamson, vanguardas do conceito, imaginaram que ao construir edificações que visassem o aquecimento via cargas internas, ganhos solares e recuperadores de calor, poder-se-ia construir edifícios que praticamente não necessitassem de sistemas ativos de climatização.

Givoni, 1994, diz que sistemas passivos de climatização consistem em técnicas simples para a diminuição ou aumento da temperatura interna através de fontes de energia naturais. De fato, as técnicas passivas para obtenção de conforto térmico não consistem em nenhuma novidade, visto que têm sido utilizadas por povos tradicionais do mundo inteiro há séculos. O que a ideia de casa passiva trás de novo é o acúmulo de conhecimentos das diferentes estratégias e suas interações. Dentre as inúmeras técnicas para obter atenuação do desconforto térmico, o presente trabalho abordou a parede trombe e o princípio de paredes verdes.

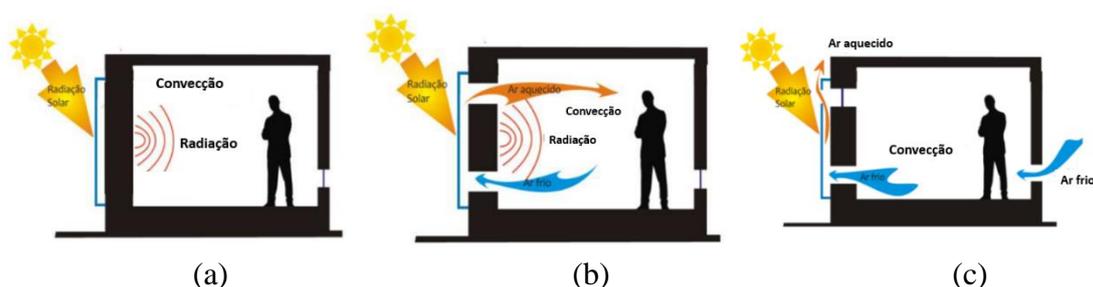
Cavalcanti, 2014, demonstrou que paredes trombes são uma técnica passiva apropriada para a maior parte das zonas bioclimáticas do Brasil, podendo proporcionar

diminuição das horas de desconforto térmico no verão e no inverno. Sousa et al., 2020, através do estudo de paredes verdes, observou que o sistema se apresenta como uma camada que diminui as trocas térmicas entre os meios interno e externo, resultando em uma menor amplitude térmica ao manter baixa a temperatura interna do ambiente durante o dia e amena durante a noite.

## 2.2. Parede Trombe

O sistema básico para parede trombe consiste em uma parede de elevada inércia térmica protegida externamente por uma camada de vidro, uma pequena câmara de ar não ventilada é formada entre os elementos. O objetivo da parede é captar e acumular energia proveniente da radiação solar. O vidro por ser opaco à ondas longas, impossibilita que a radiação emitida pela parede se dissipe para o exterior, causando assim um efeito estufa entre as camadas de vidro e material construtivo. A energia acumulada na parede, então, é liberada para o interior da edificação com atraso através da convecção e da radiação, esquematicamente mostrado na Figura 1a. Adicionalmente, aberturas podem estar presentes no sistema, permitindo acelerar esse processo através de termocirculação no interior da câmara para o ambiente interno (Figura 1b). Outra configuração de abertura permite o auxílio na ventilação através do efeito de chaminé térmica para períodos de verão como apresentado na Figura 1c.

Figura 1- (a) Parede trombe não ventilada; (b) Parede trombe com abertura para inverno; (c) Parede trombe com abertura para verão. (Adaptado de CAVALCANTI, 2013)



É pertinente salientar que a configuração clássica, não ventilada, da parede trombe apresenta suas limitações de uso por demandar que uma parcela considerável da fachada exterior esteja coberta por vidro, o que pode não ser esteticamente atrativa para usuários, assim como o sobreaquecimento ocasionado no verão (CHEL, 2008). Para o presente trabalho apenas a configuração não ventilada, vista na Figura 1<sup>a</sup>, foi considerada, visto que a modelagem para este caso no software *EnergyPlus* foi validado experimentalmente por Ellis (2003), ao construir pequenas células equipadas com parede trombe e submeter ao clima de Los Alamos, Novo México, e comparar o comportamento térmico das células com os resultados previstos em simulações no software.

As seguintes premissas são assumidas:

1. O ar dentro do ambiente é homogêneo;
2. O ar que entra no ambiente se mistura imediatamente com o ar já existente;
3. Temperatura uniforme das superfícies;
4. Superfícies emitem radiação difusa;
5. Transferência de calor unidimensional.

### 2.2.1. Coeficiente de convecção

Na zona delimitada entre a parede de alta inércia térmica e o vidro, toda a convecção se dá por convecção natural. A diferença de temperatura entre o vidro e a parede, forma complexos padrões de convecção. Os coeficientes de transferência de calor para convecção de natural estão diretamente relacionados com o número de Nusselt:

$$\begin{aligned} Nu_1 &= 0,0673838Ra^{1/3} && \text{para } 5 \cdot 10^4 < Ra < 10^6 \\ Nu_1 &= 0,028154Ra^{0,4134} && \text{para } 10^4 < Ra < 5 \cdot 10^4 \\ Nu_1 &= 1 + 1,759667 \times 10^{-10} Ra^{2,2984755} \times && \text{para } Ra \leq 10 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

$$Nu_2 = 0,242 \left( \frac{Ra}{a} \right)^{0,272} \quad (1)$$

$$Nu = \text{Max}(Nu_1, Nu_2) \quad (2)$$

na qual:  $Nu$  é número de Nusselt;  $Ra$  = Número de Rayleigh; e  $a$  é relação H/L (altura/largura) da cavidade. Todos adimensionais. Com o número de Nusselt, então é possível calcular o coeficiente de convecção de rede de uma superfície para a outra

$$h_{c,net} = \frac{kNu}{L} \quad (3)$$

O coeficiente é aplicado para cada superfície separadamente e que é utilizado de fato para o cálculo de balanço na zona é:

$$h_c = 2h_{c,net} \quad (4)$$

### 2.2.2. Troca radiante no interior da cavidade

O software *EnergyPlus* não calcula o valor exato para o fator de forma entre superfícies internas da zona. Isso é calculado baseado na área e emissividade da superfície e depois fixados para estarem de acordo com a reciprocidade, complementos e balanço de radiação. (*EnergyPlus*, 2003).

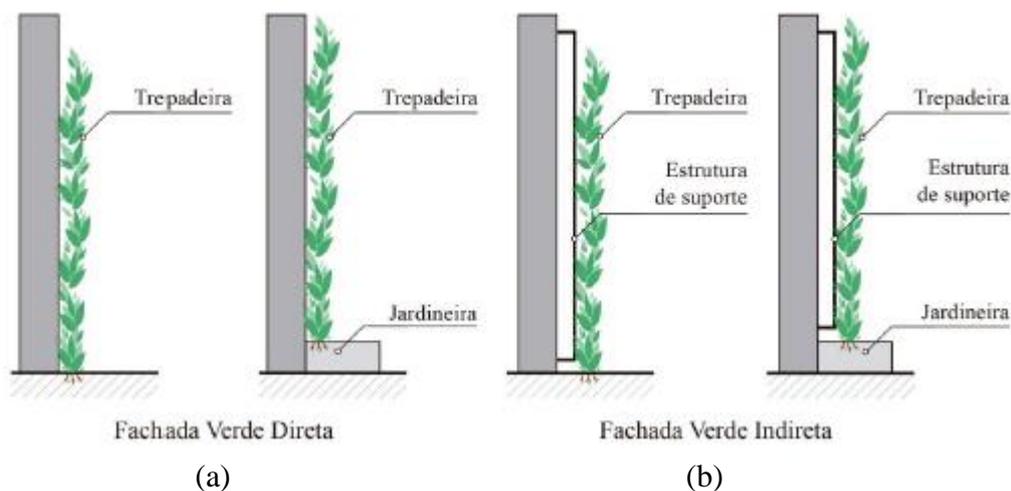
### 2.3. Paredes Verdes

Jardins verticais têm sido utilizados no intuito de melhorar a qualidade do ar nas cidades, favorecer a biodiversidade e oferecer proteção térmica às construções. Uma forma de fácil aplicação e baixo custo é a utilização da chamada parede verde. Uma camada vegetal posicionada junto à face externa da parede de construções.

Paredes verdes podem assumir formas diversas conforme sua estrutura e espécie utilizada, assumindo duas divisões: Parede Verde Direta (Figura 2a), quando a vegetação possui capacidade de fixação por si só, utilizando a fachada da construção como suporte.

A segunda forma é recebe o nome de Parede Verde Indireta (Figura 2b), quando o seu crescimento é guiado por uma estrutura especialmente projetada para suporte da vegetação. A planta nos dois casos é plantada diretamente no solo ou em canteiros intermediários em edificações mais altas.

Figura 2: Classificação das paredes verdes. (Fonte: SOUSA, 2020)



Uma terceira classificação pode ser considerada, a chamada parede viva, onde um sistema mais complexo é construído na envoltória da edificação de forma que o substrato necessário ao crescimento do vegetal fique suspenso e junto à parede. Tal configuração demanda maior atenção quanto à irrigação, adubação e manutenção. Tais cuidados, juntamente com componentes e instalação especializada tornam o investimento inicial elevado. Levando em consideração tais informações, o presente trabalho opta por analisar a fachada parede verde direta.

Quatro fundamentos devem ser observados ao utilizar um sistema de fachada verde como elemento passivo de economia de energia: interceptação da radiação solar devido à sombra produzida pelas plantas; isolamento térmico proveniente da vegetação e substrato; resfriamento evaporativo que devido à evapotranspiração; e a interceptação do vento.

O software *EnergyPlus* não fornece um algoritmo ou metodologia específico para paredes verdes. Silvana, 2013, sugere utilizar um objeto de sombreamento de edificação com propriedades radiantes próximas àquelas encontradas nas folhas vegetais. Tal método não leva em consideração os efeitos evapotranspiratórios que ocorrem no sistema solo-planta, além de ser indicada para fachadas envidraçadas apenas. Dessa forma optou-se por utilizar o método sugerido por Sousa, 2020, onde a metodologia de transferência de calor e umidade combinados, *Combined Heat and Moisture Transfer Model*, HAMT, do software é aplicada. Através da simulação de elementos finitos, o movimento e armazenamento de calor nas superfícies é calculado. As equações de equilíbrio de calor (5) e umidade, extraídas de Künzle, 1995, são utilizadas pelo modelo para obter a transferência de calor e umidade através de um material.

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k^w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5)$$

Os termos da equação acima descrevem o armazenamento, transporte e geração de calor, respectivamente. Na qual,  $\frac{\partial H}{\partial T}$  é a capacidade de armazenamento de calor, dependente da umidade em J/m<sup>3</sup>C; T é a temperatura em °C;  $\partial t$  é a variação do tempo em segundos;  $k^w$  é a condutividade térmica, dependente da umidade em W/mC;  $h_v$  diz respeito a entalpia de evaporação da água, aqui assume-se o valor de 2.489.000 J/kg;  $\delta$  é simboliza o coeficiente de difusão de valor no ar, em kg/msPa; por último,  $\mu$  é o fator de resistência à difusão de vapor, dependente da umidade, adimensional. Para o equilíbrio de umidade a Equação 6 é dada por:

$$\frac{\partial w}{\partial \Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D^w \frac{\partial w}{\partial \Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (6)$$

O armazenamento de umidade, transporte de umidade líquida e transporte de vapor são descritos pelos termos respectivamente. Na qual,  $\frac{\partial w}{\partial \Phi}$  é a capacidade de armazenamento de umidade, dependente da umidade, em kg/m<sup>3</sup>;  $\partial t$  é a variação de tempo dada em segundos;  $D^w$  é o coeficiente de transporte de líquido, em m<sup>2</sup>/s;  $\delta$  é o coeficiente de difusão de vapor no ar, em kg/msPa; o termo  $\mu$  é o fator de resistência à difusão de vapor, dependente da umidade; e T é a temperatura dada em °C.

## 2.4. EnergyPlus

Este trabalho visa o estudo térmico em uma edificação de interesse habitacional, para tal o software *EnergyPlus* foi selecionado. Este possui código *open-source* e é distribuído gratuitamente para a comunidade em geral pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, atingindo principalmente engenheiros, arquitetos e pesquisadores da área de fenômenos de transporte de calor.

Para calcular a energia necessária para aquecer e resfriar um edifício utilizando uma grande variedade de sistemas e fontes de energia, o programa faz uso de muitos módulos que trabalham juntos. Isso é feito simulando o edifício e os sistemas de energia associados quando são expostos a diferentes condições ambientais e operacionais.

### 2.4.1. Zonas térmicas

Um dos métodos utilizado por trás do *EnergyPlus* é baseado em “zonas térmicas”, espaços que possuem as mesmas características espaciais, os mesmos *setpoints* de aquecimento e resfriamento, sendo as unidades utilizadas durante a modelagem e solução da edificação. Cada cômodo da casa é considerado uma zona térmica separada e deve ser avaliado separadamente. A base para integração das zonas e o sistema de ar é através da formulação do balanço de energia e de massa para cada zona, e utilizar abordagem de predição-correção para solucionar as equações diferenciais ordinárias resultantes. Um valor é estimado para calcular o próximo resultado da interação, posteriormente esse valor é recalculado implicitamente. A Equação 7 é aplicada.

$$Cz \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{Superficie}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{Zonas}} \dot{m}_i Cp (T_{si} - T_z) + \dot{m}_{inf} Cp (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (7)$$

na qual, temos  $Cz \frac{dT_z}{dt}$  como sendo a taxa de energia armazenada na zona, em W;  $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  é o somatório das cargas convectivas, em W;  $\sum_{i=1}^{N_{Superficie}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  é a taxa de

transferência de calor por convecção pelas superfícies, em W;  $T_z$  é a temperatura externa do ambiente, em K;  $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{si} - T_z)$  é a taxa de transferência de calor devido ao contato entre zonas térmicas;  $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  é a taxa de transferência de calor devido à infiltração do ar exterior; e  $\dot{Q}_{sys}$  é a taxa de transferência de calor do sistema de climatização em W.

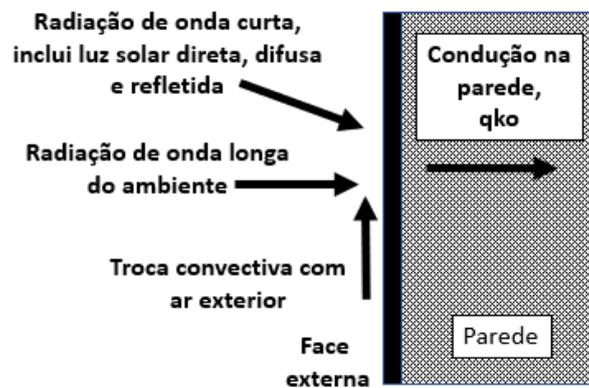
#### 2.4.2. Balanço de energia nas superfícies

Para o balanço de energia nas paredes externas a seguinte formulação é considerada na Equação 8:

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (8)$$

na qual,  $q''_{asol}$  é o fluxo de calor da radiação solar direção direta e difusa absorvida em W/m<sup>2</sup>, o termo é influenciado pela localização, orientação e inclinação da superfície, propriedades do material da superfície, condições climáticas e outros;  $q''_{LWR}$  é o fluxo de radiação de ondas de longo comprimento trocado com o ar e arredores, influenciado pelas condições espaciais dos elementos circundantes e propriedades do material da superfície;  $q''_{conv}$  é o fluxo de calor convectivo, e  $q''_{ko}$  é o fluxo de calor condutivo no interior da parede. Todos os termos são positivos com exceção do termo condutivo, que é tradicionalmente tomado como positivo na direção de fora para dentro da parede. Na Figura 3 são ilustradas as trocas térmicas consideradas.

Figura 3: Balanço de energia para paredes externas. (Adaptado de ENERGYPLUS, U.S.D. of E. Engineering Reference, 2015)



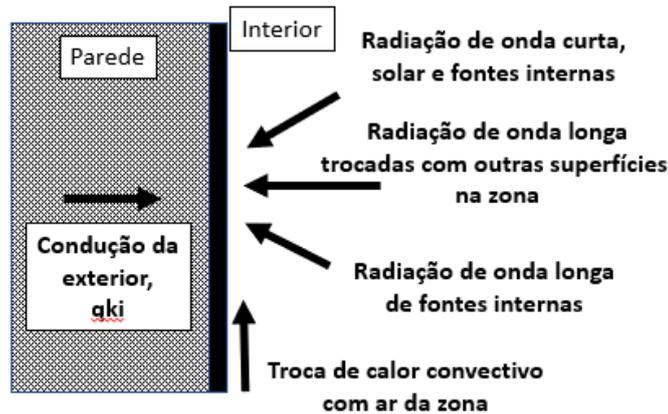
Para paredes internas, o cerne do método de balanço de energia é o balanço de energia de envolvendo as superfícies internas da zona térmica. Esse balanço acontece levando em consideração quatro elementos de transferência de calor que estão interconectados: 1) condução através dos elementos da construção; 2) convecção do ar; 3) absorção e refletância de ondas curtas; 4) troca radiante de ondas longas. O balanço de energia na face interna pode ser escrito pela Equação 9.

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (9)$$

Na qual,  $q''_{LWX}$  é o fluxo conjunto de trocas de ondas longas entre superfícies na zona térmica;  $q''_{SW}$  é o conjunto de fluxo de radiação de ondas curtas para a superfície

proveniente das luzes;  $q''_{LWS}$  é a fluxo de radiação de ondas longas de equipamentos na zona;  $q''_{ki}$  é o fluxo de condução na parede;  $q''_{sol}$  é o fluxo de radiação solar absorvido na parede;  $q''_{conv}$  é tido como fluxo de calor convectivo na zona. Para melhor visualização, a Figura 4 demonstra visualmente as trocas consideradas no software.

Figura 4: Balanço de energia para paredes internas (Adaptado de ENERGYPLUS, U.S.D. of E. Engineering Reference, 2015)



## 2.5. Conforto Térmico

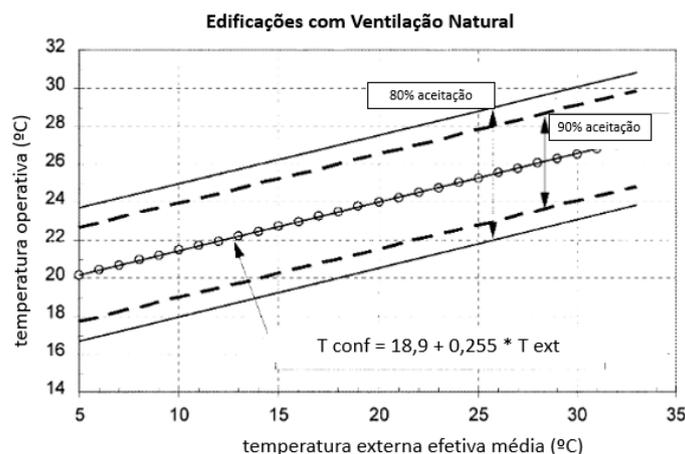
Conforto térmico se dá através de uma série de fatores que englobam aspectos fisiológicos, psicológicos, físicos e sociais. Em geral, diz-se que a temperatura de conforto é aquela que produz sensação térmica neutra, condição necessária, mas não suficiente. Segundo a ASHRAE 55, 2013, se as trocas de calor as quais um corpo está submetido é nula e a temperatura da pele e do suor estiver contida dentro de certos limites, pode-se afirmar que a pessoa está em conforto térmico ao presenciar um estado de espírito que reflita satisfação com o ambiente. Dentro da abordagem tradicional, seis fatores primários devem ser levados em conta para definir conforto térmico:

1. Taxa metabólica
2. Isolamento térmico da roupa
3. Temperatura do ar
4. Temperatura radiante
5. Velocidade do ar
6. Umidade

Largamente difundido, método do voto médio previsto, PMV, desenvolvido por Fanger, 1972, é constantemente utilizado para realizar o condicionamento térmico de ambientes, porém segundo De Dear, 1998, esse método não é aplicável para ambientes naturalmente ventilados pois apenas parcialmente leva em conta os processos de adaptação térmica dos ocupantes para o clima interno. Tal metodologia foi desenvolvida em situações controladas de laboratório, onde os participantes não possuíam controle sobre as condições ambientais. O autor sugere para ambientes em condição de ventilação natural o método adaptativo, este foi elaborado ao analisar uma base de dados com informações de ambientação e conforto térmico de 21000 locais ao redor do mundo para dar suporte à *designs* de ventilação natural mais sustentáveis, energeticamente eficientes e amigáveis aos ocupantes (ASHRAE, 2010). A partir do estudo, percebe-se que

ocupantes de espaços naturalmente ventilados são capazes de tolerar uma faixa de temperatura, Figura 5, mais abrangente que aquela tolerada por ocupantes de prédios com sistema de climatização central. O conceito do modelo adaptativo considera que o corpo não mantém seu equilíbrio térmico apenas através da termorregulação fisiológica, mas também fazendo uso de um conjunto de respostas adaptativas por meios de mudanças comportamentais e psicológicas.

Figura 5: Faixa de temperatura conforto térmico para edificações naturalmente ventiladas, método adaptativo. (Adaptado de DE DEAR, 1998)



Uma faixa de tolerância é  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$  em relação a temperatura média externa é aceitável para 90% dos usuários, e para 80% dos usuários essa faixa é de  $\pm 3,5^{\circ}\text{C}$ . O modelo adaptativo considera que certas vestimentas são escolhidas pelos ocupantes de acordo com as condições climáticas externas, não sendo então necessário levar em consideração o isolamento térmico das roupas. Devidos aos processos de adaptação, a umidade e velocidade do ar também podem ser desconsiderados. (CAVALCANTI, 2013)

## 2.6. Arquivo climático

Para que se possa desenvolver um projeto de engenharia ou arquitetônico que dialogue com o ambiente contexto, faz-se necessário o conhecimento das características climáticas do local onde será executado e assim desenvolver uma edificação que seja energeticamente eficiente e ao mesmo tempo ofereça conforto térmico aos ocupantes. Para o software *EnergyPlus*, uma das possibilidades é a utilização do arquivo climático que se refere ao Ano Climático de Referência ou TRY (Test Reference Year). Esse tipo de arquivo para a cidade de Porto Alegre é gerado através da coleta de dados de uma estação climática do Instituto Nacional de Meteorologia e posteriormente organizados em formato padronizado contendo informações climáticas para as 8760 horas do ano.

## 3. METODOLOGIA

Inicialmente escolheu-se uma edificação com construção voltada ao estudo de efeitos passivos de climatização. Para melhor adaptar-se à situação de Porto Alegre, uma rotação é sugerida e, então, os elementos de climatização passiva são adicionados. Utilizando o software *EnergyPlus* foi avaliado o comportamento térmico no interior da edificação, mais especificamente os cômodos Quarto 1, Quarto 2, recintos de maior

permanência e Banheiro 1. Primeiramente a simulação é realizada sem qualquer dispositivo de climatização, posteriormente as avaliações são feitas para a parede trombe e para a parede verde separadamente. Um comparativo das horas de conforto térmico e do perfil de temperatura dos ambientes é desenvolvido. O presente estudo é realizado levando-se em consideração a norma de desempenho NBR 15.575 (ANBT, 2013), que estabelece que fontes internas de calor, como perfil de ocupação dos usuários, equipamentos e iluminação devem ser desconsiderados, pois apenas a resposta térmica da envoltória está sendo considerada.

### 3.1. Casa escolhida

Para o estudo das estratégias propostas utilizou-se a casa que Graça, 2012, sugeriu para o clima Sul europeu. O presente trabalho buscou estudar os efeitos dos elementos de climatização passiva nos dormitórios, para isso a edificação foi rotacionada de forma que a parede externa dos quartos ficasse voltada para o Norte, como representado na Figura 6. A fachada Norte das edificações é aconselhada por Cavalcanti, 2013, Ziebell, 2018 e outros autores para receber a parede trombe em locais de latitudes próximas a de Porto Alegre. Para fins de comparação, a parede verde igualmente foi posicionada na fachada norte.

Figura 6: Planta baixa da edificação e orientação geográfica. (Adaptado de GARÇA, 2012)



Sete zonas térmicas compõem a edificação proposta, dimensões dos cômodos, bem como das aberturas podem ser encontradas na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões físicas do modelo analisado.

	Area [m <sup>2</sup> ]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Área de Janelas [m <sup>2</sup> ]
Sala de Estar	31,5	94,5	9,0
Quarto II	20,0	60,0	4,5
Banheiro I	8,0	24,0	0,3
Quarto I	16,0	48,0	4,5
Corredor	13,5	40,5	0,0
Banheiro II	9,0	27,0	0,5
Cozinha	12,0	36,0	4,5
<b>Total</b>	<b>110,0</b>	<b>330,0</b>	<b>23,3</b>

O material das paredes externas é tijolo 6 furos posicionados na dimensão média, cobertos com camada de reboco (25 mm) de ambos os lados, pintadas na cor branca. As paredes internas, também são na cor branca e compostas de tijolo 6 furos assentados na menor dimensão e camada de reboco com 25 mm de ambos os lados. A cobertura da laje é composta de uma camada de 100 mm de concreto e uma placa de gesso acartonado 10 mm. O piso é concreto e madeira de lei com 12,9 mm. As janelas externas têm uma camada de 3 mm de ar entre os vidros de 3 mm que compõem a janela dupla. As propriedades dos materiais utilizados são detalhadas no Anexo A.

### 3.2. Parede trombe

Os aspectos construtivos da parede trombe na edificação seguem as recomendações de projeto sugeridas por Cavalcanti, 2013, que levam em conta a latitude do clima do local onde deseja-se construir. Para a situação da cidade de Porto Alegre, o aparato de climatização passiva deve estar orientado para o Norte, com a superfície envidraçada externa cobrindo 100% da fachada, vão de 0,1 m entre o vidro e a parede de alta inércia térmica que deve possuir 0,45 m de espessura composta de camada dupla de tijolo cerâmico 8 furos 19 cm x 19 cm x 9 cm, ligadas por 2 cm de argamassa de revestimento e reboco de 2,5 cm de ambos os lados. A superfície exposta ao sol possui uma camada de tinta com absorvância  $\alpha=0,97$ . Um toldo de 1m é posicionado acima da parede afim de evitar aquecimento excessivo.

### 3.3. Parede verde

A fachada com parede verde direta foi escolhida para este trabalho posicionada na parede Norte da edificação. A vegetação é considerada como uma camada da parede externa, com 0,001 m de espessura. Foi utilizado o método sugerido por Sousa, 2020, utilizando o sistema HAMT do *EnergyPlus*. Inicialmente uma simulação da edificação é realizada sem levar em conta os efeitos de umidade para adquirir uma base de comparação, após uma nova simulação, agora com a parede verde instalada é realizada, levando em consideração os efeitos de umidade. Essa metodologia demanda diversas informações sobre os materiais utilizados na construção. Teor de umidade, porosidade, condutividade térmica, coeficiente de difusão de umidade, transferência de umidade, coeficiente de transporte líquido, capacidade de armazenamento de umidade, transferência de calor convectiva, transferência de calor evaporativa e por último teor de umidade inicial. Os valores utilizados são extraídos de materiais similares àqueles utilizados por Sousa, 2020.

### 3.4. Conforto térmico

Este trabalho ao buscar compreender como o conforto térmico se dá em edificações que utilizam soluções passivas para sua climatização, entende que ventilação natural é empregada. Desta forma o modelo adaptativo sugerido por De Dear, 1998, é utilizado, visto que é o mais adequado para edificações naturalmente ventiladas. A temperatura confortável aos ocupantes se dá pela Equação 8, posteriormente uma variação é adicionada a fim de obter a faixa tolerável de temperatura.

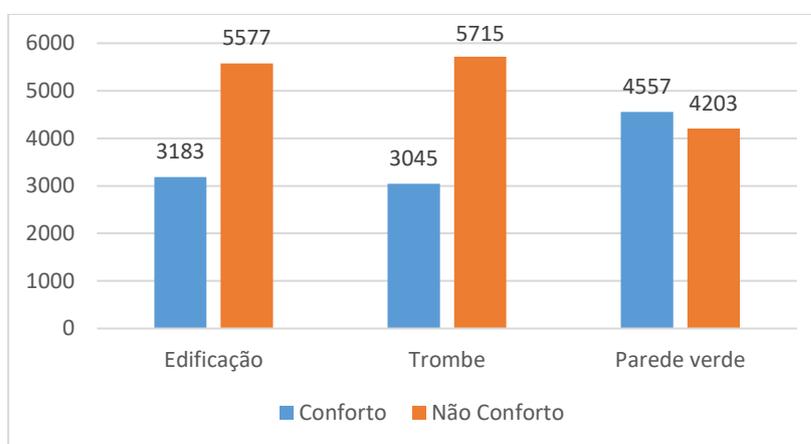
$$T_{ON} = 18,9 + 0,255T_{mext} \quad (8)$$

na qual,  $T_{ON}$  é a temperatura operativa aceitável para espaços naturalmente ventilados em °C;  $T_{mext}$  é a temperatura externa média em °C. Segundo o autor, uma faixa de  $\pm 3,5$  °C a partir da temperatura de conforto agrada 80% dos usuários, enquanto uma amplitude de  $\pm 2,5$  °C é responsável por 90% de satisfação. Para fins de uma abordagem mais conservadora, a faixa de  $\pm 2,5$  °C é utilizada neste trabalho.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comportamento térmico dos ambientes que estão em contato com os elementos de climatização passiva foi estudado e os resultados do Quarto 2 pode ser visualizado abaixo. Os demais ambientes, Banheiro 1 e Quarto 1, apresentam perfis similares e têm seus resultados expostos no Apêndice B. A Figura 7 apresenta a quantidade de horas de conforto térmico para o Quarto 2 no período de um ano.

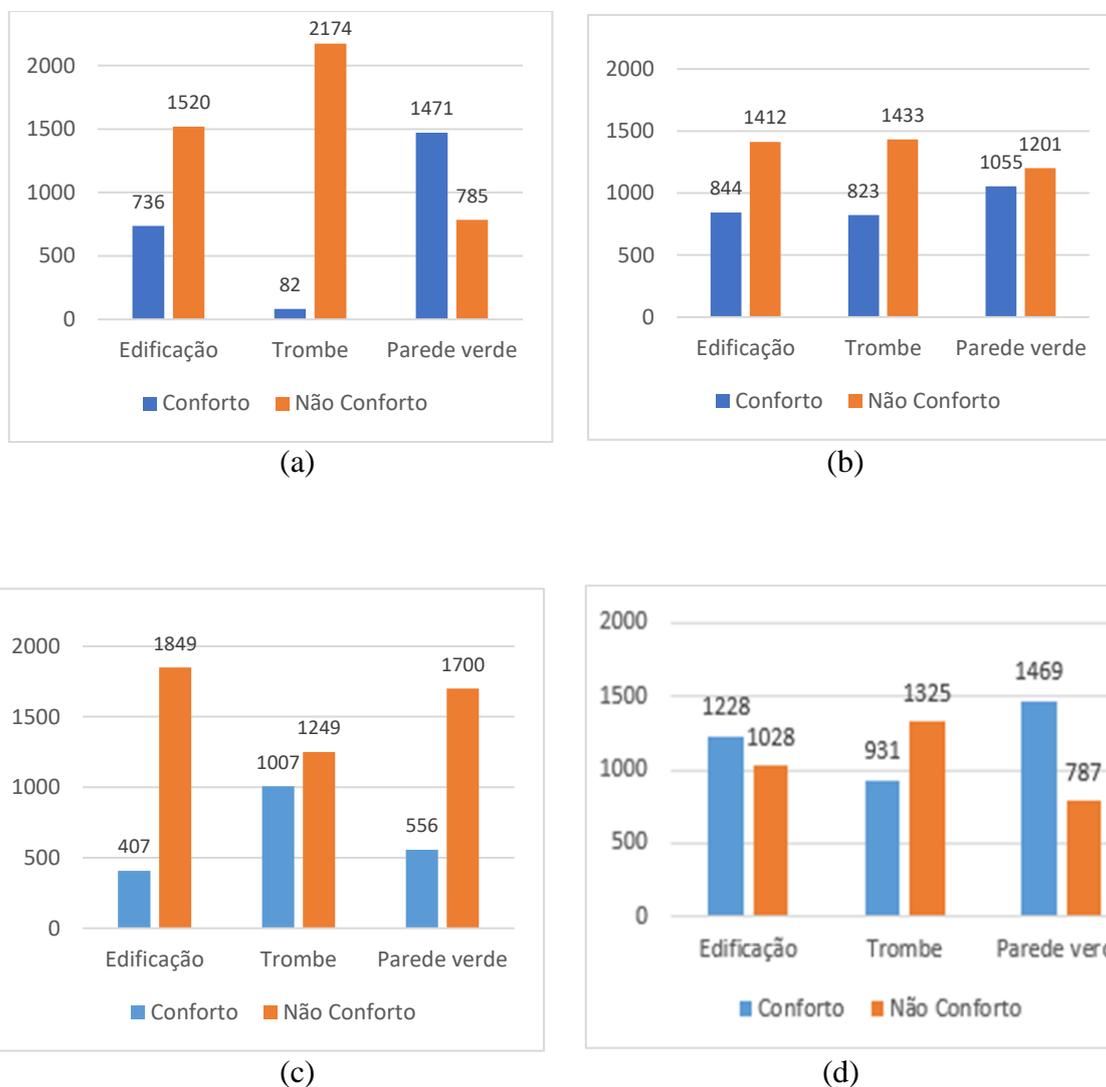
Figura 7: Horas de conforto térmico anual no Quarto 2



A partir dos dados obtidos percebe-se que há pouca diferença na quantidade de horas de conforto numa comparação entre a edificação desequipada e aquela com parede trombe, a qual foi desfavorável 138 horas a mais que a edificação desprovida de qualquer dispositivo de climatização, representando uma redução de 1,57% de horas confortáveis. Por outro lado, quando a parede verde é utilizada, é possível verificar um aumento significativo nas horas de conforto do ambiente, são 1374 horas a mais de conforto, representando +15,7%.

Sabendo que a cidade de Porto Alegre possui grande amplitude térmica, uma análise mais minuciosa faz-se necessária para identificar como as diferentes soluções comportam-se quando segmentamos o período do ano em etapas. A seguir, na Figura 8 são apresentadas horas de conforto e desconforto para as quatro estações do ano separadamente.

Figura 8: Horas de conforto térmico no Quarto 2 para: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera



Os resultados evidenciam que para os períodos mais quentes, a parede trombe favorece o desconforto térmico do ambiente analisado, enquanto a iniciativa com vegetação aumenta as horas de sensação agradável nas quatro estações. Na Tabela 2 é possível verificar quantitativamente o número de horas no qual o usuário sente-se em conforto.

Tabela 2: Horas de conforto para diferentes períodos do ano

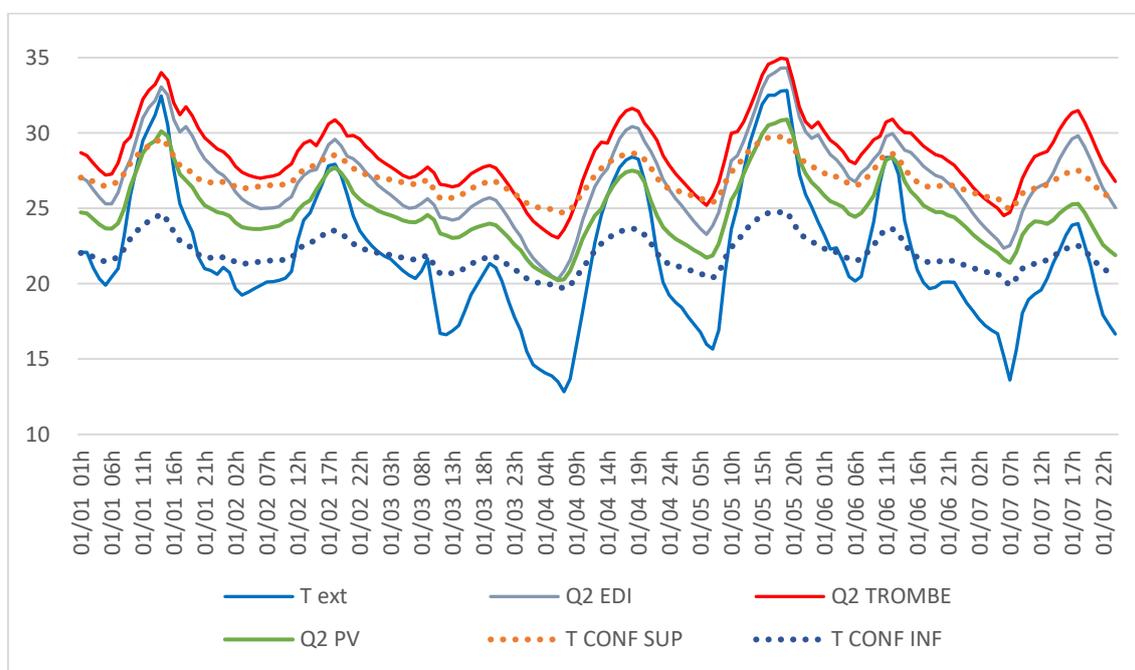
Período	Edificação		Trombe			Parede Verde		
	Horas	%Conforto	Horas	%Conforto	Variação	Horas	%Conforto	Variação
Anual	3183	36,3%	3045	34,8%	-1,58%	4557	52,0%	+15,7%
Verão	736	32,6%	82	3,6%	-28,99%	1471	65,2%	+32,6%
Outono	844	37,4%	823	36,5%	-0,93%	1055	46,8%	+9,4%
Inverno	407	18,0%	1007	44,6%	+26,60%	556	24,6%	+6,6%
Primavera	1228	54,4%	931	41,3%	-13,16%	1469	65,1%	+10,7%

A tabela acima revela que para a cidade de Porto Alegre, apenas a climatização durante o inverno é favorecida quando é utilizada a iniciativa de trombe, para outros momentos do ano há um acréscimo de horas de desconforto, principalmente no verão, quando as temperaturas são mais altas. Esse resultado condiz com a literatura disponível, Cavalcanti, 2013, demonstrou que a parede trombe é responsável pelo aumento da temperatura do ambiente acima da faixa de conforto nos períodos de calor. Para dias frios, majoritariamente concentrados no inverno, a energia coletada pelo dispositivo é capaz de atenuar a temperatura interna favorecendo a satisfação do usuário com a temperatura, variando de 18,0% para 44,6%, um aumento de 600 horas de conforto.

A iniciativa passiva de parede verde mostra-se promissora como dispositivo de climatização passiva ao promover acréscimo de horas de conforto para todos os períodos do ano. Para épocas de calor a parede verde além de bloquear parcialmente a luz solar que atinge a parede logo abaixo dela evitando o ganho direto da radiação, a evaporação ocorrente nas folhas favorece a diminuição da temperatura no interior da edificação, esses efeitos são evidenciados no verão, onde há um aumento de 32,6% nas horas de conforto. No período de inverno há um aumento menos significativo nas horas de conforto, 6,6%. Tal resultado segundo Sousa, 2020, se dá, pois, a camada de vegetação absorve parte da energia proveniente do Sol e o efeito da evaporação diminuem a temperatura nas proximidades, por outro lado a folhagem funciona como camada isolante além de diminuir o coeficiente de convecção na superfície da parede de alvenaria.

A fim de analisar o comportamento térmico no interior da edificação e os efeitos provenientes das iniciativas passivas, selecionou-se duas semanas do ano, uma em janeiro e outra em agosto, para representação de verão e de inverno respectivamente. A Figura 9 é a representação gráfica da alteração de temperatura no interior do Quarto 2, ao longo de uma semana de janeiro.

Figura 9: Perfil de temperatura do Quarto 2 para uma semana de janeiro

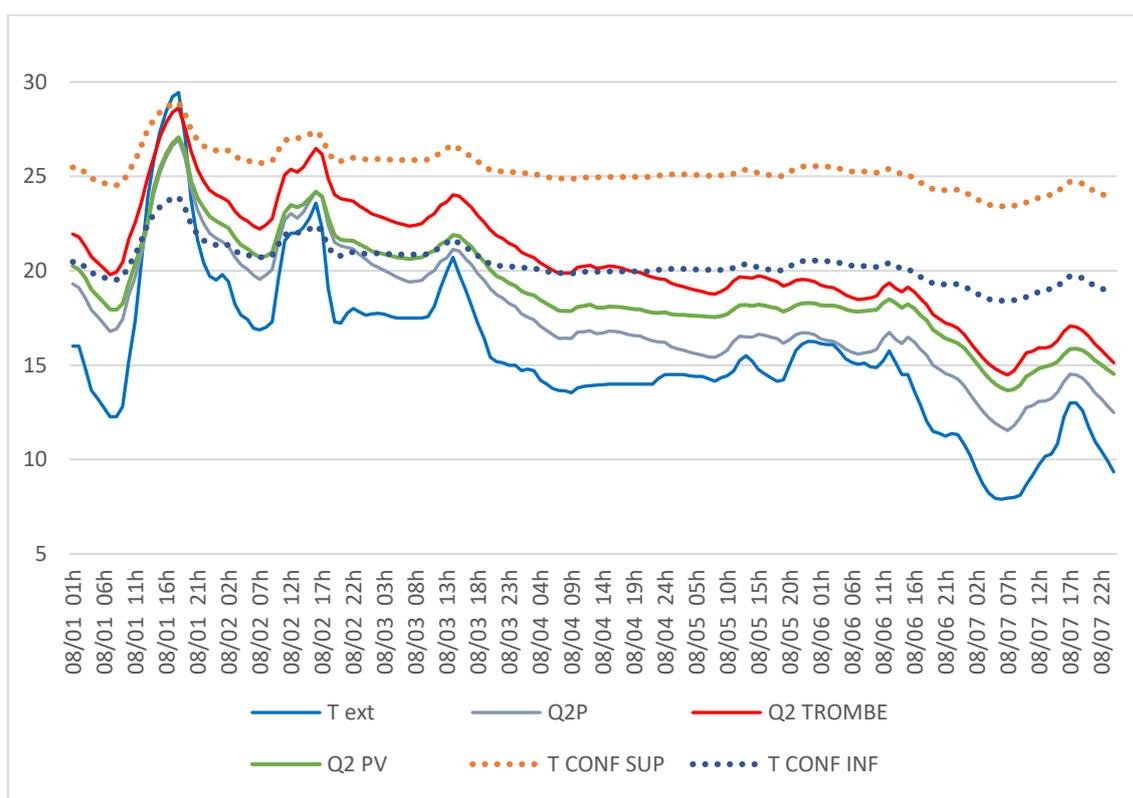


O estudo da figura acima revela que o quarto sofre sobreaquecimento de forma mais frequente quando a parede trombe está instalada. Também se observa o

amortecimento do resfriamento durante o período noturno, não permitindo que a temperatura de conforto térmico seja atingida em diversos momentos. A temperatura do ambiente quando a parede verde é instalada apresenta um comportamento bastante agradável ao usuário, mantendo a temperatura dentro da faixa de conforto na maior parte do tempo. Para o período analisado a parede trombe manteve um aumento médio de 1,7°C enquanto a parede verde diminuiu 2,2°C, quando comparados a edificação inicial.

A liberação de energia acumulada na parede é mais bem aproveitada nos meses de inverno, quando há o desejo de aquecer o ambiente. A Figura 10 é a representação gráfica da variação de temperatura do Quarto 2 durante uma semana do mês de agosto.

Figura 10: Perfil de temperatura do Quarto 2 para uma semana de agosto



A temperatura de conforto é atingida pela edificação sem elementos de climatização em alguns momentos de maior incidência solar, porém durante a noite não é capaz de manter a temperatura no interior da edificação de forma satisfatória. Também é possível perceber que para épocas de temperaturas mais baixas, a parede trombe é capaz de auxiliar no aumento da quantidade de horas de conforto térmico. A energia armazenada na parede trombe durante o dia é capaz de manter temperaturas agradáveis no período noturno, fornecendo um aumento médio de 3,3°C. O perfil de temperatura da parede verde revela que seu efeito ajuda a manter temperaturas mais elevadas no interior do cômodo em relação a edificação sem aparatos passivos, mas menores do que a parede trombe, atingindo a faixa de conforto em momentos mais quentes, a temperatura se manteve em média 1,4°C superior a edificação desprovida, revelando sua característica de isolamento térmico. Conforme o frio se intensifica, nenhuma das duas iniciativas propicia condições de conforto. Tais resultados estão de acordo com indicações de projeto da literatura disponível, que alerta que elementos passivos não suprem a demanda de climatização durante o inverno locais que apresentam baixas temperaturas, como é o caso do estado do

Rio Grande do Sul, onde Porto Alegre está localizada. A Tabela 4 sintetiza as informações de temperatura para os segmentos do ano.

Tabela 3: Temperatura média para o Quarto 2

	Edificação	Trombe		Parede Verde	
Período	T méd	T méd	Variação	T méd	Variação
Anual	22,8°C	25,2°C	+2,4°C	23,0°C	+0,2°C
Verão	28,3°C	30,1°C	+1,8°C	26,8°C	-1,5°C
Outono	20,1°C	22,7°C	+2,6°C	21,2°C	+1,2°C
Inverno	17,0°C	19,9°C	+2,9°C	18,3°C	+1,3°C
Primavera	24,4°C	27,0°C	+2,5°C	23,9°C	-0,5°C

Observando a tabela acima é possível perceber que para a situação de parede trombe, a variação da temperatura no verão é menor quando comparadas a outras situações do ano. É sugerido que tal efeito é causado pelo toldo que cumpre a sua função de interceptar mais radiação solar no período do ano de maior calor.

## 5. CONCLUSÃO

O aproveitamento das potencialidades do local de escolha para uma construção é capaz de fornecer benefícios térmicos à edificação quando um estudo é realizado e decisões são tomadas seguindo orientações de projeto. Os resultados obtidos nesse trabalho demonstram que tanto a parede trombe quanto a parede verde são capazes de prover aumento nas horas de conforto térmico aos ocupantes da edificação.

Quando o estudo do espectro total do ano é realizado, a parede verde mostra-se como estratégia satisfatória ao aumentar as horas de conforto térmico em 15,7%, com aumento médio de temperatura de 0,2°C, enquanto a parede trombe reduz em 1,6% as horas de conforto elevando a temperatura média em 2,2°C. Levando em consideração que Porto Alegre apresenta grande amplitude térmica ao longo do ano, é necessário segmentar o estudo por estações. Dessa forma é possível perceber que para épocas quentes como verão, a parede trombe selada é desfavorável ao conforto térmico, ao reduzir as horas de conforto a 3,6%, ao mesmo tempo a parede verde é responsável por 65,2% de horas satisfatórias. Quando avaliados os meses de inverno, a iniciativa trombe revela sua capacidade ao fornecer um aumento de 26,6% de conforto, quando comparada com a edificação sem elementos passivos. No mesmo período, a parede verde apresentou um aumento de 6,6% nas horas de conforto, mostrando-se capaz de favorecer o usuário em todas as estações do ano. Ambas as estratégias não são capazes de manter o conforto dos ocupantes durante o ano todo, seja nos períodos quentes ou frios, fazendo-se necessária a busca por outros elementos de climatização.

A parede trombe foi avaliada apenas na sua configuração vedada, o que prejudica seu objetivo nos períodos quentes. É sugerido, então, o estudo da configuração ventilada, onde suas aberturas favorecem a ventilação natural do ambiente. A configuração da parede verde avaliada não possui camada de solo próxima a parede, uma avaliação mais minuciosa faz-se necessária para verificar seu comportamento.

Há um caminho longo a ser percorrido no estudo dos elementos de climatização passiva para o clima brasileiro. Um potencial enorme pode ser desbravado com estudos dedicados ao assunto e se faz necessário ao se visar melhor emprego das fontes energéticas disponíveis.

## 6. Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2. Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações.** Rio de Janeiro, 2005b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social.** Rio de Janeiro, 2005.

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers. **ASHRAE 55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2004.

CAUS, ALÉXIA BARBIERI. **Estudo de adaptação de uma casa modelo para residência unifamiliar em Porto Alegre.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em < <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/206396>>

CAVALCANTI, Fernando Antonio de Melo Sá. **Paredes trombe no Brasil: análise do potencial de utilização para aquecimento e refrigeração.** 2013. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. doi:10.11606/T.102.2013.tde-30042014-095503. Acesso em: 2021-05-06

CAVALCANTI, F. S.; LUKIANTCHUKI, M. A.; ANDRADE, N.; PAIVA, R. C.; CARAM, R. Maria. **Parede trombe como estratégia passiva promotora de eficiência energética em São Carlos -SP.** In: IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Juiz de Fora, 2011.

CHEL, A., NAYAK, J.K., KAUSHIL, G. **Energy conservation in honey storage building using Trombe wall,** International Journal of Energy and Building, Vol.40, 2008.

De Dear, R., & Brager, G. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference.** UC Berkeley: Center for the Built Environment. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>. 1998.

ELLIS, P. G. **Development and validation of the unvented trombe wall model in EnergyPlus.** Master of Science in Mechanical Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, Illinois. Disponível em :<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/bibliography/ellisthesis2003.pdf> f. 2003

ENERGYPLUS, U. S. D. of E. **Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations.** [s. l.], p. 847, 2015.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. Van Nostrand Reinhold publishing company, 1994.

JOHNSTON, Jacklyn & NEWTON, John. **Building Green**: a guide to using plants on roofs, walls and pavements. London, 2004.

MIZGIER, Martin; PENSO, Emerson. **Desempenho térmico de fachadas ventiladas como proposta de retrofit em edifícios comerciais na cidade de São Paulo**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016.

PACHECO, M. T.G. **Ventilação Natural e climatização artificial**: crítica ao modelo superisolado para residência de energia zero em Belém e Curitiba. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SILVANA, F.L; CELINA, F.; GRAZIELA L.; **Thermal simulation of a double skin façade with plants**. Energy Procedia, [s. l.], v. 57, p. 1763–1772, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021401532X>

SCHERER, M. J., FEDRIZZI, B. M. **Desempenho das cortinas verdes no controle solar de edificações: um estudo experimental**. Cadernos PROARQ, Rio de Janeiro, n.25, 2015.

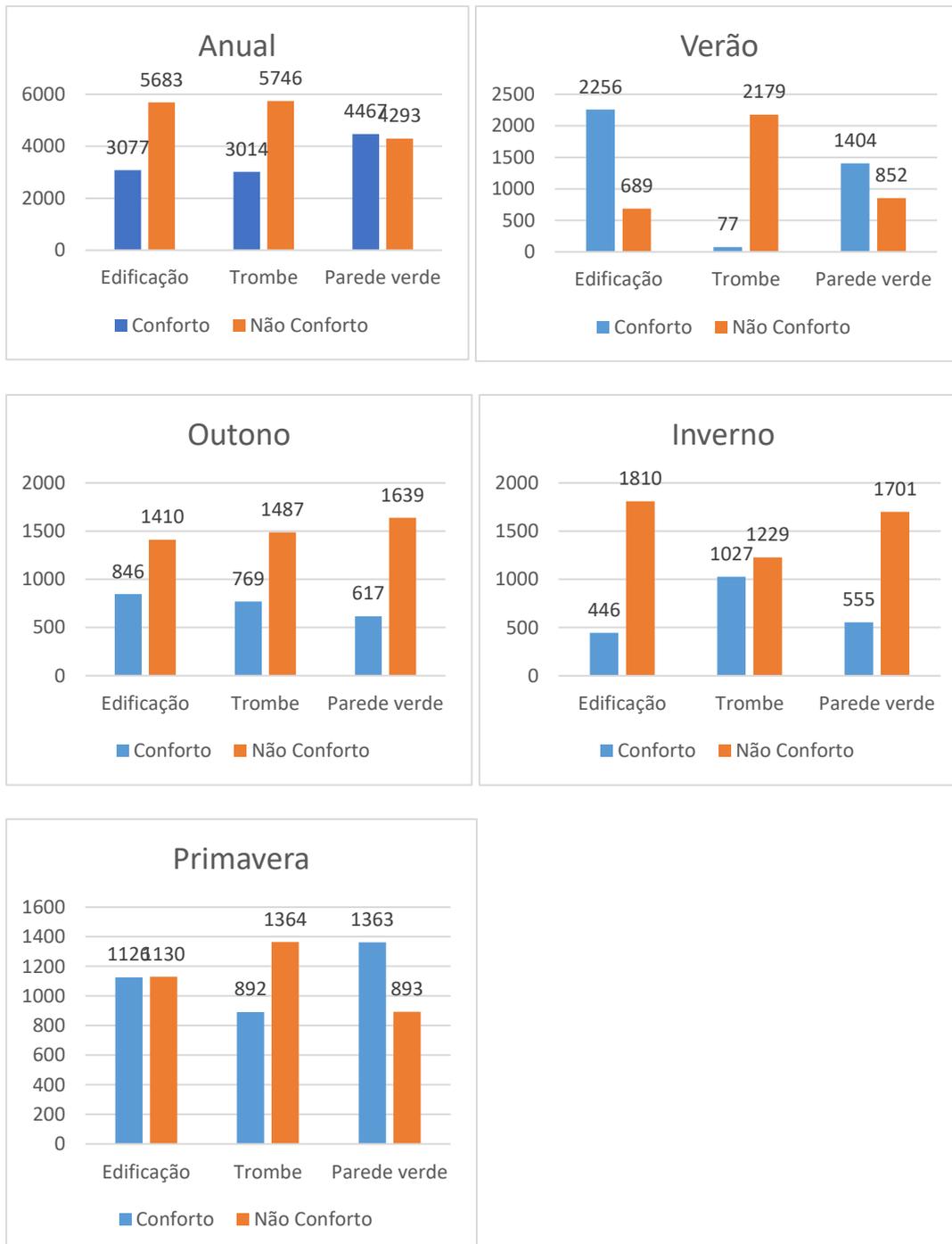
SOUSA, Luana Resende de; SOUZA, Henor Artur de; GOMES, Adriano Pinto. **Influência de paredes verdes no desempenho térmico de habitações sociais**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 11, p. e020029, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v11i0.8658167>. 2019.

SOUSA, Luana Resende de. **Análise do desempenho térmico de habitações multifamiliares de interesse social com paredes verdes**. 2020. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

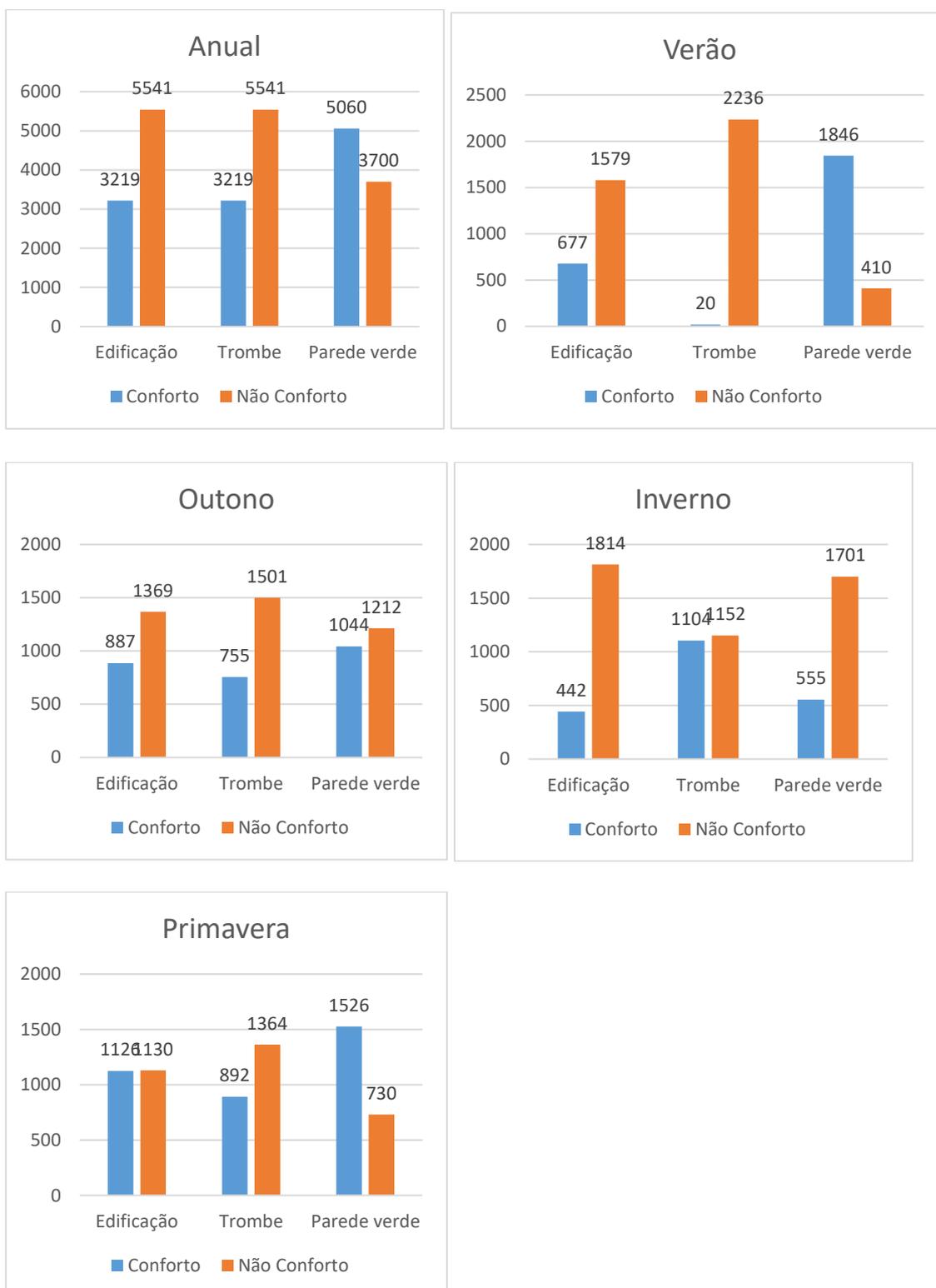
ZIEBELL, C. S. **Simulação Computacional como Ferramenta de Análise do Desempenho Térmico e de Seleção de Concepções de Paredes Trombe**. 2018. 325 f. Tese (Doutorado em Design) –Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## APÊNDICE

### Apêndice A1 – Horas de conforto térmico para zona do Quarto Q1, segmentado por período do ano.



## Apêndice A2 – Horas de conforto térmico para zona do Banheiro B1, segmentado por período do ano.



## ANEXOS

**Anexo 1: Propriedades térmicas dos materiais utilizados na edificação. Fonte:**  
 ABNT NBR 15220, Cavalcanti (2013), Caus (2019)

<b>Material</b>	<b>k[W/mK]</b>	<b>p [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Cp[J/kgK]</b>	<b>ε</b>	<b>α<sub>solar</sub></b>	<b>α<sub>visível</sub></b>
Concreto	1,6	2300	850	0,9	0,7	0,7
Gesso	0,2	850	850	0,9	0,6	0,7
Madeira de lei	0,167	680	1630	0,9	0,7	0,7
Tijolo 6 furos (média dimensão)	0,9	1600	2480	-	-	-
Tijolo 6 furos (maior dimensão)	0,9	1600	2480	-	-	-
Reboco	0,72	1856	840	0,9	0,5	0,5
Tijolo 8 furos	0,85	2000	1005	-	-	-
Vegetação	0,002	0,4	2800	-	0,2	0,2