

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Jéssica Menegat Turcatto

**ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO SEGUNDO A
NBR 15.575 EM UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR NO
MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE**

Porto Alegre
julho 2017

JÉSSICA MENEGAT TURCATTO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO SEGUNDO A
NBR 15.575 EM UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR NO
MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Luciani Somensi Lorenzi

Porto Alegre

julho 2017

JÉSSICA MENEGAT TURCATTO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO SEGUNDO A
NBR 15.575 EM UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR NO
MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE**

Esse Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora.

Porto Alegre, julho de 2017

Prof. Luciani Somensi Lorenzi
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Luciani Somensi Lorenzi (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Luciane Fonseca Caetano (UFRGS)
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Dr. pela University of Leeds

Márcia Elisa Jacondino Pretto (UFRGS)
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

À minha família pelo apoio constante e amor
incondicional em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Idir e Miria, pelo apoio e amor incondicionais em todos os momentos da minha vida.

Agradeço ao meu tio, Irineu, pela disponibilidade ao ceder a edificação na qual realizei meu estudo.

Agradeço ao Eduardo, meu namorado, pela ajuda durante toda a graduação, especialmente no período de realização deste trabalho, pelo apoio, companheirismo e paciência nos momentos difíceis.

Agradeço à minha orientadora, Luciani Somensi Lorenzi, pelo suporte na elaboração deste trabalho e por todo o conhecimento repassado nessa importante etapa.

Agradeço ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), pelo empréstimo dos equipamentos para a realização dos ensaios necessários.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por todas as oportunidades e conhecimentos oferecidos durante esses anos de graduação e aos colegas com os quais tive a alegria de conviver e trocar experiências.

A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso.

John Ruskin

RESUMO

O desempenho térmico de uma edificação é um fator importante em habitações quando existe a preocupação com o conforto do usuário. Uma edificação projetada para o clima no qual está inserida tem maior potencial em fornecer conforto térmico, além de economizar energia. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho térmico, segundo as diretrizes da Norma de Desempenho – NBR 15.575: 2013 -, de uma edificação unifamiliar localizada em um bairro residencial do município de Porto Alegre, RS. A avaliação de desempenho térmico foi realizada através dos três procedimentos citados na NBR 15.575: 2013: procedimento simplificado, simulação computacional e medição *in loco*. A avaliação através do método simplificado é dada por cálculos de transmitância térmica e capacidade térmica da envoltória da edificação. A simulação computacional é realizada a partir do *software EnergyPlus*, que com informações climáticas e um modelo tridimensional da edificação é capaz de reproduzir os efeitos do clima sobre a edificação e determinar o comportamento térmico da mesma. Por fim, a medição *in loco* analisa o desempenho térmico da edificação quanto às condições reais de exposição à temperatura ambiental. Os resultados obtidos dos três procedimentos citados foram comparados e analisados conforme abordagens da NBR 15.575: 2013 e foram notadas algumas divergências entre eles.

Palavras-chave: Desempenho Térmico, Edificação Unifamiliar, NBR 15.575, Procedimento Simplificado, Simulação Computacional, Medição *in loco*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema das etapas da pesquisa	18
Figura 2 – Corte esquemático do posicionamento dos sensores para medição de temperaturas internas e externas	36
Figura 3 – Climatologias de Precipitação e Temperatura.....	38
Figura 4 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro	39
Figura 5 – Carta Bioclimática adotada para o Brasil.....	40
Figura 6 – Localização da edificação	41
Figura 7 – Orientação solar	42
Figura 8 – Planta baixa do 4º pavimento	44
Figura 9 – Vista frontal da edificação	44
Figura 10 - Corte esquemático da cobertura.....	45
Figura 11 - Corte esquemático das paredes de fachada.....	46
Figura 12 – Modelo 3D do último pavimento: (a) vista frontal (b) vista dos fundos.....	47
Figura 13 – Disposição dos equipamentos no pavimento	49
Figura 14 – Posicionamento dos termopares: (a) na suíte 1 e (b) na varanda 2	50
Figura 15 – Simulação para um dia típico de verão	52
Figura 16 – Simulação para um dia típico de inverno.....	53
Figura 17 – Simulação com 5 ren/h para o dia típico de verão: (a) dia típico de verão e (b) dia típico de inverno	54
Figura 18 – Simulação com 5 ren/h e proteção externa nas esquadrias para o dia típico de verão: (a) dia típico de verão e (b) dia típico de inverno.....	54
Figura 19 – Simulação com 20 ren/h para o dia típico de verão	56
Figura 20 – Resultados da medição <i>in loco</i>	57
Figura 21 - Temperaturas medidas no dia 19/03/17	57
Figura 22 – Detalhe da laje pré-moldada	71
Figura 23 – Detalhe da parede de fachada.....	74
Figura 24 – Simulação anual para a suíte do casal	85
Figura 25 – Simulação anual para a suíte 01	86
Figura 26 – Simulação anual para a suíte 02	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Cronograma do trabalho	20
Quadro 2 – Resultados da avaliação pelo procedimento simplificado.....	51
Quadro 3 – Quadro resumo de comparação dos resultados.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Transmitância térmica de paredes externas	31
Tabela 2 – Capacidade térmica de paredes externas	31
Tabela 3 – Transmitância térmica de coberturas	31
Tabela 4 – Critério de avaliação do desempenho térmico para condições de verão	34
Tabela 5 – Critério de avaliação do desempenho térmico para condições de inverno	34
Tabela 6 – Dados de dias típicos para a cidade de Porto Alegre, RS	35
Tabela 7 – Área Útil por Ambiente	42
Tabela 8 – Propriedades dos materiais utilizados na simulação	48
Tabela 9 – Condutividade térmica dos materiais da cobertura	71
Tabela 10 – Condutividade térmica dos materiais das paredes de fachada	74
Tabela 11 – Calor específico e densidade dos materiais das paredes de fachada	76
Tabela 12 – Temperaturas para o dia típico de verão	81
Tabela 13 – Temperaturas para o dia típico de inverno	82

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

NBR – Norma Brasileira

RS – Rio Grande do Sul

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações

ABIVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro

INMET – Instituto de Meteorologia

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ – refletância a radiação solar

ε – emissividade

α – absorptância a radiação solar

τ – transmissividade térmica

λ – condutividade térmica [W/m.K]

R_T – resistência térmica total [m².K/W]

U – transmitância térmica [W/m².K]

C_T – capacidade térmica [kJ/m²K]

Φ – atraso térmico [h]

$T_{i,máx}$ – valor máximo diário de temperatura do ar no interior da edificação [°C]

$T_{e,máx}$ – valor máximo diário de temperatura do ar no exterior da edificação [°C]

$T_{i,mín}$ – valor mínimo diário de temperatura do ar no interior da edificação [°C]

$T_{e,mín}$ – valor mínimo diário de temperatura do ar no exterior da edificação [°C]

TBS – Temperatura de bulbo seco [°C]

TBU – Temperatura de bulbo úmido [°C]

A – área [m²]

e – espessura [m]

R_{ar} – resistência térmica do ar [m².K/W]

R_{se} – resistência térmica superficial externa [m².K/W]

R_{si} – resistência térmica superficial interna [m².K/W]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1.	QUESTÃO DE PESQUISA	16
1.2.	OBJETIVO DE PESQUISA.....	16
1.2.1.	Objetivo Principal	16
1.2.2.	Objetivo Secundário	16
1.3.	HIPÓTESE	16
1.4.	PRESSUPOSTO	17
1.5.	PREMISSA.....	17
1.6.	DELIMITAÇÕES.....	17
1.7.	LIMITAÇÕES	17
1.8.	DELINEAMENTO.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1.	CONCEITOS BÁSICOS	21
2.1.1.	Transferência de Calor e Termorregulação.....	21
2.1.2.	Propriedades térmicas.....	22
2.1.2.1.	Condutividade térmica (λ)	22
2.1.2.2.	Resistência térmica total (RT)	22
2.1.2.3.	Transmitância térmica (U).....	23
2.1.2.4.	Capacidade térmica total (CT).....	23
2.1.2.5.	Atraso térmico (ϕ)	23
2.1.2.6.	Emissividade (ϵ)	23
2.1.2.7.	Absortância à radiação solar (α)	24
2.1.2.8.	Refletância à radiação solar (ρ)	24
2.1.2.9.	Transmitância à radiação solar (τ).....	24
2.2.	CONFORTO TÉRMICO.....	24
2.2.1.	Variáveis Arquitetônicas.....	25
2.2.2.	Variáveis Ambientais	26
2.2.3.	Variáveis Humanas	28
2.3.	NORMATIZAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO.....	29
2.3.1.	Procedimento Simplificado.....	30
2.3.2.	Simulação Computacional	33
2.3.3.	Medição <i>in loco</i>	34

3	MÉTODO DO TRABALHO.....	37
3.1.	CARACTERIZAÇÃO BIOCLIMÁTICA DA ÁREA EM ESTUDO.....	37
3.1.1.	O Clima de Porto Alegre	37
3.1.2.	Zoneamento Bioclimático Brasileiro	38
3.2.	CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO EM ESTUDO	40
3.2.1.	Localização da Edificação	41
3.2.2.	Orientação Solar	41
3.2.3.	Características dos Elementos e Materiais da Edificação.....	42
3.3.	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO	44
3.3.1.	Avaliação segundo o Procedimento Simplificado	45
3.3.2.	Avaliação segundo a Simulação Computacional.....	46
3.3.2.1	Modelo tridimensional	46
3.3.2.2.	Configurações de simulação	47
3.3.3.	Avaliação segundo a Medição <i>in loco</i>	49
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	51
4.1.	RESULTADOS DO PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO.....	51
4.2.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	52
4.3.	RESULTADOS DA MEDIÇÃO IN LOCO	56
4.4.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
5.2.	SUGESTÕES DE PESQUISA.....	63
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A – Memória de cálculo do procedimento simplificado	69
	APÊNDICE B – Valores de temperatura resultantes da simulação computacional para os dias típicos de verão e inverno	79
	APÊNDICE C – Gráficos de temperaturas resultantes da simulação computacional para o ano todo.....	83

1 INTRODUÇÃO

Ao longo de sua existência, o homem sempre teve a necessidade de regular a sua temperatura corporal a fim de manter a neutralidade térmica entre seu organismo e o ambiente. A sensação de conforto térmico que o organismo experimenta proporciona melhores condições de vida, de saúde e também aumento de rendimento no trabalho. Tal fato se deve ao organismo não trabalhar bem em condições de fadiga ou estresse térmico (FROTA; SCHIFFER, 2001, p. 15). No entanto, a obtenção desse bem-estar depende de vários fatores. Para um mesmo ambiente, a sensação de conforto térmico irá depender da vestimenta do usuário, das diferentes atividades praticadas por ele, das condições climáticas do local, das características construtivas do ambiente em que se encontra, entre outros.

Dessa forma, o conceito de conforto térmico, mesmo sendo muito subjetivo, está intrinsicamente ligado ao conceito de desempenho térmico da edificação. O conceito de desempenho pode ser entendido como o comportamento da edificação em uso, ou seja, das condições mínimas de habitabilidade. No entanto, a obtenção do desempenho de uma edificação, incluindo o desempenho térmico, depende de várias partes para ser, de fato, atingido, iniciando desde o planejamento da construção até a sua operação e manutenção durante sua vida útil (BORGES; SABBATINI, 2008, p. 6). A concepção de projetos realizada sem a utilização da abordagem de desempenho térmico, além de não proporcionar conforto ao usuário pode acarretar em um consumo elevado de energia nas edificações. Deste modo, nota-se ainda mais a importância de uma envoltória construtiva bem planejada, com projetos e materiais adequados para cada região climática (BALTAR, 2006, p. 6).

A normatização do desempenho térmico em edificações no Brasil iniciou com o desenvolvimento da norma de desempenho térmico, a NBR 15.220 (ABNT, 2005), porém devido a sua aplicação restrita a edificações unifamiliares e de interesse social, surgiu em 2013 a norma de desempenho de edificações habitacionais, a NBR 15.575 (ABNT, 2013), estabelecendo requisitos mínimos de desempenho, vida útil e de garantia para os sistemas que compõem as edificações (SORGATO, et al., 2014, p. 14). A Câmara Brasileira da Indústria da Construção, através do Guia CBIC (2013, p. 10) cita que a NBR 15.575 (ABNT, 2013) “[...] estabelece parâmetros, objetivos e quantitativos que podem ser medidos”, reforçando o conceito de comportamento em uso dos componentes e sistemas das edificações.

Diante do exposto, sentiu-se a necessidade de conhecer e avaliar o comportamento térmico de uma edificação unifamiliar localizada no município de Porto Alegre, RS, construída sem definições arquitetônicas ou de materiais que abordassem o conceito de desempenho térmico. A avaliação do desempenho térmico baseia-se nos três procedimentos estabelecidos na NBR 15.575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c) e nas suas respectivas exigências. Além do mais, o estudo da NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) é imprescindível para o entendimento de conceitos básicos relacionados ao desempenho térmico e ao comportamento dos materiais.

1.1. QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: a edificação está de acordo com as exigências da NBR 15.575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c) quanto ao desempenho térmico, ao ser avaliada pelos três procedimentos nela estabelecidos?

1.2. OBJETIVO DE PESQUISA

Os objetivos da pesquisa deste trabalho estão divididos em objetivo principal e objetivo secundário, descritos a seguir.

1.2.1. Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação quantitativa de desempenho térmico de uma edificação residencial unifamiliar em sistema convencional localizada no município de Porto Alegre, RS, utilizando os três procedimentos estabelecidos na NBR 15.575 (ABNT, 2013a) e a comparação dos resultados obtidos por meio desses.

1.2.2. Objetivo Secundário

O objetivo secundário do trabalho é apontar possíveis limitações da NBR 15.575: 2013 quanto a avaliação de desempenho térmico em edificações.

1.3. HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é de que a edificação atendendo às exigências da NBR 15.575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c) quando avaliada pelo procedimento simplificado, atenderá também às exigências da norma quando avaliada pelo procedimento de simulação computacional e pelo procedimento de medição *in loco*.

1.4. PRESSUPOSTO

O pressuposto deste trabalho é de que quando determinada edificação é avaliada quanto ao desempenho térmico conforme os três procedimentos da NBR 15.575 (ABNT, 2013a) e suas exigências são cumpridas, a edificação tem grande potencial de proporcionar conforto térmico aos seus usuários.

1.5. PREMISSA

O trabalho tem como premissa o fato de que atualmente, no Brasil, poucas edificações são projetadas e executadas levando em consideração a Norma de Desempenho.

1.6. DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à avaliação, segundo os procedimentos estabelecidos na NBR 15.575 (ABNT, 2013a), do desempenho térmico de uma edificação residencial unifamiliar em sistema convencional, com aproximadamente 250 m² de área construída, situada na zona urbana do município de Porto Alegre, RS, em um bairro residencial.

1.7. LIMITAÇÕES

São limitações deste trabalho:

- a) Estudo de uma única unidade de edificação habitacional em sistema convencional com parede geminada;
- b) Utilização do *software Energy Plus* para simulações térmicas;
- c) Adoção de valores das propriedades térmicas dos materiais descritos na NBR 15.220 (ABNT, 2005b);
- d) Adoção de níveis de desempenho térmico estabelecidos na NBR 15.575 (ABNT, 2013b, 2013c) como valores de referência;
- e) Utilização de dados climáticos da cidade de Porto Alegre, obtidos do Anexo A da NBR 15.575 (ABNT, 2013a) e do banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE).
- f) Avaliação do desempenho térmico através do método de medição *in loco* apenas para o período de verão devido ao fato de não terem ocorrido temperaturas ideais para medição de inverno.

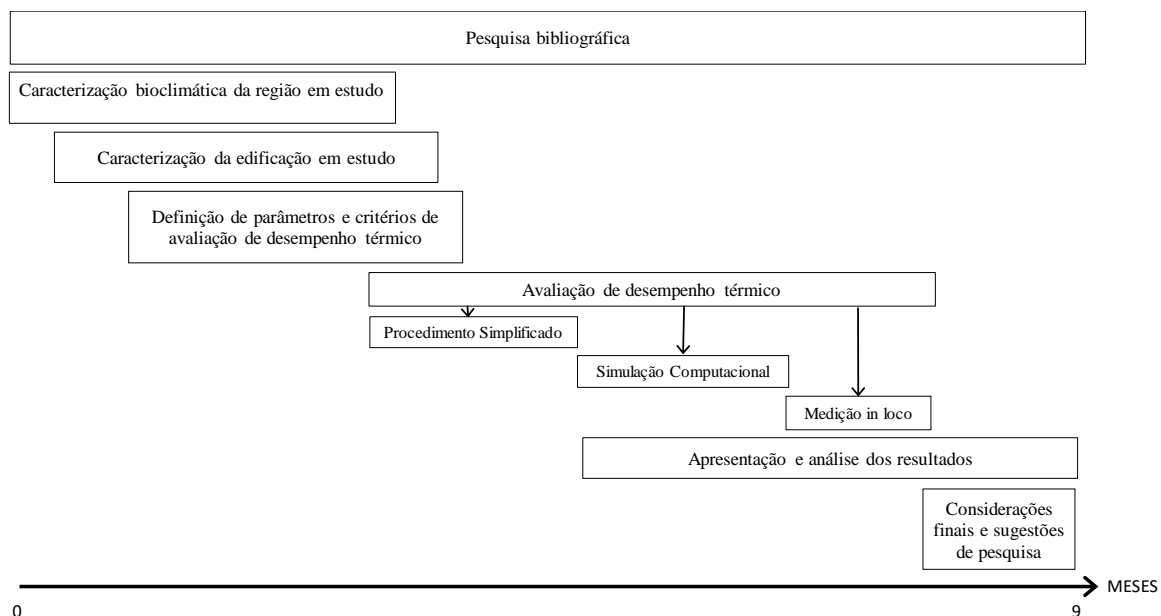
- g) Avaliação apenas para os dormitórios da edificação por serem ambientes de permanência prolongada.

1.8. DELINEAMENTO

O trabalho realizado segue as etapas citadas abaixo e detalhadas nos parágrafos seguintes. Na figura 1, as etapas estão descritas através de um esquema.

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição de parâmetros e critérios de avaliação do desempenho térmico;
- c) caracterização bioclimática da região em estudo;
- d) caracterização da edificação em estudo;
- e) avaliação do desempenho térmico;
- f) apresentação e análise dos resultados;
- g) considerações finais e sugestões de pesquisa.

Figura 1 – Esquema das etapas da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

O trabalho consiste, inicialmente, em uma pesquisa bibliográfica como fundamentação teórica e técnica que auxilia na compreensão da importância do conforto térmico dos usuários obtido pelo adequado desempenho da edificação, no entendimento de conceitos específicos e dos

procedimentos de análise de desempenho térmicos estabelecidos na NBR 15.575 (ABNT, 2015). A pesquisa é de origem quantitativa do tipo aplicada utilizando cálculos, simulação computacional e ensaios em campo e o método de pesquisa será o estudo de caso.

Simultaneamente à pesquisa bibliográfica, foi realizada a definição de parâmetros relativos à NBR 15.220 (ABNT, 2013) e exigências da NBR 15.575 (ABNT, 2015) quanto a avaliação de desempenho térmico. Além disso, foi apresentada a caracterização bioclimática da região estudada, bem como da edificação que foi avaliada termicamente.

A partir dessas definições foi realizada a avaliação de desempenho térmico pelos três métodos estabelecidos na norma: simplificado, simulação pelo *software Energy Plus* e medição *in loco*. Na avaliação pelo procedimento simplificado verificou-se o desempenho com base nas propriedades térmicas das paredes de fachada e cobertura calculadas de acordo com o que é estabelecido na NBR 15.220 (ABNT, 2005b).

A simulação computacional foi feita através de um modelo tridimensional da edificação. Este procedimento foi realizado mesmo com a edificação atendendo aos níveis mínimos de desempenho no procedimento simplificado, pois o principal objetivo do trabalho é a comparação de dados resultantes de cada método. Por último, foram realizadas medições *in loco* de temperatura em condições ambientais específicas, para um dia típico de verão.

Após a realização dos procedimentos de avaliação, foi feita a verificação dos resultados obtidos através das diretrizes estabelecidas na NBR 15.575 (ABNT, 2013) e de acordo com o embasamento adquirido na pesquisa bibliográfica. Os resultados foram comparados e analisados se ambos convergiam, como proposto na NBR 15.575:2013.

As considerações finais do trabalho foram embasadas na análise dos resultados e no conhecimento que se adquiriu ao longo do mesmo. Além disso, o desenvolvimento da pesquisa deu-se respeitando o cronograma mostrado no Quadro 1, o qual foi definido juntamente com a orientadora, com o objetivo de controlar o andamento do trabalho.

Quadro 1 – Cronograma do trabalho

Etapas	set/16	out/16	nov/16	dez/16	jan/17	fev/17	mar/17	abr/17	mai/17
Pesquisa bibliográfica	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Caracterização da edificação		X	X						
Caracterização bioclimática da região		X	X						
Caracterização dos procedimentos		X	X						
Procedimento Simplificado				X	X	X			
Simulação Computacional						X	X	X	
Medição <i>in loco</i>							X		
Análise de resultados								X	X
Considerações finais									X

(fonte: elaborada pela autora)

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONCEITOS BÁSICOS

2.1.1. Transferência de Calor e Termorregulação

Para o entendimento dos processos envolvidos com conforto e desempenho térmico é necessário, primeiramente, que alguns conceitos físicos básicos sejam definidos. Além disso, termos relativos às propriedades dos materiais também devem ser compreendidos, visto que serão citados no decorrer do trabalho. É necessário entender os princípios que regem a relação entre o usuário e o ambiente capazes de promover o conforto térmico e explicitar quais propriedades dos materiais construtivos interferem no desempenho térmico da edificação.

Inicialmente, faz-se necessário o entendimento do processo de **transferência de energia**, pois sempre que existir um gradiente de temperaturas em um determinado sistema haverá transferência de calor em busca de um equilíbrio térmico. Classifica-se o **calor** como sensível ou latente, onde as trocas de calor sensível são denominadas trocas secas e as trocas de calor latente são denominadas de trocas úmidas. Relativo às trocas secas, três processos merecem destaque: condução, convecção e radiação. Em termos de trocas úmidas, que envolvem a mudança de agregação do estado da água, destacam-se a evaporação e a condensação (FROTA; SCHIFFER, 2001, p. 31).

Segundo Kreith (2003), a transferência de calor através da **condução** acontece por meio material, de uma molécula para outra, em corpos com diferentes temperaturas; a **convecção** consiste na transferência de calor através de fluidos, podendo ser líquidos ou gasosos; e a **radiação** é explicada como sendo a energia transmitida por ondas eletromagnéticas, entre dois corpos distanciados, um com maior capacidade de emitir e outro de receber energia, sem a necessidade de um meio material para ocorrer. Relativo às trocas úmidas, Bagnati (2013, p. 18) evidencia que a **evaporação** é a mudança da água no estado líquido para o estado gasoso, a partir de um gasto de energia para tal e que a **condensação** é quando o vapor d'água passa do um estado gasoso para o líquido também envolvendo um gasto de energia.

Lamberts et al. (2016, p. 7) afirma que as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente são realizadas através da pele, sendo essa o principal órgão termorregulador do organismo humano. Classificado como homeotérmico, o ser humano mantém sua temperatura interna

constante produzindo calor ou perdendo-o para o ambiente. Quando o organismo passa a sentir desconforto térmico devido ao frio ou ao calor excessivo os mecanismos termorreguladores entram em ação por meio da vasoconstrição - provocando sensações como arrepios – e da vasodilatação e exsudação – ocasionando a transpiração. Dessa forma, Frota e Schiffer (2001, p. 20) definem a **termorregulação** como sendo “[...] o meio natural de controle de perdas de calor pelo organismo [...]”.

2.1.2. Propriedades térmicas

As propriedades dos elementos construtivos devem ser entendidas para a análise de desempenho térmico da edificação em questão. Para Callister e Rethwisch (2012, p. 3) “Propriedade é um traço (característica) de um material em termos do tipo e magnitude de resposta a um específico estímulo imposto”. Especificamente neste trabalho, serão abordadas as propriedades térmicas mais relevantes.

2.1.2.1. Condutividade térmica (λ)

A NBR 15.220-1 (ABNT, 2005a, p. 1) define condutividade térmica como sendo “Propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro”. A condutividade térmica caracteriza a capacidade de um material conduzir calor a partir de regiões de alta temperatura para regiões de baixa temperatura (CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p. 673). Sua unidade de medida é $\text{W}/(\text{m.K})$.

2.1.2.2. Resistência térmica total (RT)

A resistência térmica total é definida como sendo o somatório das resistências térmicas das diferentes camadas que compõem um elemento com as resistências térmicas internas e externas, ou seja, superficiais. (ABNT, 2005a, p. 2). Define-se ainda como resistência térmica de um elemento a capacidade desse em resistir à passagem do calor, dependendo da espessura do material e da sua condutividade térmica (LAMBERTS et al., 2014, p. 210). As resistências térmicas superficiais, segundo a NBR 15.220-1 (ABNT, 2005a, p. 1) estão relacionadas às camadas de ar junto às superfícies internas e externas do elemento, responsáveis pelas transferências de calor. A unidade de medida é $(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$.

2.1.2.3. Transmitância térmica (U)

Para a NBR 15.220-1 (ABNT, 2005a, p. 2) a transmitância térmica nada mais é do que o “Inverso da resistência térmica total” e é representada pela unidade $W/(m^2.K)$. De acordo com Lamberts et al. (2014, p. 2015) é importante destacar os fechamentos da edificação como opacos e transparentes pois é através da transmitância térmica que se consegue avaliar o comportamento desses fechamentos relativo às trocas de calor.

2.1.2.4. Capacidade térmica total (CT)

Também chamada de capacidade calorífica, é definida por Callister e Rethwisch (2012, p. 667) como uma propriedade que “[...] representa a quantidade de energia necessária para produzir um aumento unitário de temperatura”. Quanto maior a capacidade térmica do material, maior é a energia necessária para a mudança de temperatura e maior é a sua inércia térmica (LAMBERTS et al., 2014, p. 220). Sua unidade de medida é J/K. Diretamente relacionado a esta propriedade, está o calor específico (c) que representa a capacidade calorífica por unidade de massa (CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p. 667).

2.1.2.5. Atraso térmico (ϕ)

Segundo a NBR 15.220-1 (ABNT, 2005a, p. 2), atraso térmico é o “tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor”, e é medido em horas. Considerando-se que um material construtivo tenha elevada capacidade térmica, haverá um atraso térmico maior no fluxo de calor, concluindo-se assim, que determinado material possui uma elevada inércia térmica. Para Frota e Schiffer (2001, p. 48) a inércia térmica pode ser definida como sendo o atraso e o amortecimento do fluxo de calor.

2.1.2.6. Emissividade (ϵ)

A emissividade é apresentada pela NBR 15.220-1 (ABNT, 2005a, p. 3) como sendo o “Quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”. Mais resumidamente, Frota e Schiffer (2001, p. 34) a definem como sendo a propriedade que “expressa a capacidade de uma superfície de emitir calor”. É uma propriedade adimensional.

2.1.2.7. Absortância à radiação solar (α)

A NBR 15.220-1 (ABNT, 2005a, p. 3) define essa propriedade como o “Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”. Entende-se que essa propriedade está relacionada à cor e as características das superfícies dos elementos (LAMBERTS et al. 2016, p. 127). Por esse fato, ela é uma propriedade adimensional.

2.1.2.8. Refletância à radiação solar (ρ)

Esta propriedade é definida pela NBR 15.220-1 (ABNT, 2005a, p. 3) como o “Quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”. O estudo realizado por Castro et al. (2003, p. 72) conclui que, dentro do intervalo visível de cores, as cores claras possuem maiores refletâncias do que as cores escuras. Ela também é uma propriedade adimensional.

2.1.2.9. Transmitância à radiação solar (τ)

É explicada pela NBR 15.220-1 (ABNT, 2005a, p. 4) como sendo o “Quociente entre a taxa de radiação solar que atravessa um elemento pela taxa de radiação incidente sobre este mesmo elemento”. Essa propriedade deve ser levada em consideração na escolha de materiais construtivos como, por exemplo, o vidro. Rivero¹ (1986, *apud* CASTRO, 2006, p. 38) declara que os fechamentos transparentes são um ponto fraco da envoltória de um edifício também por apresentar elevada transmitância à radiação, obrigando assim, a aumentar o dimensionamento dos equipamentos condicionadores de ar para verão e inverno.

2.2. CONFORTO TÉRMICO

Conforto é uma sensação subjetiva, visto que nem todas as pessoas sentem conforto nas mesmas condições. Conforto térmico é a condição em que o indivíduo manifesta a sua satisfação com o ambiente térmico que o envolve (ASHRAE, 2010). Desta forma, pode-se afirmar que essa condição está intrinsecamente ligada ao usuário de estruturas edificadas. Em contrapartida,

¹RIVERO, R. Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural. 2ª ed. Porto Alegre: DC Luzzato/UFRGS, 1986.

segundo Lamberts et al. (2016, p. 6), a sensação de desconforto pode ser causada pelo calor ou pelo frio, quando há diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente.

As condições de conforto térmico são funções de uma série de variáveis que podem ser classificadas como variáveis arquitetônicas, ambientais e humanas (KINSEL, 2009, p. 20). Lamberts et al. (2016, p.6) ainda ressalta que o conforto térmico depende de fatores físicos, que determinam as trocas de calor com o meio; fatores fisiológicos, que se referem a alterações na resposta fisiológica do organismo; e fatores psicológicos, que são frutos da experiência ou expectativa do indivíduo e estão relacionados à percepção e resposta aos estímulos sensoriais.

2.2.1. Variáveis Arquitetônicas

O conforto térmico do usuário está diretamente ligado ao desempenho térmico das edificações. Esse comportamento da edificação é influenciado, entre outros motivos, pelas trocas de calor através das superfícies tais como coberturas, paredes, pisos e esquadrias bem como pelas renovações de ar do ambiente (LAMBERTS et al., 2010, p. 15). Além do mais, a escolha dos materiais construtivos, orientação das fachadas, posicionamento das aberturas e uso de artifícios de sombreamento são considerações feitas ao projeto arquitetônico que colaboram para a obtenção do conforto térmico do usuário.

O sistema de cobertura é a parte da edificação que fica exposta à radiação solar por mais tempo. Esse sistema, segundo Lamberts et al. (2016, p. 122), acaba “[...] influenciando diretamente no conforto térmico do usuário e no consumo de energia para o acionamento de equipamentos de ventilação forçada e/ou condicionamento artificial de ar.”. Uma boa forma de melhorar o desempenho da edificação é por meio do isolamento térmico conforme o clima em que a edificação está situada (GRAF, 200, p. [6]), podendo, assim, amenizar os efeitos das trocas térmicas através do sistema de cobertura. Essas trocas térmicas, entre o ambiente externo e o interno, separados pela cobertura, são realizadas por condensação, radiação e convecção (MILAN, 2015, p. 26).

O sistema de vedação vertical é composto pelas paredes e esquadrias periféricas, ou seja, por elementos opacos e elementos transparentes, respectivamente. Segundo Castro (2006, p. 23), “ao contrário do que acontece com a transferência térmica pelas paredes, a entrada da radiação solar pelos vidros das janelas, e sua consequente transformação em calor dentro do ambiente, é

de efeito imediato.”. Desta forma, nota-se que as áreas compostas por elementos transparentes, ao receberem radiação solar, contribuem consideravelmente para a elevação da temperatura do ambiente interno podendo alterar a condição de conforto.

Como medidas a serem tomadas a fim de melhorar o conforto térmico são usados dispositivos de proteção solar na edificação. Brises colocados nas fachadas podem ser utilizados tanto para proteção e sombreamento de paredes compostas por elementos transparentes ou totalmente opacas (FROTA; SCHIFFER; 2001, p. 44). O uso de cores claras nas paredes opacas e também, de acordo com Castro (2006, p. 18), o uso de vidros refletivos, são artifícios, considerados no projeto arquitetônico, capazes de elevar o desempenho térmico da edificação. Além disso, Lamberts et al. (2016, p. 36) afirma que a ventilação é um bom artifício de resfriamento natural quando a temperatura interna é maior que a externa ou quando as condições de umidade devem ser alteradas.

Os sistemas de piso, em geral, costumam ter pouca influência no desempenho térmico da edificação, visto que não estão diretamente expostos à radiação solar. Além disso, pisos que estão em contato com a terra são mantidos a temperaturas mais baixas que os outros componentes da envoltória da edificação devido à elevada inércia térmica do solo (LAMBERTS et al., 2010, p. 45).

Tornar o ambiente construído mais eficiente quanto ao desempenho térmico não depende somente de um único componente construtivo bem executado ou bem planejado, mas sim do desenvolvimento dos projetos arquitetônico e complementares conforme as condições climáticas locais e a correta escolha dos materiais. Aplicar dispositivos que contribuam com o desempenho térmico da edificação não implica obrigatoriamente em elevar o custo da mesma, mas sim, reduzir custos de manutenção e utilização, além de propiciar conforto térmico aos usuários daquele ambiente (FROTA; SCHIFFER, 2001, p. 17).

2.2.2. Variáveis Ambientais

O conforto térmico do usuário não depende somente da envoltória construtiva. As variáveis relacionadas ao microclima no entorno da edificação também influenciam na resposta térmica da mesma. Para Frota e Schiffer (2001, p. 16), conhecendo essas variáveis ambientais locais e aliando-as aos conhecimentos de trocas de calor e de comportamento dos materiais é possível aproveitar o que o clima oferece de agradável e amenizar seus aspectos negativos. As variáveis

que serão descritas a seguir são, segundo Lamberts et al. (2014, p. 46), as que influenciam diretamente no conforto térmico: temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa e velocidade do ar.

A temperatura do ar é uma das principais variáveis para medição de conforto térmico. É também conhecida como temperatura de bulbo seco (TBS) e é medida utilizando-se um termômetro de temperatura de bulbo seco relacionando essa temperatura à de bulbo úmido (TBU) (LAMBERTS et al., 2016, p. 13). Lamberts et al (2014, p.77) também afirma que a temperatura varia na superfície da Terra devido aos fluxos das grandes massas de ar e da recepção da radiação solar que é diferente de local para local.

Além disso, Frota e Schiffer (2001, p. 60) também citam outros fatores que podem alterar a temperatura do ar e conseqüentemente o microclima local, tais como o relevo, que forma barreiras aos ventos, e o revestimento do solo, que diminui a drenagem do mesmo acarretando mudanças na umidade do ar. Fatores como esse último são decorrentes do processo de urbanização. O aumento da concentração de poluentes e a ausência de vegetação também são fatores decorrentes da urbanização que contribuem para a alteração do clima (CASTRO, 1999, p. 7-11).

A radiação solar é a energia emitida pelo Sol em ondas eletromagnéticas. Ela pode ser dividida em direta e difusa, visto que quando ela atravessa a atmosfera, metade dela incide diretamente sobre a superfície e a outra metade sofre um espalhamento tendo sua direção alterada (LAMBERTS et al., 2014, p. 74). Além do mais, a quantidade de radiação recebida em um determinado local não é constante durante o ano. Castro (1999, p. 14) afirma que ela varia conforme a latitude e conforme a estação do ano, pelo fato de a Terra e o Sol não estarem sempre à mesma distância um do outro.

O ar a uma certa temperatura contém uma quantidade de água denominada de umidade. Essa umidade atmosférica provém, segundo Lamberts et al. (2014, p. 80), “[...] da evaporação da água contida nos mares, rios, lagos e na terra, bem como da evapotranspiração dos vegetais”. A quantidade de vapor d’água no ar, além de ter grande influência na temperatura do ar, influencia também nas taxas de evaporação e evapotranspiração, por isso o fato de ser importante na determinação da temperatura sentida pelo organismo humano (CASTRO, 1999, p. 18).

Ainda sobre as variáveis ambientais, vale destacar a velocidade do ar. O ar, quando se desloca através de convecção natural, varia a direção e a velocidade pelas diferenças de temperatura, onde o ar quente sobe e o ar frio desce. Essas condições do vento (ar em movimento) podem ser alteradas conforme as peculiaridades do local, como a existência de vegetações, construções próximas ou a presença de outros anteparos (LAMBERTS et al., 2004, p. 74). Lamberts et al. (2016, p. 13) ainda cita que a movimentação do ar é capaz de reduzir a sensação de calor no organismo humano, pois retira a água em contato com a pele por evaporação.

2.2.3. Variáveis Humanas

Como dito anteriormente, o conforto térmico também depende do usuário da edificação. A sensação de conforto está diretamente ligada ao esforço que o organismo realiza para manter o balanço térmico. Para isto, é necessário entender como esse balanço ocorre, através do mecanismo de termorregulação (LAMBERTS et al., 2016, p. 7). Cabe também salientar que os hábitos das pessoas como suas vestimentas e suas atividades também interferem nas condições de conforto térmico (KINSEL, 2009, p. 20).

Frota e Schiffer (2001, p. 19) estabelecem que o homem é considerado um animal homeotérmico, produz sua energia através de reações químicas internas e de elementos combustíveis orgânicos, através de um processo denominado metabolismo. Afirmam ainda que apenas 20% dessa energia é realmente transformada em trabalho e que o restante (80%) é transformado em calor. Assim, no contexto térmico, entende-se que a taxa metabólica é o consumo de energia de um corpo, como também a liberação de calor do mesmo para o ambiente.

A fim de manter a temperatura interna do organismo constante, existem mecanismos termorreguladores capazes de reduzir ou aumentar as perdas de calor pelo organismo, e esse efeito é sentido pelo calor ou pelo frio. Quando o organismo perde o calor produzido pelo metabolismo para o ambiente, sem utilizar nenhum mecanismo termorregulador, o usuário experimenta a sensação de conforto térmico. (LAMBERTS et al., 2016, p. 9).

A vestimenta, para Frota e Schiffer (2001, p. 23), representa uma barreira para as trocas de calor por convecção e radiação do organismo com o meio. Em parte, ela é responsável pelo conforto térmico do usuário pois funciona como um isolante térmico do corpo, mantendo uma camada de ar entre a pele e a roupa. Desta forma, a vestimenta garante ao corpo que não haja troca de

calor quando esta for a necessidade. Entretanto, quando há essa necessidade, a vestimenta inadequada prejudica o balanço térmico (MOURA, 2012, p. 36).

2.3. NORMATIZAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO

A norma que foi abordada com maior ênfase neste trabalho foi a NBR 15.575: 2013 (Edificações Habitacionais – Desempenho), devido ao fato dela estabelecer os procedimentos que foram utilizados para avaliação de desempenho térmico da edificação estudada. Apesar disso, vale destacar que também é importante o entendimento da NBR 15.220: 2005 (Desempenho Térmico de Edificações), pois ela estabelece os cálculos para a realização da avaliação de desempenho térmico através do procedimento simplificado, além de fornecer algumas propriedades térmicas dos materiais construtivos.

A NBR 15.575: 2013 foi estabelecida buscando atender às exigências dos usuários em relação aos sistemas que compõem as edificações habitacionais, independentemente dos materiais e dos sistemas construtivos empregados (ABNT, 2013a). Ela aborda o conceito de comportamento em uso dos componentes e sistemas das edificações, destacando que as construções habitacionais devem cumprir as exigências dos usuários ao longo de sua vida útil. Desta forma, espera-se que se tenha um olhar mais criterioso sobre as edificações em todos os processos, desde a concepção do projeto até a fase de ocupação e manutenção (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013, p. 12).

A Norma de Desempenho está dividida em seis partes e cada parte aborda requisitos para o desempenho dos sistemas de uma edificação, com exceção da primeira parte onde são apresentados requisitos gerais. São apresentadas premissas para os sistemas estruturais, sistemas de pisos, sistemas de vedações verticais internas e externas, sistemas de coberturas e sistemas hidrossanitários. Além disso, para cada sistema são apontadas exigências quanto à segurança, habitabilidade - que aborda o desempenho térmico - e sustentabilidade. Para a análise de desempenho térmico as partes 1, 4 e 5 da norma foram mais relevantes.

Relativo ao desempenho térmico, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2013, p. 136) esclarece que a NBR 15.575: 2013 não trata de condicionamento artificial, ou seja, os critérios de desempenho são estabelecidos baseados em condições naturais de insolação, ventilação e outras. Além disso, vale destacar que o desempenho térmico de uma edificação potencializa a obtenção de conforto térmico do usuário, porém como explicado anteriormente, essa condição

depende de muitos fatores. Dessa forma, quando a NBR 15.575: 2013 trata de conforto térmico, ela se refere a uma condição média, ou seja, que atende a maioria das pessoas expostas a determinada condição (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013, p. 136).

A NBR 15.575: 2013 estabelece três procedimentos para se avaliar o desempenho térmico de uma edificação. São eles:

- procedimento simplificado
- simulação computacional
- medição *in loco*.

A NBR 15.575 (ABNT, 2013a) ainda recomenda que para os casos em que a avaliação, através do procedimento simplificado, não resultar em um desempenho térmico satisfatório, deve-se avaliar o desempenho térmico através do método de simulação computacional. Além disso, a norma considera o procedimento de medição *in loco* meramente informativo, o qual não se sobrepõe aos outros dois procedimentos. Esses três métodos serão descritos nos itens a seguir.

2.3.1. Procedimento Simplificado

O procedimento chamado de simplificado verifica, segundo a NBR 15.575 (ABNT, 2013a, p. 21), “[...] o atendimento aos requisitos e critérios para os sistemas de vedação e coberturas [...]”, ou seja, para o envelopamento da obra, baseado na comparação de valores de transmitância térmica e capacidade térmica das paredes de fachada e da transmitância térmica das coberturas. Os cálculos realizados para a obtenção de valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) são normatizados na parte 2 da NBR 15.220: 2005² e os valores máximos de transmitância térmica (U) e valores mínimos de capacidade térmica (CT) das paredes externas e coberturas são indicados na NBR 15.575: 2013 e estão apresentados nas tabelas a seguir.

²A NBR 15.220: 2005 é dividida em cinco partes, abrangendo desde a definição de propriedades térmicas de alguns materiais construtivos e métodos de cálculo de transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico, entre outros, até uma proposta de zoneamento bioclimático para o território brasileiro apresentando diretrizes construtivas para habitações unifamiliares e de interesse social para as diferentes regiões do país.

Tabela 1 – Transmitância térmica de paredes externas

Transmitância térmica (U) [W/m ² .K]		
Zonas 1 e 2	Zonas 3,4,5,6,7 e 8	
U ≤ 2,5	α* ≤ 0,6	α* > 0,6
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

* α é a absorvância à radiação solar da superfície externa da parede

(fonte: NBR 15.575, 2013b, p. 27)

Tabela 2 – Capacidade térmica de paredes externas

Capacidade térmica (CT) [kJ/m ² .K]	
Zona 8	Zona 1,2,3,4,5,6 e 7
Sem exigência	≥ 130

(fonte: NBR 15.575, 2013b, p. 27)

Tabela 3 – Transmitância térmica de coberturas

Transmitância térmica (U) [W/m ² .K]				
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
U ≤ 2,30	α* ≤ 0,6	α* > 0,6	α* ≤ 0,4	α* > 0,4
	U ≤ 2,3	U ≤ 1,5	U ≤ 2,3 FV	U ≤ 1,5 FV

* α é a absorvância à radiação solar da superfície externa da cobertura

O fator de ventilação (FV) é estabelecido na ABNT NBR 15.220-2

(fonte: NBR 15.575, 2013c, p. 27)

Para obtenção dos valores de transmitância térmica calculam-se primeiro os valores de resistência térmica dos componentes (laje ou parede), através da equação:

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}}$$

Onde:

A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção e,

R_a, R_b, \dots, R_n são as resistências térmicas de superfície a superfície para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela expressão:

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} + R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{arn}$$

Onde:

$R_{ti} = \frac{e}{\lambda}$ e R_{ar} são as resistências térmicas das câmaras de ar, obtidas da Tabela B1 da NBR 15.220: 2005. Após obter o valor de resistência térmica do componente, calcula-se a resistência térmica total, que leva em conta os valores de resistências térmicas superficiais internas e externas:

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si}$$

Em que R_{se} e R_{si} são obtidas na Tabela A1 da NBR 15.220: 2005.

Com os valores de resistência térmica, calcula-se, finalmente, o valor de transmitância térmica:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Para o cálculo da capacidade térmica, tem-se a equação a seguir:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}}$$

Onde:

A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção e,

$C_{Ta}, C_{Tb}, \dots, C_{Tn}$ são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela expressão:

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i$$

Em que e_i é a espessura da camada i, c_i é o calor específico do material da camada i e ρ_i é a densidade de massa aparente do material da camada i.

Nesse trabalho, mesmo com a edificação alcançando um desempenho térmico aceitável pelo procedimento simplificado, foi realizada a análise através da simulação computacional e

também a medição *in loco*, pois quis se comparar os três métodos e comprovar se os mesmos direcionavam-se para um mesmo resultado.

2.3.2. Simulação Computacional

A avaliação de desempenho térmico através de simulações computacionais exige conhecimento mais amplo e complexo quando comparado ao procedimento simplificado, porém este método possibilita que se avalie separadamente a ação de cada fator sobre a edificação (SORGATO et al., 2014, p. 14). A Norma de Desempenho recomenda que se utilize, para avaliação do desempenho térmico, o programa *EnergyPlus*, onde este é capaz de determinar o comportamento térmico de edificações expostas a mudanças climáticas (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013, p. 147).

O *EnergyPlus* é um programa computacional gratuito, distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. Em seu país de criação ele já é amplamente utilizado para avaliações de desempenho térmico (MELO; BARCELOS, 2011). Aqui no Brasil, o programa já foi utilizado em vários estudos de doutorado e mestrado, inclusive em trabalhos de graduação. O Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina possui várias pesquisas com a utilização do *EnergyPlus* e disponibiliza tutoriais sobre o programa, difundindo ainda mais o seu uso.

A simulação computacional é feita através de um modelo de simulação onde são reproduzidas todas as características da edificação (dimensões, aberturas, materiais, ...). Ainda nesse modelo, cada ambiente é considerado uma zona térmica. No programa utilizado também são configuradas informações climáticas como temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, direção e velocidade do vento, entre outros. (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013, p. 147). Segundo a NBR 15.575 (ABNT, 2013a), o critério de avaliação é baseado em valores máximos e mínimos de temperatura no interior dos ambientes de permanência prolongada, por exemplo, em salas de estar ou dormitórios, para condições de inverno e de verão. Os critérios de avaliação para cada zona bioclimática e para inverno e verão são mostrados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Critério de avaliação do desempenho térmico para condições de verão

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_i, \text{máx.} \leq T_e, \text{máx.}$	$T_i, \text{máx.} \leq T_e, \text{máx.}$
I	$T_i, \text{máx.} \leq (T_e, \text{máx.} - 2^\circ\text{C})$	$T_i, \text{máx.} \leq (T_e, \text{máx.} - 1^\circ\text{C})$
S	$T_i, \text{máx.} \leq (T_e, \text{máx.} - 4^\circ\text{C})$	$T_i, \text{máx.} \leq (T_e, \text{máx.} - 2^\circ\text{C})$ e $T_i, \text{mín.} \leq (T_e, \text{mín.} + 1^\circ\text{C})$

$T_i, \text{máx.}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius

$T_e, \text{máx.}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius

$T_i, \text{mín.}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius

$T_e, \text{mín.}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius

M: nível mínimo de desempenho

I: nível intermediário de desempenho

S: nível superior de desempenho

(fonte: NBR 15.575, 2013a, p. 62)

Tabela 5 – Critério de avaliação do desempenho térmico para condições de inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 5	Zona 6, 7 e 8
M	$T_i, \text{mín.} \geq (T_e, \text{mín.} + 3^\circ\text{C})$	Nestas zonas, esse critério não precisa ser avaliado.
I	$T_i, \text{mín.} \geq (T_e, \text{mín.} + 5^\circ\text{C})$	
S	$T_i, \text{mín.} \geq (T_e, \text{mín.} + 7^\circ\text{C})$	

$T_i, \text{mín.}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius

$T_e, \text{mín.}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius

M: nível mínimo de desempenho

I: nível intermediário de desempenho

S: nível superior de desempenho

(fonte: NBR 15.575, 2013a, p. 63)

2.3.3. Medição *in loco*

A medição *in loco*, ou em campo, tem como objetivo verificar o desempenho térmico de uma edificação quando esta é submetida a condições climáticas reais. Através desse método é possível monitorar as variações internas de temperatura por um determinado período que caracterize dias típicos de verão e de inverno. Segundo Siqueira et al. (2005, p. 134), “Um dia típico de projeto é caracterizado pela sua frequência de ocorrência e representa as condições mais significativas ao longo do período de verão e de inverno e permite quantificar os níveis de exigência na avaliação de desempenho térmico a ser efetuada na edificação.”.

O ensaio é realizado através de termopares que são colocados no interior e no exterior da edificação, com posicionamento adequado, capazes de monitorar as temperaturas internas e externas. As medições devem ser feitas em dias típicos de verão e de inverno precedido por pelo menos um dia com características semelhantes, porém a NBR 15.575: 2013 sugere trabalhar com um ensaio de três dias e analisar os resultados do último dia (LORENZI, 2013, p. 90). Os valores máximos e mínimos de temperatura do ar exterior, amplitude térmica, temperatura de bulbo úmido e radiação solar em dias típicos de verão e inverno de algumas cidades brasileiras são fornecidos na NBR 15.575: 2013, e para a cidade de estudo, Porto Alegre, esses dados são mostrados na tabela 6. Além disso, os critérios de avaliação de desempenho térmico são os já apresentados nas tabelas 4 e 5.

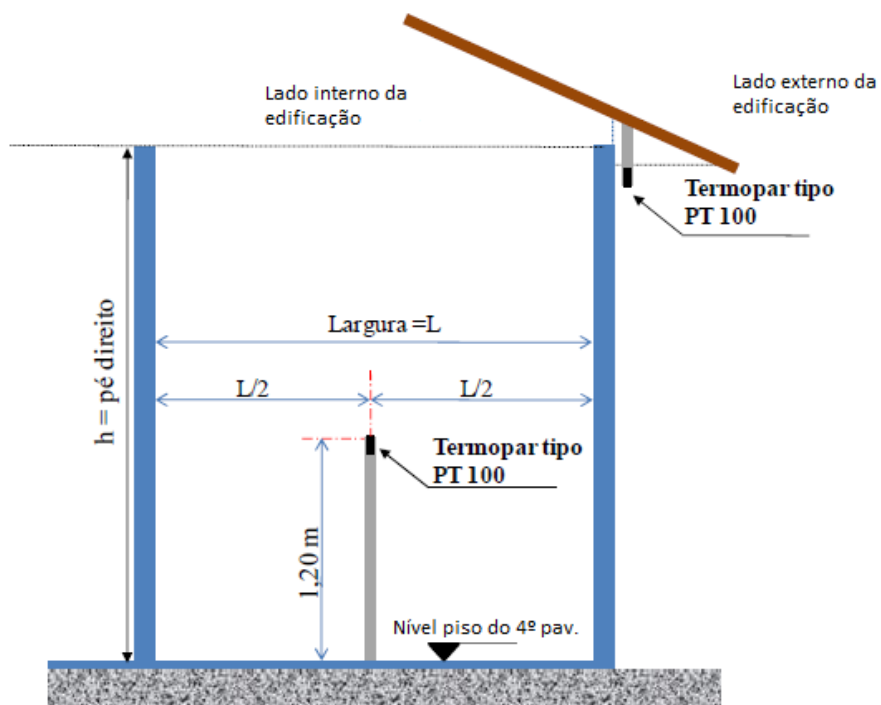
Tabela 6 – Dados de dias típicos para a cidade de Porto Alegre, RS

	Temperaturas máximas e mínimas diárias (°C)	Amplitude diária de temperatura (°C)	Temperatura de bulbo úmido (°C)	Radiação Solar (Wh/m ²)
VERÃO	35,9	9,6	23,9	5476
INVERNO	4,3	8,6	12,1	2410

(fonte: adaptada da NBR 15.575, 2013a, p. 46-47)

A figura 2 mostra, através de um corte esquemático, o posicionamento dos termopares para medição de temperatura.

Figura 2 – Corte esquemático do posicionamento dos sensores para medição de temperaturas internas e externas



(fonte: adaptada de LORENZI, 2013, p. 90)

3 MÉTODO DO TRABALHO

O método do trabalho está dividido em três partes para melhor entendimento de como o trabalho foi realizado. Primeiramente julgou-se necessário caracterizar a área em que a edificação avaliada se encontra e a própria edificação. Após, são detalhadas como os três procedimentos de avaliação de desempenho térmico foram realizados e as premissas adotadas.

3.1. CARACTERIZAÇÃO BIOCLIMÁTICA DA ÁREA EM ESTUDO

Um fator predominante para avaliação do desempenho térmico de edificações é a influência das condições climáticas. Segundo Goulart (1993), “o clima afeta a execução, a segurança, o conforto e o desempenho de edificações”. Para tanto, torna-se imprescindível a caracterização climática do local onde a edificação em estudo está instalada.

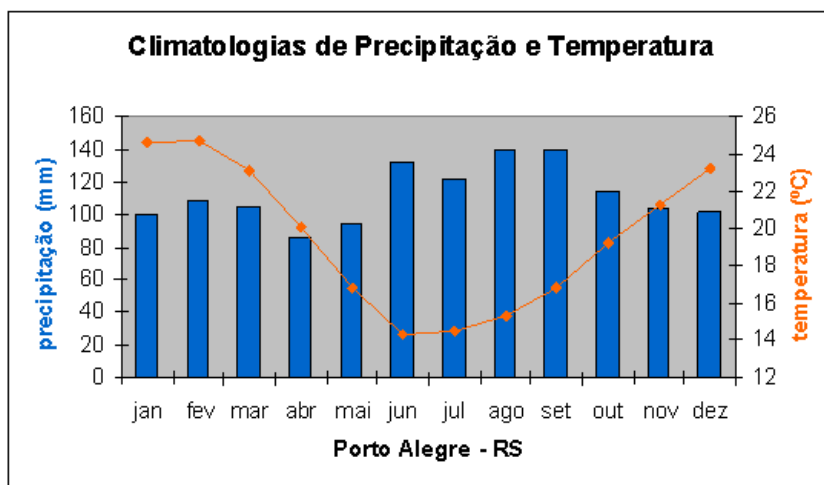
3.1.1. O Clima de Porto Alegre

A cidade de Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul, está situada às margens do lago Guaíba tendo influência direta da grande massa líquida circundante. A localização da cidade juntamente com a condição de evaporação natural, confere ao município as características de clima subtropical úmido (FERRARO; HASENACK³, 2000, *apud* MORELLO, 2005).

De acordo com Kinzel (2009, p. 12), o clima de Porto Alegre se caracteriza por altas temperaturas na primavera e no verão, enquanto no outono e no inverno há quedas bruscas de temperatura devido à contribuição da massa de ar polar marítima. A precipitação média anual é distribuída de forma regular ao longo do ano, não destacando assim uma estação seca. Além disso, no Estado do Rio Grande do Sul, o que inclui sua capital, a umidade relativa do ar situa-se entre 75% e 85% (MORENO, 1961, p. 65). Cabe ressaltar que, quando as elevadas taxas de umidade se combinam com altas temperaturas ocasionam sensações de mal-estar e desconforto térmico, situação comumente ocorrida em Porto Alegre. Na Figura 3, são mostradas as médias de temperatura e precipitação para a cidade de Porto Alegre, RS.

³FERRARO, L. W.; HASENACK, H. Aspectos do Clima de Porto Alegre. In: ZURITA, M. L. L.; TOLFO, A. M. (Org) A qualidade do Ar em Porto Alegre. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000.

Figura 3 – Climatologias de Precipitação e Temperatura



(fonte: CPTEC/INPE)

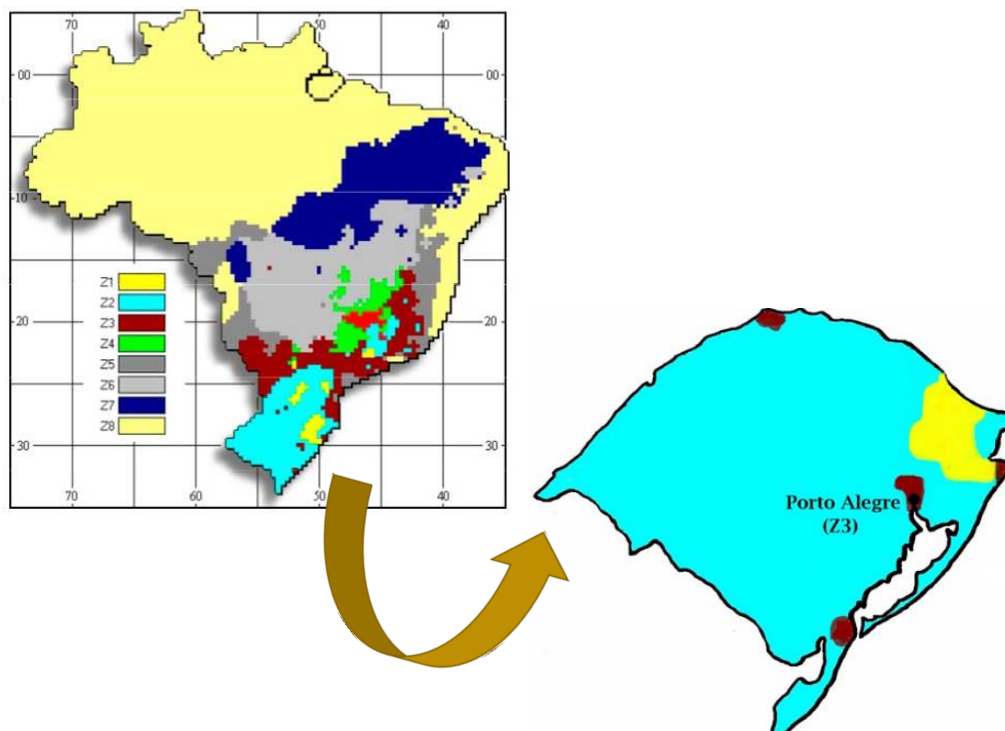
Para Porto Alegre, os ventos do quadrante leste-sudeste são predominantes na maior parte do ano. Segundo Ferraro e Hasenack⁴ (2000, *apud* MORELLO, 2005), a direção e velocidade dos ventos, dentro da cidade, podem ser alteradas em função do local onde se está realizando a medição ou ensaio em questão. Além disso, o traçado das ruas, a geometria dos prédios, o relevo e até a vegetação no entorno podem influenciar a direção e a velocidade dos ventos.

3.1.2. Zoneamento Bioclimático Brasileiro

A fim de validar a ideia de que as edificações no Brasil possuem exigências térmicas diferentes dependendo da região, a NBR 15.220-3 (ABNT, 2005c) propõe o Zoneamento Bioclimático Brasileiro considerando a grande variabilidade de condições climáticas existentes no país. Dessa forma, a NBR 15.220-3 dividiu o país em 8 zonas com relativa homogeneidade climática, conforme mostra a figura 4, e a cidade de Porto Alegre situa-se na zona bioclimática 3.

⁴FERRARO, L. W.; HASENACK, H. Aspectos do Clima de Porto Alegre. In: ZURITA, M. L. L.; TOLFO, A. M. (Org) A qualidade do Ar em Porto Alegre. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000.

Figura 4 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro

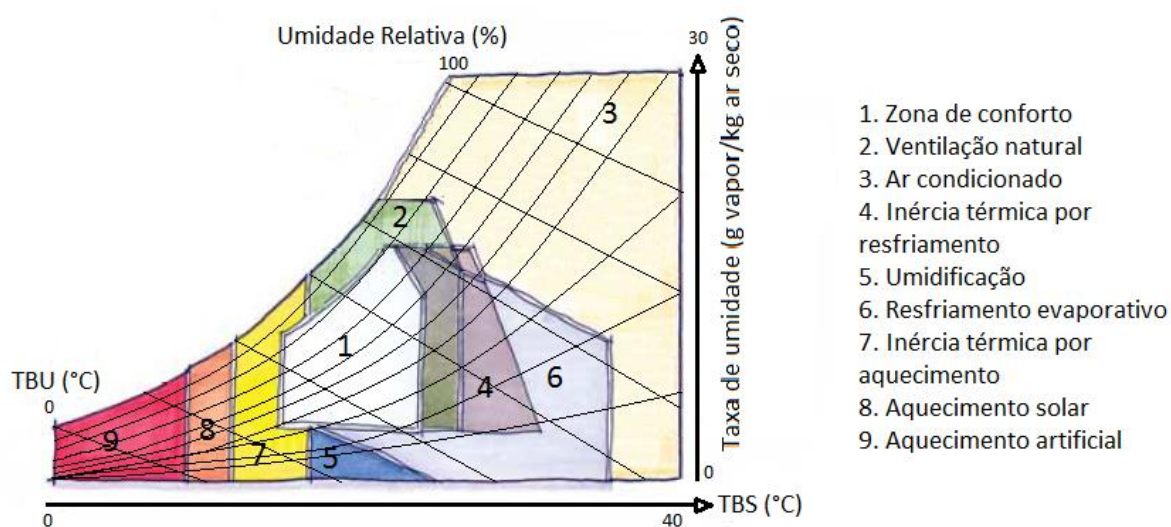


(fonte: adaptada de ABNT, 2005c, p. 3)

Para tal divisão, de acordo com Bagnati (2013, p. 44), das 330 cidades brasileiras, algumas foram classificadas a partir de dados de Normais Climatológicas e outras foram obtidas por interpolação dessas informações. Normais Climatológicas para Lamberts et al. (2016, p. 29), “[...] são séries de dados padronizados pela Organização Meteorológica Mundial calculadas para períodos de 30 a 30 anos, obtidas a partir de valores médios e extremos mensais de temperatura, umidade, precipitação, nebulosidade, horas de sol, entre outros”.

Relacionadas às zonas bioclimáticas, a norma propõe diretrizes construtivas para aberturas, paredes e coberturas que podem ser obtidas através de uma carta bioclimática. No Brasil, a carta utilizada é a baseada nos estudos de Givoni (1969), definida em termos de temperatura e umidade. A partir desses dados, é possível identificar as estratégias para elaboração de projeto conforme as especificações de cada zona (KINZEL, 2009). A carta bioclimática adaptada é mostrada na figura 5.

Figura 5 – Carta Bioclimática adotada para o Brasil



(fonte: adaptada de LAMBERTS ET AL, 2014, p. 86)

Na região central da carta está delimitada a zona de conforto térmico (numerada como 1). As outras regiões representam estratégias bioclimáticas indicando a necessidade de se executar mudanças ao projeto ou à edificação devido às exigências impostas pelo clima. O eixo das abscissas representa a temperatura de bulbo seco, e o eixo das ordenadas a razão de umidade (gramas de vapor/kg de ar seco). Além disso, a umidade relativa e a temperatura de bulbo úmido são apresentadas em eixos transversais. Dependendo da combinação desses fatores uma estratégia é indicada como solução, por exemplo, com valores de temperaturas de bulbo seco muito baixos e umidade relativa muito elevada a estratégia indicada seria a de aquecimento artificial, indicada pelo número 9. Desta forma, pode-se prever qual tecnologia construtiva irá satisfazer essas exigências (MILAN, 2015).

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO EM ESTUDO

A edificação estudada foi construída no ano de 2016 e localiza-se na região Sul do país, Estado do Rio Grande do Sul, na zona urbana do município de Porto Alegre, Rua Professor Ulisses Cabral, nº 74, (30°02' S; 51°09' W). Consiste em uma edificação residencial unifamiliar de quatro pavimentos.

A seguir são abordadas as características da edificação que foram relevantes para a avaliação de desempenho térmico tais como localização, orientação solar, forma e geometria e elementos e materiais construtivos.

3.2.1. Localização da Edificação

A edificação foi implantada em um terreno de área igual a 198 m², com largura de 5,5 metros e comprimento de 36 metros. O terreno em questão é cercado por outras edificações habitacionais de no máximo dois pavimentos e sua localização pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 – Localização da edificação



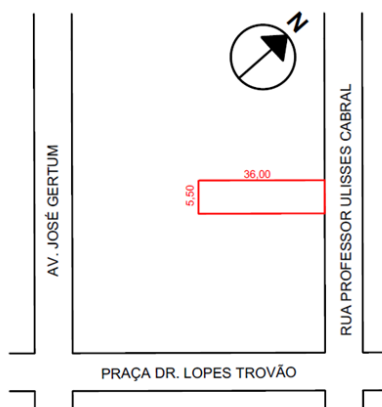
(fonte: adaptada de GOOGLE MAPS)

3.2.2. Orientação Solar

A edificação foi construída segundo a orientação mostrada na figura 7. Os cômodos da sala de estar e do dormitório do casal são privilegiados quanto à orientação solar pois estão voltados à nordeste e são predominantemente atingidos pelos raios de sol da manhã. A cozinha, o salão de festas e os outros dois dormitórios estão voltados para sudoeste recebendo maiores níveis de radiação durante o período da tarde.

A parede voltada para o sudeste é geminada, não recebendo incidência direta de sol, no entanto a outra fachada com face voltada para o noroeste é a mais prejudicada pois recebe incidência solar no período da tarde quando a edificação já possui temperaturas mais elevadas.

Figura 7 – Orientação solar



(fonte: adaptada da Planta de Situação)

3.2.3. Características dos Elementos e Materiais da Edificação

A edificação estudada trata-se de uma casa de quatro pavimentos com uma das paredes geminada. O terreno no qual foi construída a casa possui um desnível em relação ao nível da rua, possibilitando a construção de um salão de festas com pé direito duplo nos fundos da edificação, considerado esse, para fins de estudo, como sendo o primeiro pavimento. No segundo pavimento localizam-se a garagem e a área de serviço. No terceiro, a sala de estar, o lavabo e a cozinha, e no quarto e último pavimento encontram-se os dormitórios e seus respectivos banheiros. A tabela 7 relaciona cada ambiente com sua área útil de acordo com o projeto arquitetônico aprovado.

Tabela 7 – Área Útil por Ambiente

PAVIMENTO	AMBIENTE	ÁREA ÚTIL (m ²)
1°	Salão de festas	36,80
2°	Garagem	58,19
2°	Área de Serviço	4,35
3°	Sala de estar	48,53
3°	Lavabo	1,63
3°	Cozinha	25,21
4°	Circulação	12,14
4°	Suíte casal	22,87
4°	Banho casal	6,95
4°	Suíte 1	10,98
4°	Banho 1	3,01
4°	Suíte 2	14,08
4°	Banho 2	2,99

(fonte: elaborada pela autora)

A edificação foi executada através de sistemas construtivos convencionais e materiais padronizados. Sua estrutura é de concreto armado e as vedações são compostas basicamente por pisos, paredes de alvenaria, aberturas e cobertura. A seguir serão apresentadas as características de cada elemento construtivo da edificação.

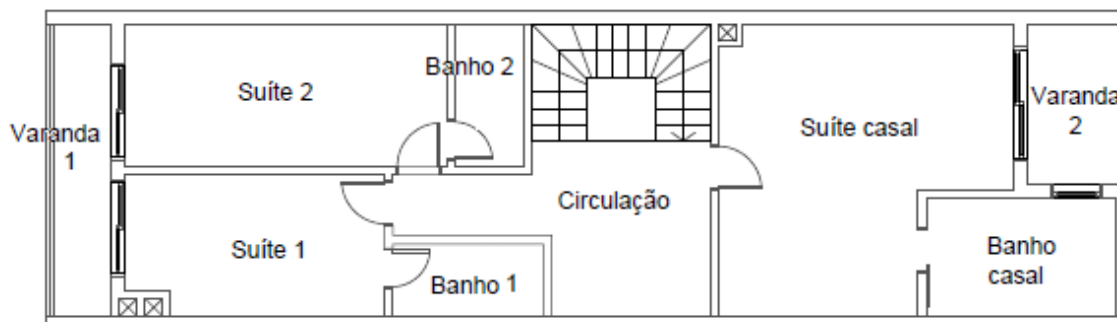
O sistema de pisos é constituído pela sobreposição de camadas: laje, contrapiso e revestimento. As lajes são compostas por vigotas de concreto pré-moldadas e tabelas cerâmicas que após a sua montagem são concretadas para que se garanta a solidez dos elementos como um todo. Acima da laje foi executado um contrapiso e acima desse colocado o revestimento de porcelanato. Esse revestimento está presente em todos os pavimentos da edificação, exceto no quarto pavimento (nos dormitórios), onde será definido pelo morador. Além disso, o revestimento das sacadas também é porcelanato, porém específico para áreas externas.

As vedações verticais foram executadas com blocos cerâmicos de dimensão 19x19x29cm (9 furos) revestidos por revestimento argamassado de espessura de 5cm (interna e externamente) o que se encontra além do limite estabelecido pela NBR 13749 – Revestimento de tetos e paredes de argamassa inorgânicas que para paredes internas é de 2cm e para externas é de 3cm (ABNT, 2013, p. 2). As vedações também receberam um acabamento de pintura em tons de bege e a fachada frontal apresenta ainda detalhes em textura e revestimento cerâmico.

As aberturas são de PVC na cor branca de variadas dimensões e os vidros utilizados são do tipo incolor temperado com espessura de 6mm. A disposição das aberturas configura os ambientes como ventilados. Para que os ambientes sejam ventilados, é necessário que esses sejam atravessados transversalmente pelo fluxo de ar (LAMBERTS, et al., 2106). Além disso, as portas externas e internas são de madeira laqueada branca.

O sistema de cobertura com platibanda constitui-se de três camadas: laje composta por vigotas e tabelas com espessura de 14cm, camada de ar e telha de fibrocimento de 6mm de espessura. Além disso, existe um forro de gesso separado da laje por uma outra camada de ar. Acima da laje localizam-se os reservatórios d'água. As figuras 8 e 9 apresentam a planta baixa do quarto pavimento da edificação, o qual foi avaliado o desempenho térmico, e a vista frontal da edificação, respectivamente. A imagem frontal mostra a indicação da casa que de fato foi estudada.

Figura 8 – Planta baixa do 4º pavimento



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 9 – Vista frontal da edificação



(fonte: elaborada pela autora)

3.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

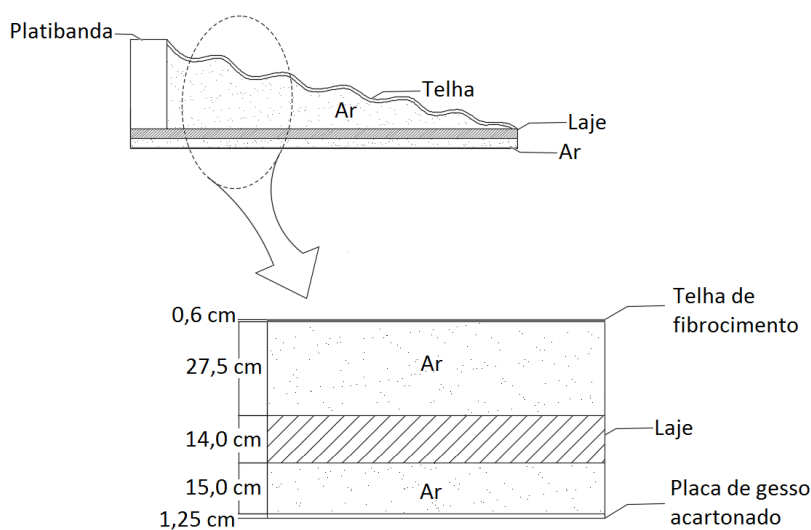
A avaliação de desempenho térmico foi realizada em uma edificação com características e localização já definidas. Desta forma, vale ressaltar que este trabalho é um estudo de caso, e para isso é necessário, além de definir características do objeto de estudo, descrever os métodos de avaliação de desempenho térmico, ou seja, como ela foi realizada. Como informação inicial,

é importante salientar que a avaliação de desempenho térmico foi realizada apenas no quarto pavimento da edificação pelo fato desse ser um recinto de permanência prolongada, justamente por ali se localizarem os dormitórios da edificação.

3.3.1. Avaliação segundo o Procedimento Simplificado

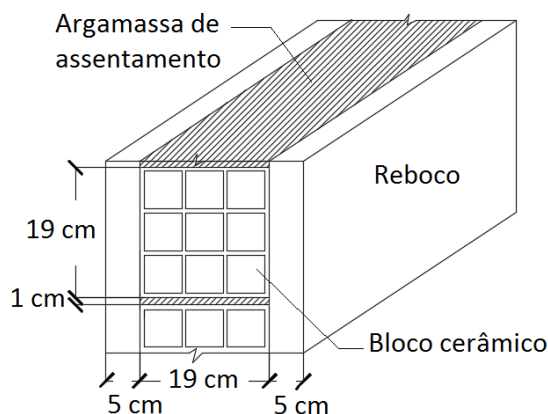
Para o cálculo da transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) dos elementos de fachada e cobertura da edificação analisada seguiu-se o procedimento estabelecido na NBR 15.220: 2005. Os valores das propriedades térmicas dos materiais utilizados foram adotados dessa mesma norma devido à inexistência de valores baseados em ensaios normatizados. As figuras abaixo apresentam detalhes esquemáticos da cobertura e das paredes de fachada, respectivamente. As dimensões são fiéis à edificação e para a primeira camada de ar (27,5 cm) o valor é resultado de uma média entre as diferentes alturas da inclinação do telhado. O detalhamento dos cálculos encontra-se no apêndice A.

Figura 10 - Corte esquemático da cobertura



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 11 - Corte esquemático das paredes de fachada



(fonte: elaborada pela autora)

3.3.2. Avaliação segundo a Simulação Computacional

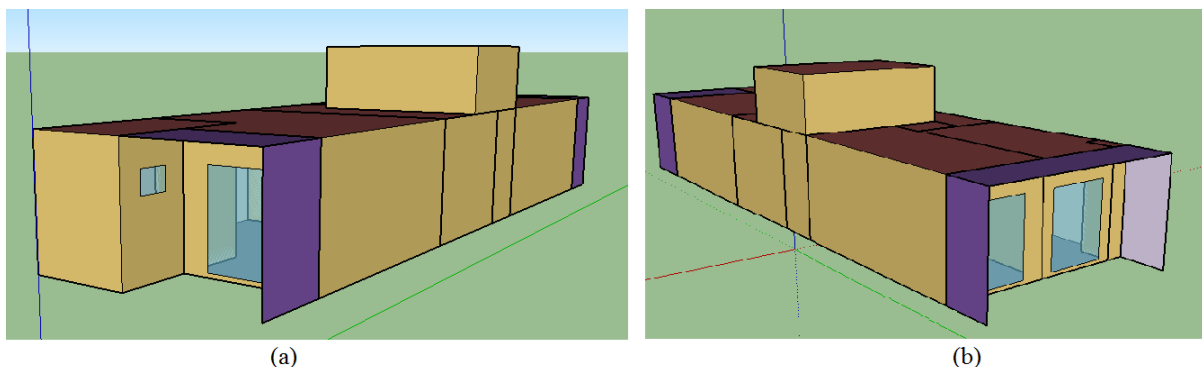
Para a avaliação de desempenho térmico através da simulação computacional foi construído um modelo tridimensional do quarto (e último) pavimento da edificação no *software SketchUp Pro* versão 15.0 de 2015 o qual pôde ser simulado posteriormente através do *software EnergyPlus* versão 8.4 de 2015. A ligação entre a interface gráfica e o simulador foi realizada através do *Legacy OpenStudio SketchUp Plug-in* versão 1.0.14 de 2015.

3.3.2.1 Modelo tridimensional

O modelo foi construído definindo-se as zonas térmicas de cada ambiente, totalizando 9 zonas térmicas. O critério adotado para tal foi que cada ambiente setorizado, ou seja, fechado, tem um comportamento térmico único. As zonas térmicas foram construídas a partir da origem do modelo, respeitando as dimensões dadas no projeto arquitetônico. Além disso, o piso da edificação e as paredes de geminação foram configurados como adiabáticos, ou seja, considerou-se que não há trocas de calor tanto com o pavimento inferior quanto com a edificação ao lado. A NBR 15.575: 2013 (ABNT, 2013a) recomenda que seja feita essa configuração pois, por serem recintos adjacentes, apresentam a mesma condição térmica.

Após essa etapa, foram adicionadas ao modelo as aberturas transparentes e opacas, de dimensões iguais às reais. Por fim foram adicionados dispositivos de sombreamento simulando os elementos construtivos da edificação que projetam sombra às aberturas. A figura a seguir mostra o modelo tridimensional do último pavimento da edificação.

Figura 12 – Modelo 3D do último pavimento: (a) vista frontal (b) vista dos fundos



(fonte: elaborada pela autora)

3.3.2.2. Configurações de simulação

Após a modelagem da edificação no *software SketchUp*, foram feitas todas as configurações necessárias para a simulação no *software EnergyPlus*. A primeira configuração foi a inserção do arquivo climático da cidade de Porto Alegre no programa, disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LabEEE. Esse arquivo climático é o resultado de medições realizadas pelo Instituto de Meteorologia (INMET) ligadas a alguns cálculos de conversão de dados climáticos. Scheller et al. (2015, p.4) destacam que o uso de arquivos climáticos para a realização de simulações computacionais permite identificar os períodos de maior probabilidade de conforto térmico ao usuário, e dessa forma, auxilia na definição de estratégias que devem ser tomadas para melhorar as condições de conforto.

Concomitantemente a isso, configurou-se a localização da edificação, com as características de latitude, longitude, elevação em relação ao nível do mar e fuso horário em relação ao meridiano central, da cidade de Porto Alegre, RS. O período de simulação também foi ajustado para que o programa simulasse as temperaturas médias para todo o ano, apesar de a NBR 15.575: 2013 não exigir que isso seja feito. A NBR 15.575 (ABNT, 2013a) apenas recomenda que a simulação seja realizada para os dias típicos de projeto de verão e inverno. As informações para caracterização desses dias foram retiradas das Tabelas A2 e A3 do Anexo A da própria norma. Esses dados também estão expostos na tabela 6 do item 2.3.3 (Medição *in loco*).

Para a caracterização construtiva do modelo, foram, inicialmente, destacados os materiais utilizados na construção bem como suas propriedades físicas e térmicas e valores de absorvância

e emissividade baseados em suas cores. Por não se ter conhecimento das marcas e dos fabricantes de cada material utilizado, optou-se por utilizar as propriedades térmicas fornecidas pela NBR 15.220: 2005. Cabe destacar que para a configuração dos vidros das janelas, utilizou-se o Catálogo de Propriedades Térmica e Óticas de Vidros Comercializados no Brasil, elaborado pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações – CB3E, e pela Associação Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro – ABIVIDRO. A tabela abaixo mostra os materiais e suas respectivas propriedades utilizadas na simulação.

Tabela 8 – Propriedades dos materiais utilizados na simulação

Propriedades físicas e térmicas dos materiais			
Materiais	Densidade - ρ [kg/m³]	Condutividade térmica - λ [W/m.K]	Calor específico - c [kJ/kg.K]
Cerâmica	1900	1,05	0,92
Argamassa de reboco	1950	1,15	1,00
Concreto	2200	1,75	1,00
Telha de fibrocimento	1900	0,65	0,84
Gesso acartonado	750	0,35	0,84
Lã de vidro	60	0,045	0,7
Madeira	500	0,15	2,3
Material	Transmitância térmica - U [W/m².K]		Fator Solar
Vidro	4,25		0,23

(fonte: adaptada de ABNT, 2005; CB3E e ABIVIDRO)

A partir da elaboração do banco de dados de materiais, pôde-se fazer as composições dos elementos tais como cobertura, paredes e pisos. No sentido do lado externo para o interno da edificação, a cobertura é composta por telha de fibrocimento seguida de uma camada de ar com resistência de 0,21 m².K/W para o verão e 0,14 m².K/W para o inverno, uma camada de capeamento da laje, laje pré-moldada com tabelas cerâmicas, mais uma camada de ar com as mesmas resistências e por fim uma placa de gesso acartonado. Além disso, verificou-se a necessidade de simular a cobertura com a presença de um material isolante, incluindo-se assim a lã de vidro, posteriormente.

As paredes são compostas por uma camada de revestimento argamassado pintado, camadas de cerâmica (referente ao bloco cerâmico) intercaladas por camadas internas de ar do próprio bloco, com resistência igual a 0,16 m².K/W, e mais uma camada de revestimento argamassado pintado. Os pisos foram configurados de maneira semelhante à cobertura, porém sem a presença da telha de fibrocimento e da camada de ar adjacente à ela. As janelas foram configuradas com

vidro temperado de 6mm e as portas internas com madeira de propriedades também citadas na tabela 8.

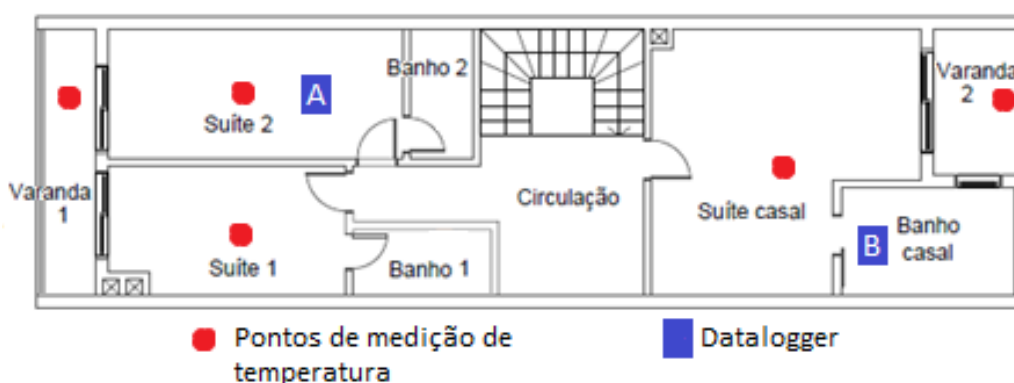
Em relação as cargas térmicas da edificação não foram adotados valores para a ocupação de pessoas, equipamentos e iluminação, visto que a mesma não se encontra habitada. Cabe ressaltar que na avaliação de desempenho térmico a NBR 15.575: 2013 recomenda que o modelo seja simulado sem cargas internas - ocupação, equipamentos e iluminação (SORGATO et al., 2013, p. 19).

Para a configuração de infiltração considerou-se, inicialmente, uma taxa de renovação de ar de 1ren/h. Posteriormente, verificou-se a necessidade de aumentar esse valor e simular a edificação novamente. Esses valores serão apresentados no capítulo 4 do trabalho.

3.3.3. Avaliação segundo a Medição *in loco*

A avaliação do desempenho térmico através de medições *in loco* consistiu em medir os valores de temperaturas de bulbo seco internas da edificação e externas a ela. Foram utilizados cinco termopares do tipo PT100 que, ligados a dois *dataloggers* - sistema de monitoramento -, permitiram a obtenção dos dados. Dois termopares foram colocados do lado externo da edificação e os outros três foram colocados nos dormitórios, ambos localizados no último pavimento. Todos os equipamentos foram fornecidos pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME. Na figura abaixo encontra-se a disposição dos equipamentos no pavimento.

Figura 13 – Disposição dos equipamentos no pavimento



(fonte: elaborada pela autora)

Os termopares internos foram montados nos centros dos dormitórios a uma altura de 1,20 m do piso e os termopares externos foram presos à edificação com a condição de que ficassem à sombra, como é mostrado nas imagens a seguir.

Figura 14 – Posicionamento dos termopares: (a) na suíte 1 e (b) na varanda 2



(a)



(b)

(fonte: elaborada pela autora)

O ensaio foi realizado com as portas internas fechadas e com as frestas das aberturas vedadas com fita isolante. Essas medidas foram tomadas para que fosse evitado qualquer circulação de ar que pudesse afetar o resultado dos ensaios. O período de medição foi de 09 de março de 2017 a 20 de março de 2017 com a edificação fechada, sem a entrada de pessoas. Não foi possível realizar medições no período de inverno pois a data de entrega do trabalho foi um limitante.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo da pesquisa em relação aos três procedimentos de avaliação de desempenho térmico estudados. Além disso, são feitas algumas análises efetuadas a respeito do objetivo principal proposto.

4.1. RESULTADOS DO PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO

De acordo com o que foi detalhado no item 2.3.1 (Procedimento Simplificado) e com os materiais adotados que foram abordados no método do trabalho, pôde-se calcular os valores de transmitância térmica para o sistema de cobertura e paredes de fachada e valores de capacidade térmica para as paredes de fachada. Para o sistema de cobertura o valor de transmitância térmica calculado foi de 1,12 W/m².K para o verão (fluxo descendente) e de 1,57 W/m².K para o inverno (fluxo ascendente), respeitando assim o valor máximo estabelecido na NBR 15.575: 2013 de 2,3 W/m².K para a zona bioclimática 3, onde a edificação está situada.

No cálculo relativo às paredes de fachada, o valor encontrado de transmitância térmica foi de 1,54 W/m².K, sendo menor que o limite máximo estabelecido na NBR 15.575: 2013 de 3,7 W/m².K. Da mesma forma, calculou-se o valor de capacidade térmica das paredes de fachada e obteve-se o valor de 267,96 kJ/m².K, respeitando o limite mínimo de 130 kJ/m².K apresentado na NBR 15.575:2013. Sendo assim, os sistemas de cobertura e de paredes de fachada atendem aos critérios de desempenho térmico estabelecidos pela norma através do procedimento simplificado. O cálculo realizado para obtenção desses resultados encontra-se no apêndice A. No quadro abaixo encontra-se um resumo dos resultados obtidos.

Quadro 2 – Resultados da avaliação pelo procedimento simplificado

Sistema Construtivo	Critério avaliado	Valores		Desempenho
		Calculado	Exigido	
Cobertura (verão)	Transmitância térmica [W/m ² .K]	1,12	≤ 2,3	Mínimo
Cobertura (inverno)		1,57	≤ 2,3	Mínimo
Paredes de fachada		1,54	≤ 3,7	Mínimo
	Capacidade térmica [kJ/m ² .K]	273,36	≥ 130	Mínimo

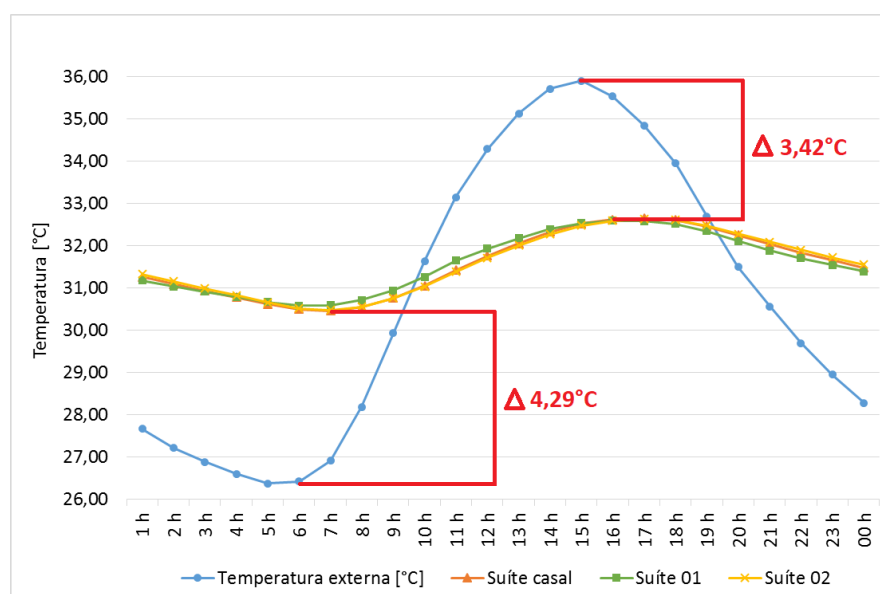
(fonte: elaborada pela autora)

4.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A edificação foi simulada para dias típicos de verão e de inverno, como recomendado na NBR 15.575: 2013. Como já citado anteriormente, deteve-se à simulação do último pavimento da edificação, atentando especialmente para os dormitórios por serem ambientes de permanência prolongada. Inicialmente foram feitas simulações com a configuração original da cobertura, ou seja, sem o material isolante (lã de vidro), sem proteção solar permanente nas esquadrias e com taxa de renovação do ar igual a 1 ren/h tanto para o verão como para o inverno.

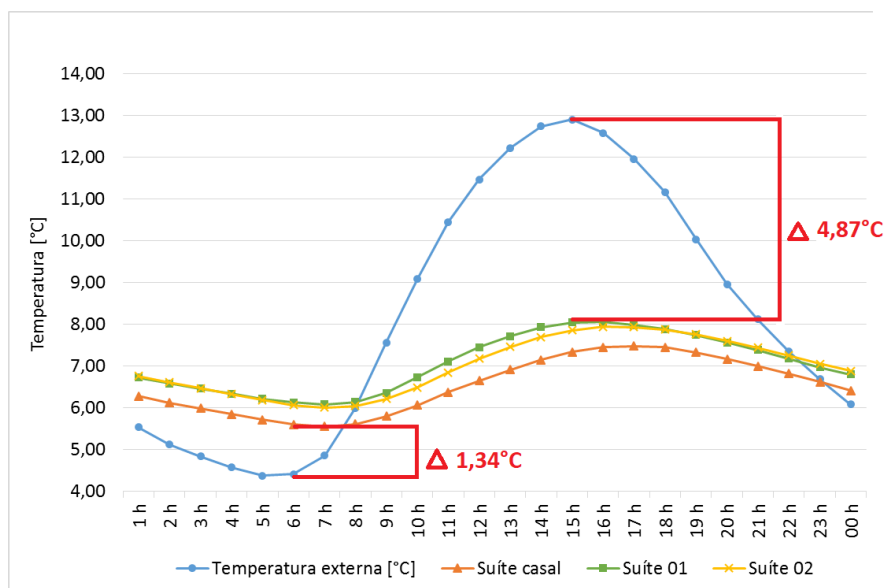
Com essa configuração obteve-se, para um dia típico de verão, uma temperatura interna da edificação menor que a temperatura externa no período das 10 horas da manhã até as 20 horas da noite, porém, fora desse período, a temperatura interna permaneceu maior que a externa. Por estar se avaliando o desempenho térmico especialmente nos dormitórios onde o maior período de permanência é justamente à noite, a edificação não apresentou um desempenho térmico satisfatório. Para o dia típico de inverno, o comportamento da edificação foi similar ao obtido num dia típico de verão. As temperaturas internas permaneceram maiores que às externas apenas no período da noite (incluindo a madrugada) e no início da manhã, e mesmo assim a diferença entre elas não ultrapassou 1,34 °C. Os gráficos abaixo demonstram esses resultados e as tabelas do apêndice B mostram os valores de temperatura em intervalos de uma hora. Além disso, no apêndice C, estão os gráficos da simulação para o ano todo.

Figura 15 – Simulação para um dia típico de verão



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 16 – Simulação para um dia típico de inverno



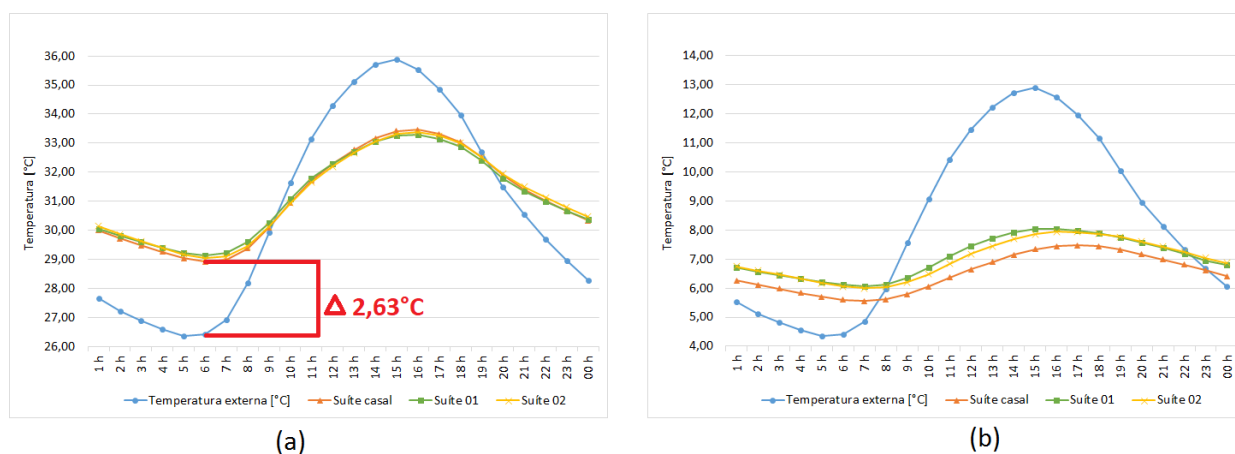
(fonte: elaborada pela autora)

Pelo fato de a edificação não obter um desempenho térmico satisfatório, foram alteradas algumas configurações conforme recomendações da NBR 15.575: 2013. A Norma de Desempenho (ABNT, 2013a) recomenda que, caso a edificação não atenda aos critérios estabelecidos (tabelas 4 e 5) para o dia típico de verão é necessário simular novamente o modelo considerando as seguintes mudanças:

- aumentar a taxa de renovação do ar para 5 ren/h, mantendo as esquadrias sem sombreamento;
- inserir uma proteção externa ou interna nas esquadrias de forma a barrar a radiação solar em no mínimo 50% e retornar à taxa de renovação de ar de 1 ren/h;
- combinar a alternativa de inserção de proteção das esquadrias com a taxa de renovação de ar de 5 ren/h.

Alterando a taxa de renovação de ar para 5 ren/h para o dia típico de verão, a temperatura interna dos dormitórios diminuiu em média 1,4 °C no período considerado crítico, ou seja, das 20 horas até as 10 horas da manhã, porém mesmo assim os resultados não se enquadraram nos critérios estabelecidos na norma. Para o dia típico de inverno nada foi alterado pois a NBR15.575: 2013 não sugere alterações. A figura 17 mostra os gráficos de temperaturas para os dias típicos de verão e de inverno após essa alteração.

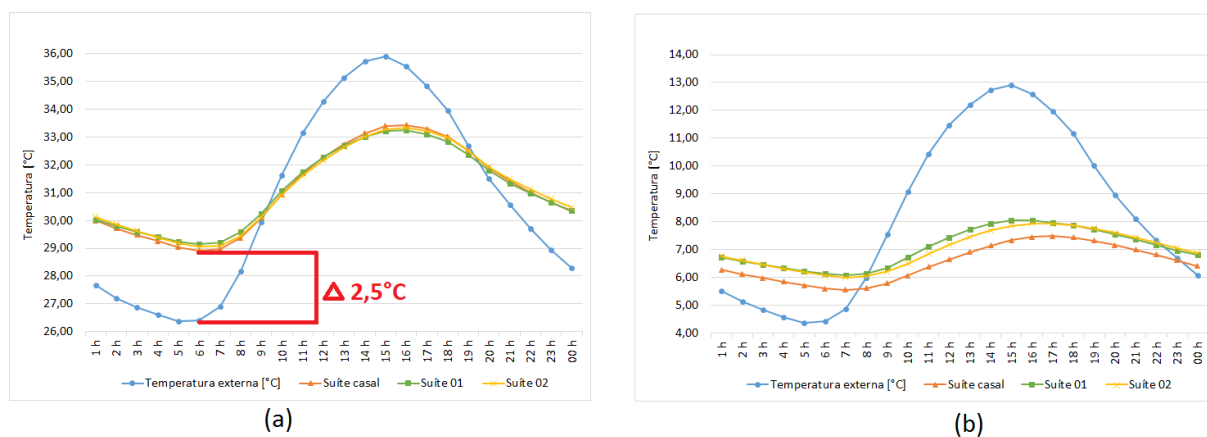
Figura 17 – Simulação com 5 ren/h para o dia típico de verão: (a) dia típico de verão e (b) dia típico de inverno



(fonte: elaborada pela autora)

Dessa forma, simulou-se então, para o dia típico de verão, a edificação com a presença de proteções externas permanentes nas esquadrias impedindo a radiação solar em 50% da área da esquadria e com 1 ren/h. Devido ao fato de os resultados não apresentarem mudanças significativas, ou seja, as alterações das temperaturas não chegaram a 1 °C, foi refeita a simulação combinando a proteção externa das esquadrias e as 5 ren/h. A figura 18 mostra esses resultados, podendo-se concluir que mesmo com todas as alterações recomendadas na NBR 15.575: 2013, a edificação não apresenta um desempenho térmico satisfatório nos seus dormitórios no período de maior uso desses ambientes. Para o dia típico de inverno os resultados permanecem os mesmos já que a NBR 15.575: 2013 não sugere modificações.

Figura 18 – Simulação com 5 ren/h e proteção externa nas esquadrias para o dia típico de verão: (a) dia típico de verão e (b) dia típico de inverno



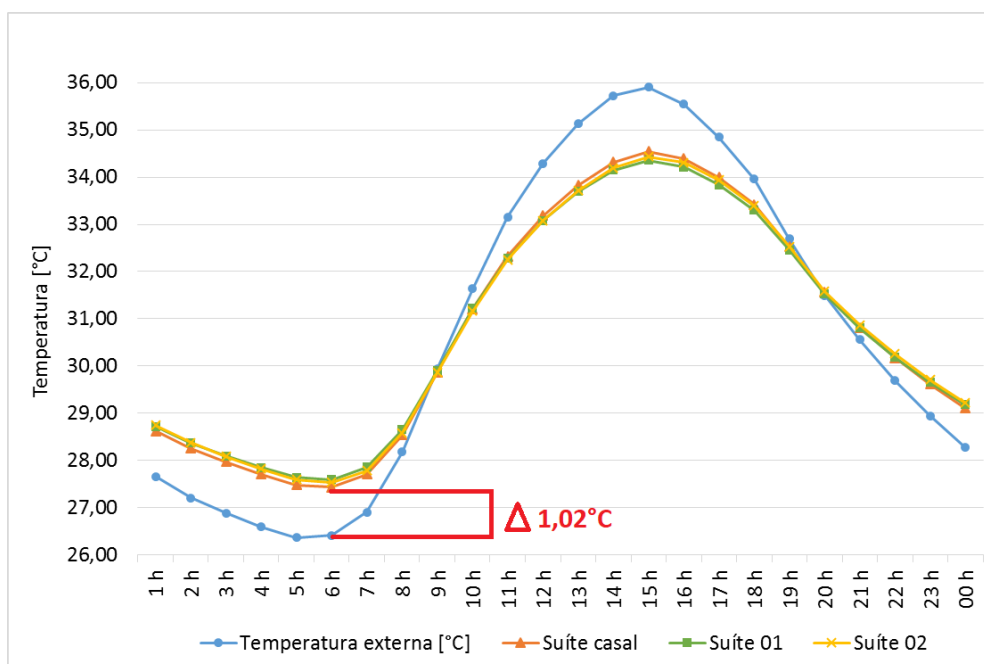
(fonte: elaborada pela autora)

Como tentativa de melhorar o desempenho térmico desses ambientes, foram feitas outras simulações alterando o tipo de material da cobertura e incluindo um material do tipo isolante térmico entre as telhas e a laje da cobertura. Dessa forma, as telhas de fibrocimento foram trocadas por telhas cerâmicas e duas camadas de lã de vidro foram acrescentadas à composição da cobertura. Após essas alterações construtivas, notou-se que a temperatura interna não sofreu nenhuma mudança significativa.

Assim sendo, optou-se por alterar o valor da taxa de renovação de ar. A ASHRAE – American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineering – sugere para projetos gerais de ventilação de ambientes uma taxa de renovação de ar, para residências, que esteja entre 5 e 20 ren/h (ASHRAE⁵, 1993 *apud* MOREIRA, 2009, p. 56), desse modo fez-se uma simulação na qual adotou-se 20 ren/h para o dia típico de verão. Essa taxa de 20 ren/h pode ser realizada, na prática, com uso de equipamentos de ventilação mecânica, com alteração do *layout* do telhado (criando chaminés de ventilação) e com modificações arquitetônicas na edificação que sejam controláveis de acordo com a estação do ano (como um maior número de janelas e basculantes). Na figura 19 está representado o gráfico com os resultados obtidos dessa simulação, nota-se uma melhora significativa nos períodos críticos, pois a diferença de temperatura interna e externa diminuiu para aproximadamente 1 °C.

⁵ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Fundamentals Handbook**, Sorbents and Desiccants, 1993.

Figura 19 – Simulação com 20 ren/h para o dia típico de verão

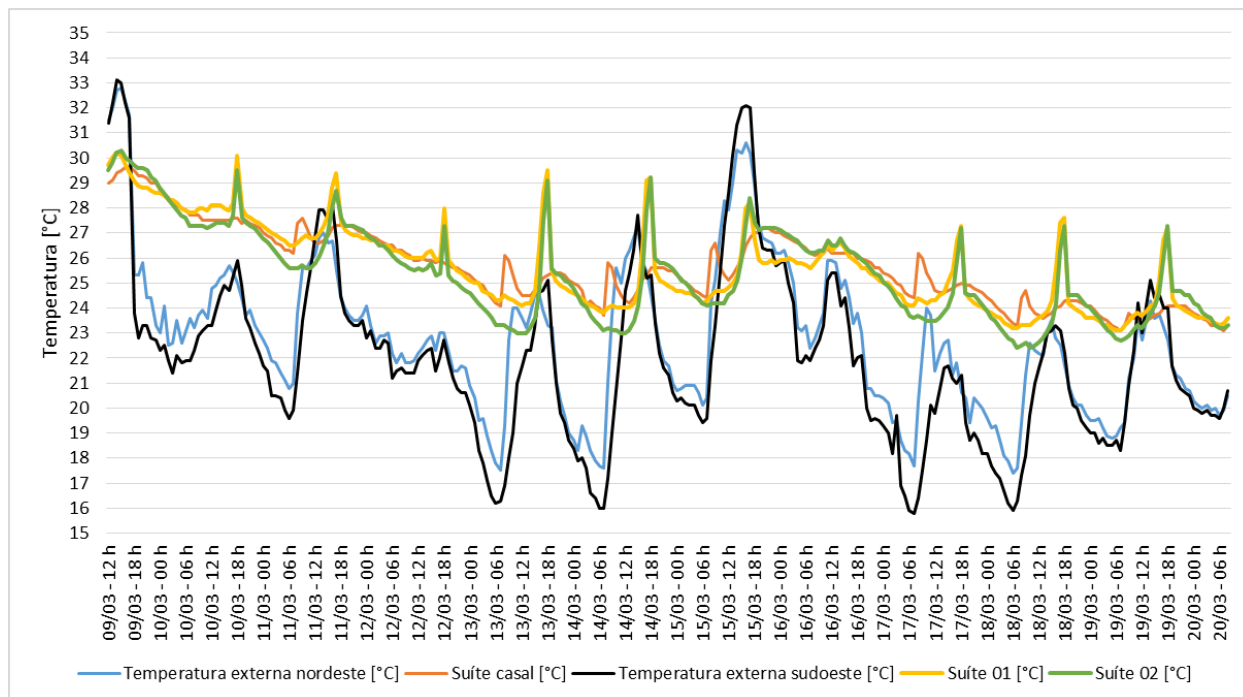


(fonte: elaborada pela autora)

Como a taxa de renovação de ar considerada é uma medida que pode ser controlada, essa taxa não foi aumentada para um dia típico de inverno, tornando essa uma solução para as estações mais quentes do ano. É importante ressaltar que a cidade de Porto Alegre possui grande amplitude de temperaturas, portanto, para adequar completamente a edificação quanto ao desempenho térmico, deve-se tomar uma série de medidas em conjunto, dificilmente uma única modificação será suficiente.

4.3. RESULTADOS DA MEDIÇÃO IN LOCO

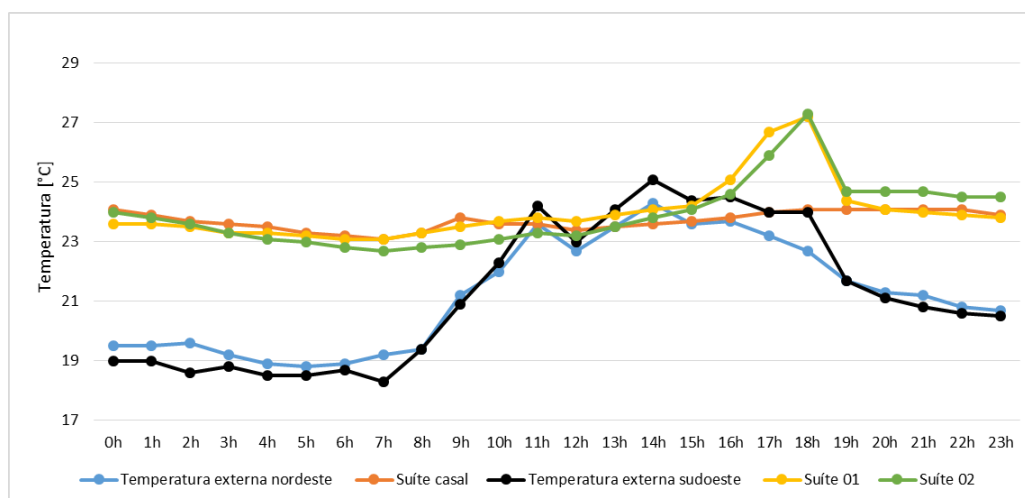
Como já explicado anteriormente, só foi possível realizar medições de temperatura no período do verão, visto que até a data de entrega do trabalho não houveram dias com temperaturas propícias para a medição de inverno. Além disso, no período em que foi realizado o ensaio, as temperaturas não obedeceram a faixa que caracteriza o dia típico de verão em sua totalidade, ou seja, em alguns horários, especialmente no período da madrugada, as temperaturas se encontraram abaixo dos 26,3 °C (temperatura mínima para caracterizar um dia típico de verão). O gráfico representado na figura 20 demonstra os resultados obtidos em todo o período de medição.

Figura 20 – Resultados da medição *in loco*

(fonte: elaborada pela autora)

A NBR 15.575:2013 recomenda que se trabalhe com uma sequência de três dias com características climáticas semelhantes e que se analise os dados do terceiro dia. Dessa forma, mesmo não obtendo características climáticas de um dia típico de verão, optou-se por analisar os dados do dia 19/03. Abaixo encontra-se o gráfico desse dia com os respectivos valores de temperatura.

Figura 21 - Temperaturas medidas no dia 19/03/17



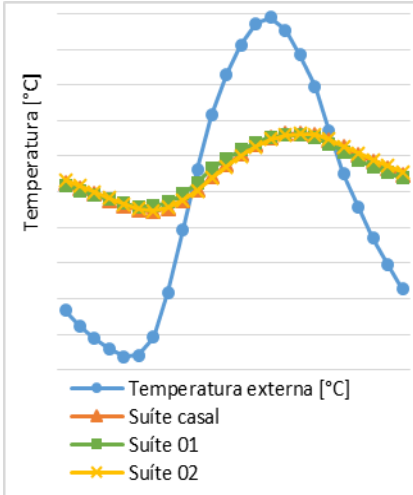
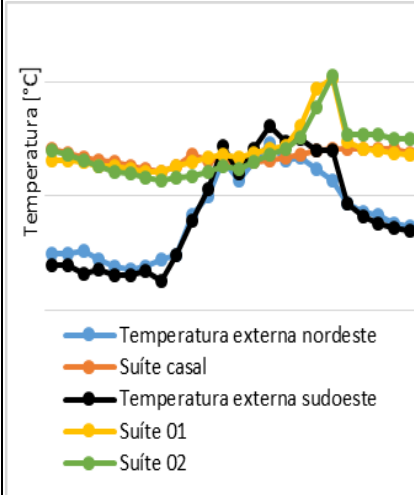
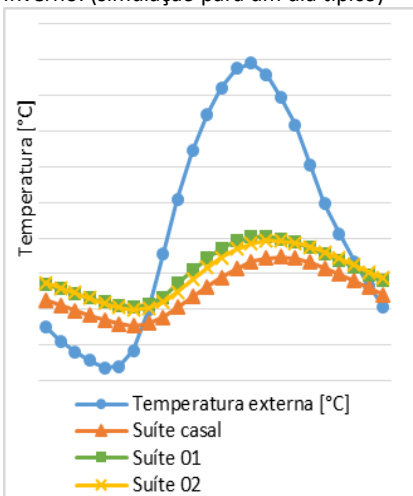
(fonte: elaborada pela autora)

A temperatura externa nordeste e a temperatura da suíte casal foram medidas pelo *datalogger* B e a temperatura externa sudoeste e as temperaturas das suítes 1 e 2 foram medidas pelo *datalogger* A. Nota-se que, mesmo a temperatura externa estando abaixo do que a NBR 15.575: 2013 recomenda para a realização do ensaio (entre 35,9 °C e 26,3 °C) a temperatura dos ambientes permaneceu, quase que na maioria do tempo, superior à externa, não apresentando assim um desempenho térmico adequado.

4.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A tabela a seguir mostra a comparação dos resultados obtidos pelos três procedimentos indicados na NBR 15.575: 2013. Apesar de a NBR 15.575: 2013 considerar o procedimento de medição *in loco* apenas informativo, os resultados obtidos por ele também estão presentes na tabela.

Quadro 3 – Quadro resumo de comparação dos resultados

	Procedimento Simplificado	Simulação Computacional	Medição <i>in loco</i>
Exigências da NBR 15.575	Cobertura: $U \leq 2,3 \text{ W/m}^2.\text{K}$	Verão: $T_{i, \text{máx.}} \leq T_{e, \text{máx.}}$	Verão: $T_{i, \text{máx.}} \leq T_{e, \text{máx.}}$
	Paredes: $U \leq 3,7 \text{ W/m}^2.\text{K}$ e $Ct \geq 130 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$	Inverno: $T_{i, \text{mín.}} \geq (T_{e, \text{mín.}} + 3^\circ\text{C})$	Inverno: $T_{i, \text{mín.}} \geq (T_{e, \text{mín.}} + 3^\circ\text{C})$
Resultados obtidos	Cobertura (verão): $U = 1,12 \text{ W/m}^2.\text{K}$ Cobertura (inverno): $U = 1,57 \text{ W/m}^2.\text{K}$	Verão: (simulação para um dia típico) 	Verão: (medição do dia 09/03) 
	Paredes: $U = 1,57 \text{ W/m}^2.\text{K}$ e $Ct = 273,36 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$	Inverno: (simulação para um dia típico) 	Inverno: Não foi realizada medição
Análise de desempenho térmico	Cobertura: Mínimo	Verão: Não atendeu	Verão: Não atendeu
	Paredes: Mínimo	Inverno: Não atendeu	–

(fonte: elaborada pela autora)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem como objetivo trazer as considerações finais a respeito do trabalho realizado e destacar algumas sugestões de pesquisas futuras.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É consenso que as habitações devem proporcionar aos seus usuários conforto e segurança durante sua vida útil. Devido a isso, o estudo de condições capazes de garantir que as edificações apresentem um conforto térmico adequado vem crescendo e se tornando cada vez mais necessário. Para tal, considerou-se importante estudar a forma como a NBR 15.575: 2013 aborda o conceito de desempenho térmico e os requisitos para alcançá-lo.

Esse trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho térmico de uma edificação residencial unifamiliar localizada no município de Porto Alegre através dos procedimentos propostos na NBR 15.575: 2013: procedimento simplificado, simulação computacional e medição *in loco*. Os resultados demonstraram divergências que não eram esperadas, uma vez que a hipótese inicial era de que se a edificação atendesse às exigências da NBR 15.575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c) quando avaliada pelo procedimento simplificado, iria atender também aos requisitos da norma quando avaliada pelos procedimentos de simulação computacional e medição *in loco*.

Ao avaliar a edificação através do procedimento simplificado foram atendidas as exigências propostas na NBR 15.575 (2013b, 2013c) mostrando assim que a edificação obtinha um desempenho térmico adequado. Porém, ao analisar através da simulação computacional, a edificação não apresentou resultados satisfatórios ao longo de todo o período (dias típicos de verão e inverno), apresentando divergências com o resultado anteriormente obtido. Ainda avaliando o desempenho térmico através da medição *in loco*, método que a NBR 15.575 (ABNT, 2013a) considera apenas informativo, apesar de não conseguir realizar as medições em dias indicados pela mesma norma, obtiveram-se resultados que também indicaram um desempenho térmico insatisfatório à edificação.

Com os resultados obtidos constatou-se que o procedimento simplificado pode ser uma ferramenta rápida, de baixo custo e bastante acessível, porém que pode apresentar algumas incertezas nos seus resultados visto que se detém apenas a sistemas de cobertura e paredes de

fachada, não considerando a interação dos sistemas que compõem a edificação. Já para a realização da avaliação pelo procedimento de simulação computacional existe a necessidade de conhecer e saber utilizar os *softwares EnergyPlus* e *SketchUp* não sendo um método tão trivial. Além disso, algumas dificuldades foram encontradas para a realização da simulação pelos *softwares*, visto que a NBR 15.575 (ABNT, 2013a) não apresenta claramente alguns parâmetros importantes que influenciam na simulação.

Um dos parâmetros que não é claramente definido é a configuração do dia típico de projeto. Nas tabelas A2 e A3 da NBR 15.575 (ABNT, 2013a), não estão presentes algumas características importantes quanto à direção e velocidade dos ventos nem definição exata da data que deve ser considerada como o dia típico. Os resultados, dessa forma, podem ser diversos dependendo de como forem configurados os parâmetros no *software*. Outro aspecto importante a ser considerado quando é feita uma análise através do dia típico de projeto, é que os dias típicos representam condições extremas com baixa frequência de ocorrência, podendo a edificação atender à norma, mas ser simultaneamente antieconômica, destacando-se que a análise de custo e benefício deve estar sempre presente.

Evidenciando que a ocorrência de um dia típico é pouco frequente, notou-se uma dificuldade para que fossem feitas as medições *in loco* no intervalo de temperaturas proposto pela NBR 15.575: 2013. Além dessa dificuldade, para realizar a medição *in loco* deve-se ter acesso aos equipamentos corretos e também é necessário que a edificação permaneça fechada durante todo o período de medição. Outra limitação desse procedimento é que ele só pode ser utilizado quando a edificação já está concluída, tornando impossível tomar decisões de projeto anteriores à execução com base nos resultados obtidos.

Acredita-se que devam ser adotadas estratégias passivas para que a edificação atenda às exigências da norma para a maioria dos dias do ano, entretanto para os dias com características extremas é inerente da situação que sejam utilizadas medidas ativas (como a utilização de equipamentos de ventilação mecânica e condicionadores de ar) a fim de proporcionar um desempenho aceitável. Ressalta-se que em cidades com grandes amplitudes térmicas, como Porto Alegre, seja muito difícil solucionar os problemas de desempenho térmico somente com uma alteração construtiva, há a necessidade de combinar diferentes medidas ativas e passivas para que a edificação atinja um desempenho térmico apropriado para todos os dias do ano.

Embora a percepção de conforto térmico seja subjetiva, dependente de pessoa para pessoa, nota-se uma necessidade em associar os níveis de desempenho térmico com as demandas do ser humano. Ou seja, não há garantia em ter conforto térmico em uma edificação que segue as exigências da NBR 15.575: 2013, visto que as temperaturas internas são comparadas com as externas na análise do desempenho, podendo assim uma edificação estar de acordo com a norma e não oferecer condições de habitabilidade.

5.2. SUGESTÕES DE PESQUISA

Levando-se em conta a importância do assunto estudado, é interessante que se desenvolvam outros estudos a fim de aprofundar e aumentar o conhecimento na área para que as edificações possam se tornar cada vez mais confortáveis do ponto de vista térmico e também auto-sustentáveis. Deste modo, são sugeridos outros temas que se vinculam ao referido assunto:

- a) Análise de desempenho térmico, para a mesma edificação, através da medição in loco no período de inverno, visto que não foi possível no presente trabalho;
- b) Análise de desempenho térmico através da simulação computacional e medição in loco considerando a ocupação da edificação;
- c) Estudo de materiais e modificações arquitetônicas a fim de melhorar o desempenho térmico da edificação;
- d) Análise orçamentária quanto ao incremento oriundo das sugestões de melhorias de desempenho térmico propostas no item anterior.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. **Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2010.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-1**: desempenho térmico de edificações – parte 1: definição, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 15.220-2**: desempenho térmico de edificações – parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.
- _____. **NBR 15.220-3**: desempenho térmico de edificações – parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.
- _____. **NBR 15.575-1**: edificações habitacionais – desempenho – parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.
- _____. **NBR 15.575-4**: edificações habitacionais – desempenho – parte 4: sistemas de vedações verticais externas e internas. Rio de Janeiro, 2013b.
- _____. **NBR 15.575-5**: edificações habitacionais – desempenho – parte 5: sistemas de cobertura. Rio de Janeiro, 2013c.
- _____. **NBR 13.749**: revestimento de paredes e tetos de argamassa inorgânicas – especificação. Rio de Janeiro, 2013.
- BAGNATI, M. M. **Zoneamento Bioclimático e Arquitetura Brasileira**: qualidade do ambiente construído. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- BALTAR, M. G. **Redução da Demanda de Energia Elétrica utilizando Parâmetros Construtivos visando ao conforto térmico**. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- BANCO DE DADOS do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE. Cachoeira Paulista, São Paulo. **Monitoramento de dados climáticos**. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>>. Acesso em: 09 nov. 2016.
- BORGES, C. A. M.; SABBATINI, F. H. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. São Paulo: Escola Politécnica USP, 2008. Boletim Técnico Título IV, Série ISSN 0103-9830

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15.575/2013.** Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CASTRO, A. P. A. S. **Desempenho Térmico de Vidros utilizados na Construção Civil:** estudos em células-teste. 2006. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

CASTRO, A. P. A. S.; LABAKI, L. C.; CARAM, R. M.; BASSO, A.; FERNANDES, M. R. **Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral.** Ambiente construído, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 69-76, abr./jun. 2003.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES;
ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO. **Catálogo de propriedades térmicas e óticas de vidros comercializados no Brasil.** Florianópolis: UFSC. 2015.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico.** 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

FERRARO, L. W.; HASENACK, H. **Aspectos do Clima de Porto Alegre.** In: ZURITA, M. L. L.; TOLFO, A. M. (Org) A qualidade do Ar em Porto Alegre. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-30.0379803,-51.1591069,133m/data=!3m1!1e3?hl=en>>. Acesso em 13 out. 2016.

GRAF, H. F. **Transmitância Térmica & Energia Incorporada na Arquitetura:** sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a norma NBR 12.721. 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

KINSEL, L. S. **Avaliação do Conforto e da Energia em Edifícios Residenciais em Porto Alegre.** 2009. 212 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

KREITH, F. **Princípios de Transferência de Calor.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. **Casa Eficiente:** bioclimatologia e desempenho térmico. Florianópolis: UFSC/LabEEE, v. 1, 2010.

LAMBERTS, R.; DUARTE, V. C. P. **Desempenho Térmico de Edificações.** 7.ed. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3.ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2014.

LORENZI, L. S. **Análise Crítica e Proposições de Avanço nas Metodologias de Ensaio Experimentais de Desempenho à Luz da ABNT NBR 15.575 (2013) para Edificações Habitacionais de Interesse Social Térreas**. 2013. 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MILAN, V. B. **Desempenho Térmico: análise de uma edificação escolar padrão próinfância instalada no município de Camaquã**. 2015. 108 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MOREIRA, R. D. S. **Comparação da viabilidade técnica-econômica em condicionamento de ar: compressor a pistão versus compressor rotativo de velocidade variável**. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

MORELLO, A. **Avaliação do Comportamento Térmico do Protótipo Habitacional Alvorada**. 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Transcrição da seção de Geografia. Disponível em: <<http://revistas.fee.tche.br/index.php/boletim-geografico-rs/article/view/3236>>. Acesso em: 18 out. 2016.

MOURA, L. F. **Verificação da Existência de Imprecisões nos Valores do Índice de Isolamento Térmico de Vestimenta da Norma ISO 9920:2007**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2012.

RETHWISCH, D. G.; CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. São Paulo: Grupo Gen - LTC, 2012.

SCHELLER, C.; MELO, A. P.; SORGATO, M. LAMBERTS, R. **Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações**. Florianópolis: UFSC/LabEEE. 2015.

SIQUEIRA, T. C. P. A.; AKUTSU, M.; LOPES, J. I. E.; DE SOUZA, H. A. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, p. 134, 2005.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575**. Paranoá, Brasília, n. 12, p. 13-22, 2014.

APÊNDICE A – Memória de cálculo do procedimento simplificado

Cálculo da transmitância térmica da cobertura. Cobertura composta por telha de fibrocimento (6mm), laje pré-moldada de concreto, tabelas cerâmicas com câmaras de ar não ventiladas e acabamento de gesso acartonado (1,25cm).

Tabela 9 – Condutividade térmica dos materiais da cobertura

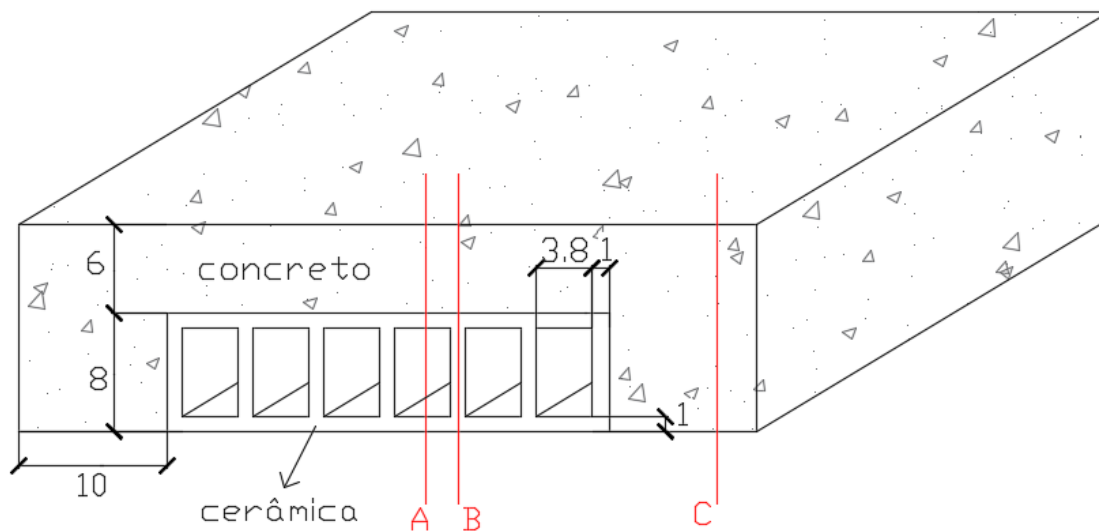
Materiais	λ [W/m.K]
Tabela Cerâmica	1,05
Concreto	1,75
Telha de fibrocimento	0,65
Gesso acartonado	0,35

(fonte: adaptada de ABNT, 2005)

1) Cálculo da resistência térmica das camadas:

Para efeito de cálculo dividiu-se a laje em 3 camadas distintas devido ao fato de ela ser um elemento composto por camadas não homogêneas, conforme figura a seguir.

Figura 22 – Detalhe da laje pré-moldada



(fonte: elaborada pela autora)

Camada A: 6 cm de concreto + 1 cm de cerâmica + ar + 1 cm de cerâmica.

Camada B: 6 cm de concreto + 8 cm de cerâmica.

Camada C: 14 cm de concreto.

Camada A:

$$R_A = \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}}$$

$$R_A = \frac{0,06}{1,75} + \frac{0,01}{1,05} + R_{ar} + \frac{0,01}{1,05}$$

$$R_{A_{verão}} = \frac{0,06}{1,75} + \frac{0,01}{1,05} + 0,21 + \frac{0,01}{1,05} = 0,2633 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{A_{inverno}} = \frac{0,06}{1,75} + \frac{0,01}{1,05} + 0,14 + \frac{0,01}{1,05} = 0,1933 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Camada B:

$$R_B = \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}}$$

$$R_B = \frac{0,06}{1,75} + \frac{0,08}{1,05} = 0,1105 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Camada C:

$$R_C = \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}}$$

$$R_C = \frac{0,14}{1,75} = 0,08 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

2) Cálculo da resistência térmica do componente (laje), considerando uma laje de dimensões 50 x 20 x 14 cm e tábua cerâmica de dimensões 30 x 20 x 8 cm:

$$R_{t1} = \frac{A_A + A_B + A_C}{\frac{A_A}{R_A} + \frac{A_B}{R_B} + \frac{A_C}{R_C}}$$

Sendo:

$$A_A = 0,038 \times 0,2 = 0,0076 \text{ m}^2$$

$$A_B = 0,01 \times 0,2 = 0,002 \text{ m}^2$$

$$A_c = 0,10 \times 0,2 = 0,02 \text{ m}^2$$

$$R_{t1_{\text{verão}}} = \frac{6,0,076 + 7,0,002 + 2,0,02}{\frac{6,0,076}{0,2633} + \frac{7,0,002}{0,1105} + \frac{2,0,02}{0,08}} = 0,2162 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{t1_{\text{inverno}}} = \frac{6,0,076 + 7,0,002 + 2,0,02}{\frac{6,0,076}{0,1933} + \frac{7,0,002}{0,1105} + \frac{2,0,02}{0,08}} = 0,1708 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

3) Cálculo da resistência térmica total:

$$R_{t2_{\text{verão}}} = \frac{e_{\text{telha}}}{\lambda_{\text{telha}}} + R_{ar} + R_{t1_{\text{verão}}} + R_{ar} + \frac{e_{\text{gesso}}}{\lambda_{\text{gesso}}}$$

$$R_{t2_{\text{verão}}} = \frac{0,006}{0,65} + 0,21 + 0,2162 + 0,21 + \frac{0,0125}{0,35} = 0,6811 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{T_{\text{verão}}} = R_{SE} + R_{t2_{\text{verão}}} + R_{SI}$$

$$R_{T_{\text{verão}}} = 0,04 + 0,6811 + 0,17 = 0,8911 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{t2_{\text{inverno}}} = \frac{e_{\text{telha}}}{\lambda_{\text{telha}}} + R_{ar} + R_{t1_{\text{inverno}}} + R_{ar} + \frac{e_{\text{gesso}}}{\lambda_{\text{gesso}}}$$

$$R_{t2_{\text{inverno}}} = \frac{0,006}{0,65} + 0,14 + 0,1708 + 0,14 + \frac{0,0125}{0,35} = 0,4957 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{T_{\text{inverno}}} = R_{SE} + R_{t2_{\text{inverno}}} + R_{SI}$$

$$R_{T_{\text{inverno}}} = 0,04 + 0,4957 + 0,10 = 0,6357 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

4) Cálculo da transmitância térmica:

$$U_{\text{verão}} = \frac{1}{R_{T_{\text{verão}}}} = \frac{1}{0,8911} = 1,122 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} < 2,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \text{ (OK!)}$$

$$U_{\text{inverno}} = \frac{1}{R_{T_{\text{inverno}}}} = \frac{1}{0,6357} = 1,573 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} < 2,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \text{ (OK!)}$$

Cálculo da transmitância e da capacidade térmica das paredes de fachada. Paredes compostas por duas camadas de argamassa de reboco que envolvem o bloco cerâmico com câmaras de ar não ventiladas.

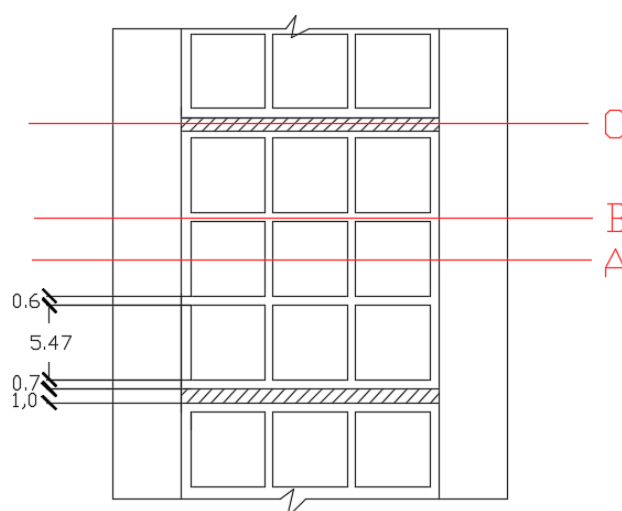
Tabela 10 – Condutividade térmica dos materiais das paredes de fachada

Materiais	λ [W/m.K]
Cerâmica	1,05
Argamassa de reboco e assentamento	1,15

(fonte: adaptada de ABNT, 2005)

Para efeito de cálculo dividiu-se a parede em 3 camadas distintas devido ao fato de ela ser um elemento composto por camadas não homogêneas, conforme figura a seguir.

Figura 23 – Detalhe da parede de fachada



(fonte: elaborada pela autora)

Camada A: 5 cm de reboco + 0,7 cm de cerâmica + ar + 0,6 cm de cerâmica + ar + 0,6 cm de cerâmica + ar + 0,7 cm de cerâmica + 5 cm de reboco.

Camada B: 5 cm de reboco + 19 cm de cerâmica + 5 cm de reboco.

Camada C: 5 cm de reboco + 19 cm de argamassa de assentamento + 5 cm de reboco.

1) Cálculo da resistência térmica das camadas:

Camada A:

$$R_A = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}}$$

$$R_A = \frac{0,05}{1,15} + \frac{0,007}{1,05} + 0,16 + \frac{0,006}{1,05} + 0,16 + \frac{0,006}{1,05} + 0,16 + \frac{0,007}{1,05} + \frac{0,05}{1,75}$$

$$R_A = 0,5917 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Camada B:

$$R_B = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}}$$

$$R_B = \frac{0,05}{1,15} + \frac{0,19}{1,05} + \frac{0,05}{1,15} = 0,2679 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Camada C:

$$R_C = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{arg. assentamento}}{\lambda_{arg. assentamento}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}}$$

$$R_C = \frac{0,05}{1,15} + \frac{0,19}{1,15} + \frac{0,05}{1,15} = 0,2523 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

- 1) Cálculo da resistência térmica do componente (parede), considerando que o bloco cerâmico tem largura igual a 29 cm:

$$R_t = \frac{A_A + A_B + A_C}{\frac{A_A}{R_A} + \frac{A_B}{R_B} + \frac{A_C}{R_C}}$$

Sendo:

$$A_A = 0,0547 \times 0,29 = 0,0159 \text{ m}^2$$

$$A_B = 0,007 \times 0,29 = 0,0020 \text{ m}^2$$

$$A_C = 0,01 \times 0,29 = 0,0029 \text{ m}^2$$

$$R_t = \frac{3,0159 + 4,0020 + 0,0029}{\frac{3,0159}{0,5917} + \frac{4,0020}{0,2679} + \frac{0,0029}{0,2523}} = 0,4804 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

2) Cálculo da resistência térmica total:

$$R_T = R_{SE} + R_t + R_{SI}$$

$$R_T = 0,04 + 0,4804 + 0,13 = 0,6504 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

3) Cálculo da transmitância térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,6504} = 1,54 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} < 3,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \text{ (OK!)}$$

4) Cálculo da capacidade térmica das camadas:

$$C_{T_A} = \sum e_i \cdot c_i \cdot \rho_i$$

Tabela 11 – Calor específico e densidade dos materiais das paredes de fachada

Materiais	c [kJ/kg.K]	ρ [kg/m³]
Cerâmica	0,92	1900
Argamassa de reboco e assentamento	1,00	1950

(fonte: adaptada de ABNT, 2005)

Camada A:

$$C_{T_A} = \sum (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + \sum (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâmica}$$

$$C_{T_A} = (0,10 \cdot 1,00 \cdot 1950) + (0,026 \cdot 0,92 \cdot 1900) = 240,448 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Camada B:

$$C_{T_B} = (0,10 \cdot 1,00 \cdot 1950) + (0,19 \cdot 0,92 \cdot 1900) = 527,12 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Camada C:

$$C_{T_C} = (0,29 \cdot 1,00 \cdot 1950) = 565,5 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

5) Cálculo da capacidade térmica do componente (parede):

$$C_T = \frac{A_A + A_B + A_C}{\frac{A_A}{C_{T_A}} + \frac{A_B}{C_{T_B}} + \frac{A_C}{C_{T_C}}}$$

$$C_T = \frac{3.0,0159 + 4.0,0020 + 0,0029}{\frac{3.0,0159}{245,448} + \frac{4.0,0020}{527,12} + \frac{0,0029}{565,5}} = 267,965 \frac{kJ}{m^2 \cdot K} > 130 \frac{kJ}{m^2 \cdot K} \text{ (OK!)}$$

**APÊNDICE B – Valores de temperatura resultantes da simulação computacional
para os dias típicos de verão e inverno**

As tabelas abaixo mostram os valores de temperatura simulados a partir do EnergyPlus para os dias típicos de verão e inverno, com a configuração original da edificação, ou seja, sem modificações de material e/ou sugeridas pela Norma de Desempenho.

Tabela 12 – Temperaturas para o dia típico de verão

Data	Hora	Temperatura externa [°C]	Temperaturas Internas [°C]								
			Suíte casal	Banho casal	Circulação	Banho 01	Suíte 01	Dutos	Banho 02	Suíte 02	Reservatório
21/dez	1 h	27,67	31,26	31,16	30,98	30,84	31,18	31,23	30,96	31,33	31,45
	2 h	27,21	31,09	31,06	30,88	30,78	31,04	31,19	30,91	31,16	31,27
	3 h	26,89	30,94	30,96	30,80	30,74	30,92	31,16	30,86	30,99	31,09
	4 h	26,60	30,78	30,85	30,71	30,70	30,79	31,12	30,82	30,82	30,89
	5 h	26,37	30,62	30,75	30,63	30,66	30,67	31,08	30,77	30,66	30,69
	6 h	26,42	30,49	30,67	30,57	30,64	30,58	31,05	30,75	30,52	30,51
	7 h	26,91	30,46	30,65	30,57	30,65	30,60	31,03	30,76	30,48	30,36
	8 h	28,18	30,55	30,68	30,66	30,72	30,72	31,03	30,84	30,56	30,29
	9 h	29,94	30,76	30,82	30,84	30,84	30,94	31,06	30,97	30,76	30,34
	10 h	31,64	31,05	31,00	31,07	31,01	31,26	31,11	31,13	31,04	30,44
	11 h	33,15	31,42	31,23	31,37	31,23	31,65	31,18	31,33	31,39	30,59
	12 h	34,29	31,77	31,46	31,59	31,37	31,94	31,27	31,47	31,71	30,79
	13 h	35,13	32,06	31,64	31,78	31,49	32,18	31,35	31,57	32,00	31,05
	14 h	35,72	32,33	31,80	31,93	31,60	32,39	31,41	31,65	32,28	31,31
	15 h	35,90	32,52	31,92	32,03	31,66	32,53	31,47	31,70	32,48	31,55
	16 h	35,54	32,62	32,00	32,08	31,69	32,60	31,51	31,71	32,59	31,77
	17 h	34,84	32,65	32,03	32,07	31,69	32,59	31,55	31,69	32,64	31,96
	18 h	33,96	32,61	32,03	32,03	31,66	32,52	31,56	31,64	32,61	32,11
	19 h	32,70	32,46	31,96	31,92	31,59	32,35	31,56	31,56	32,48	32,17
	20 h	31,50	32,25	31,84	31,77	31,49	32,11	31,54	31,47	32,28	32,14
	21 h	30,56	32,04	31,71	31,60	31,37	31,88	31,53	31,37	32,09	32,08
	22 h	29,70	31,83	31,56	31,43	31,23	31,70	31,48	31,26	31,90	31,97
	23 h	28,95	31,65	31,44	31,30	31,15	31,55	31,44	31,18	31,73	31,82
	00 h	28,28	31,48	31,32	31,18	31,08	31,40	31,39	31,12	31,56	31,66

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 13 – Temperaturas para o dia típico de inverno

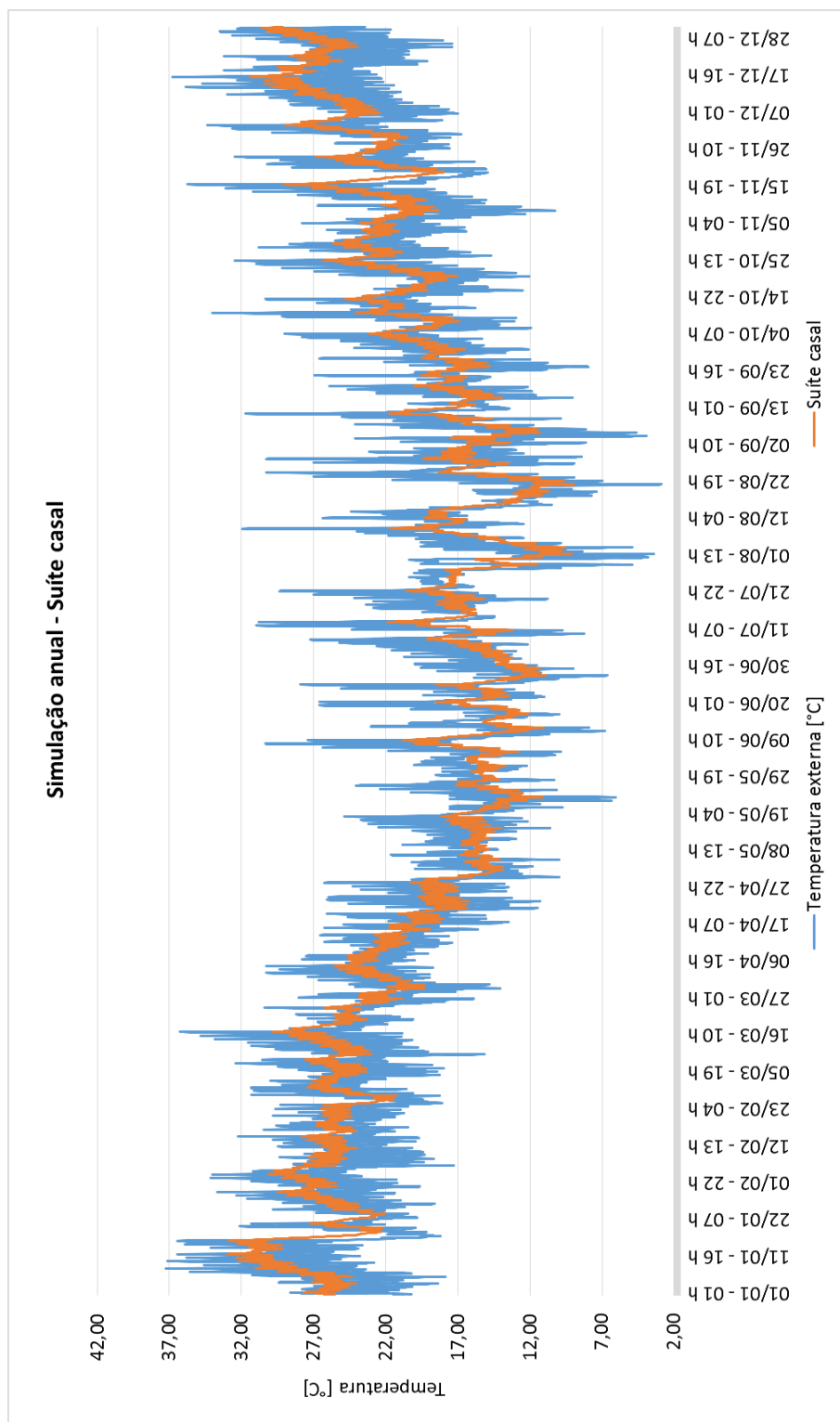
Data	Hora	Temperatura externa [°C]	Temperaturas internas [°C]								
			Suíte casal	Banho casal	Circulação	Banho 01	Suíte 01	Dutos	Banho 02	Suíte 02	Reservatório
21/jun	1 h	5,53	6,27	6,31	6,57	6,89	6,72	7,36	6,84	6,76	6,48
	2 h	5,12	6,11	6,20	6,46	6,81	6,58	7,30	6,78	6,60	6,32
	3 h	4,83	5,98	6,10	6,38	6,74	6,45	7,25	6,73	6,46	6,17
	4 h	4,57	5,84	6,00	6,29	6,68	6,33	7,20	6,69	6,32	6,00
	5 h	4,36	5,70	5,90	6,21	6,61	6,21	7,14	6,64	6,17	5,84
	6 h	4,41	5,60	5,82	6,15	6,57	6,12	7,10	6,61	6,06	5,68
	7 h	4,85	5,55	5,78	6,15	6,56	6,08	7,06	6,63	6,00	5,56
	8 h	5,99	5,61	5,82	6,24	6,60	6,14	7,06	6,72	6,04	5,51
	9 h	7,56	5,79	5,94	6,42	6,71	6,35	7,09	6,87	6,21	5,52
	10 h	9,08	6,06	6,12	6,65	6,85	6,72	7,13	7,05	6,48	5,60
	11 h	10,44	6,37	6,35	6,87	7,05	7,10	7,20	7,16	6,84	5,72
	12 h	11,46	6,64	6,53	7,04	7,18	7,44	7,27	7,24	7,17	5,90
	13 h	12,21	6,90	6,71	7,19	7,30	7,71	7,34	7,30	7,45	6,14
	14 h	12,74	7,14	6,87	7,32	7,40	7,93	7,41	7,36	7,69	6,41
	15 h	12,90	7,33	7,01	7,42	7,47	8,03	7,46	7,39	7,85	6,66
	16 h	12,58	7,44	7,09	7,46	7,49	8,04	7,49	7,39	7,94	6,88
	17 h	11,95	7,47	7,11	7,46	7,48	7,97	7,49	7,36	7,92	7,05
	18 h	11,16	7,44	7,10	7,41	7,43	7,88	7,49	7,32	7,86	7,15
	19 h	10,03	7,32	7,02	7,31	7,34	7,74	7,48	7,25	7,76	7,17
	20 h	8,95	7,16	6,91	7,17	7,24	7,55	7,45	7,16	7,60	7,11
	21 h	8,12	6,99	6,80	7,04	7,14	7,38	7,43	7,08	7,43	7,02
	22 h	7,34	6,81	6,68	6,91	7,03	7,17	7,39	7,00	7,25	6,89
	23 h	6,68	6,61	6,56	6,76	6,89	6,96	7,35	6,91	7,05	6,75
	00 h	6,07	6,41	6,41	6,59	6,78	6,80	7,28	6,81	6,87	6,60

(fonte: elaborada pela autora)

**APÊNDICE C – Gráficos de temperaturas resultantes da simulação
computacional para o ano todo**

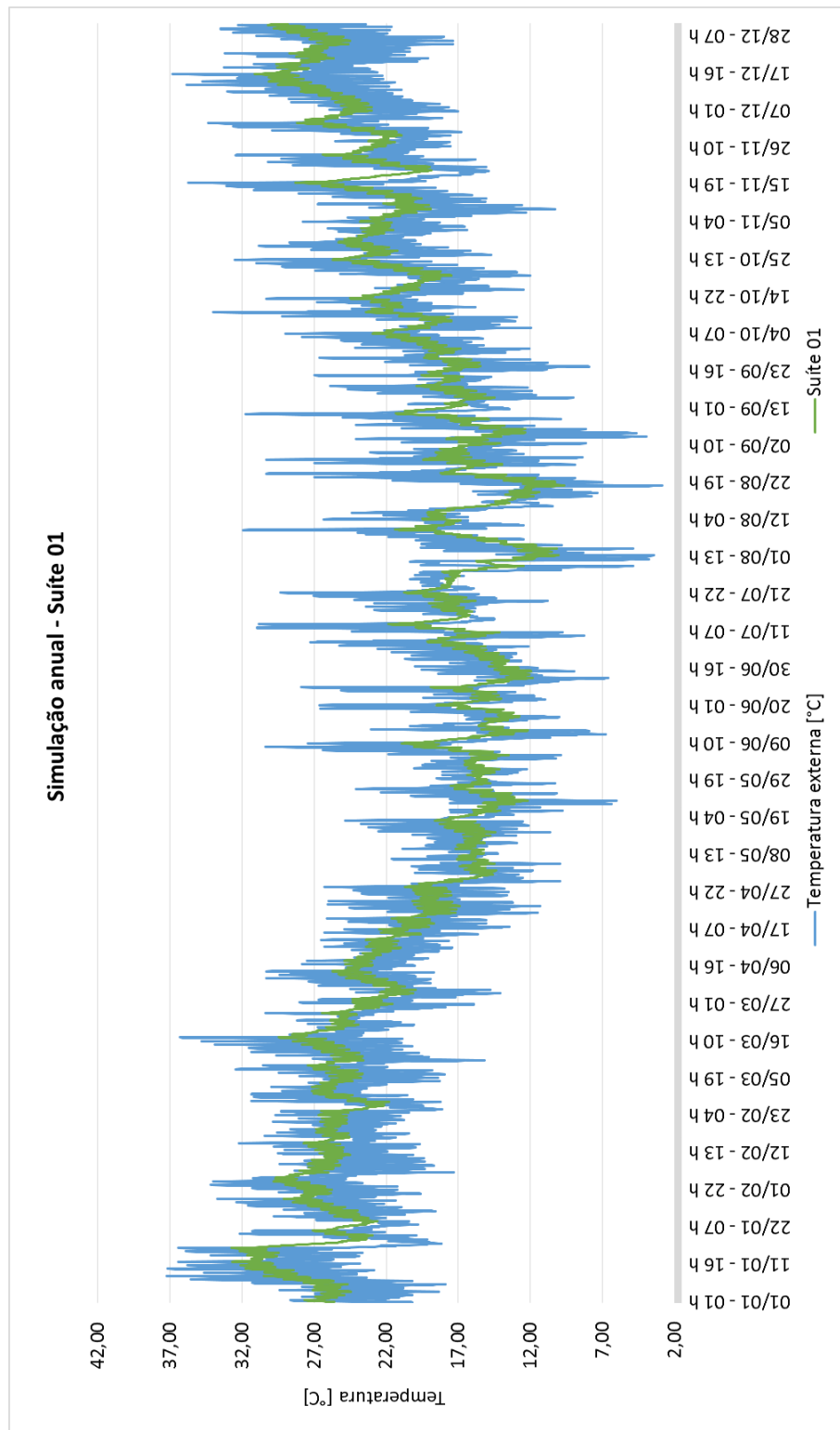
Os gráficos abaixo mostram os valores de temperatura simulados a partir do EnergyPlus para o ano todo, com a configuração original da edificação, ou seja, sem modificações de material e/ou sugeridas pela Norma de Desempenho.

Figura 24 – Simulação anual para a suíte do casal



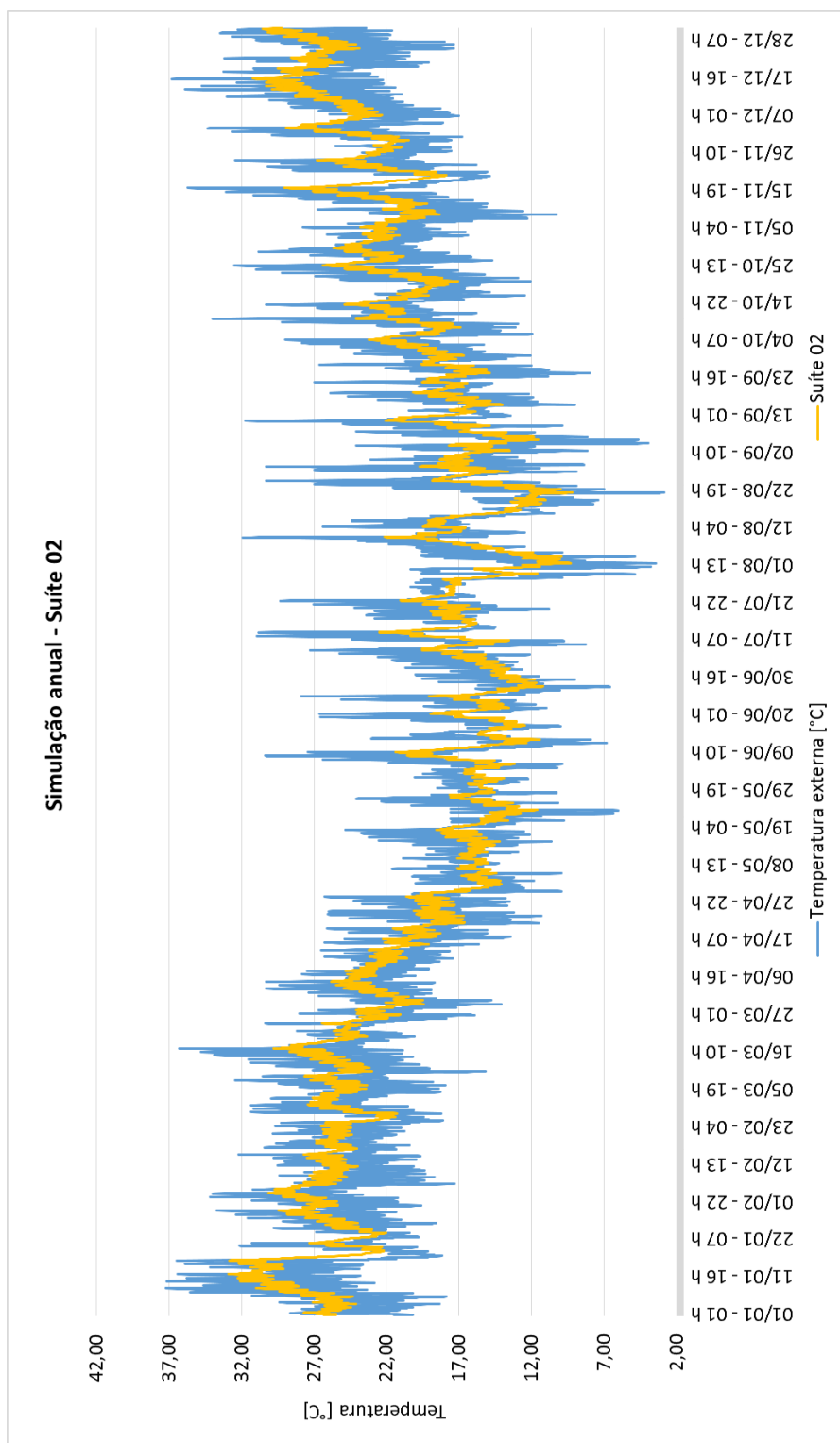
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 25 – Simulação anual para a suíte 01



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 26 – Simulação anual para a suíte 02



(fonte: elaborada pela autora)