

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
NÍVEL MESTRADO**

MATEUS FONSECA RIBEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SIMULAÇÃO DE VENTILAÇÃO EM CONTEXTO
URBANO COM COEFICIENTES DE PRESSÃO TABELADOS E ORIUNDOS DE
CFD**

São Leopoldo

2022

MATEUS FONSECA RIBEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SIMULAÇÃO DE VENTILAÇÃO EM CONTEXTO
URBANO COM COEFICIENTES DE PRESSÃO TABELADOS E ORIUNDOS DE
CFD**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientadora: Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira

São Leopoldo

2022

R484a Ribeiro, Mateus Fonseca.
Análise comparativa de simulação de ventilação em contexto urbano com coeficientes de pressão tabelados e oriundos de CFD / por Mateus Fonseca Ribeiro. – 2022.
136 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2022.
“Orientadora: Dra. Maria Fernanda de Oliveira”.

1. Coeficientes de pressão. 2. Ventilação natural.
3. Dinâmica computacional dos fluidos (CFD).
4. Simulação computacional. I. Título.

CDU: 72:697.921.2

MATEUS FONSECA RIBEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SIMULAÇÃO DE VENTILAÇÃO EM CONTEXTO
URBANO COM COEFICIENTES DE PRESSÃO TABELADOS E ORIUNDOS DE
CFD**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Grala Cunha – PROGRAU/UFPel

Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf Gonzalez – PPGARQURB/Unisinos

Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira (Orientadora) – PPGARQURB/Unisinos

A Nadia Fonseca, minha mãe.

AGRADECIMENTOS

A Elton Ribeiro e Nadia Fonseca, meus pais, pelos ensinamentos e oportunidades dadas e pelo apoio incondicional em todos meus projetos.

A minha querida Gabriela Feijó, por sempre estar presente, com palavras de carinho e incentivo. Pela compreensão, amizade e por tornar meus dias melhores.

A meu primo e irmão, Linus Schuster, pela amizade, conversas e parceria.

A Fernanda Souza, pelo suporte dado em diversos momentos durante essa trajetória.

A minha família, pelo carinho, amor e compreensão durante este projeto e todos os outros.

A minha orientadora, Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira, pela confiança, dedicação e valiosos ensinamentos dados durante a orientação deste trabalho.

“Fortis fortuna adiuvat.”

(Provérbio romano)

RESUMO

A preocupação mundial com a finitude dos recursos naturais é um alerta para a necessidade da otimização do consumo desses recursos no mercado da construção civil. O conforto térmico é um fator relevante na busca por edificações mais sustentáveis, visto que os sistemas de climatização são grandes responsáveis pelo alto consumo energético de edificações. A partir da ventilação natural, se corretamente planejada, é possível climatizar edificações durante boa parte do tempo, em diversas regiões climáticas do Brasil. O uso das simulações computacionais auxilia neste processo no qual se deve levar em consideração o contexto ao qual a edificação a ser analisada está inserida. O objetivo desta dissertação é investigar a influência dos coeficientes de pressão na ventilação interna de uma habitação unifamiliar dentro de um contexto urbano hipotético na cidade de Porto Alegre. Dessa forma, tem-se os coeficientes de pressão como um componente relevante da equação para a avaliação da ventilação natural na simulação computacional. Nesta dissertação, buscou-se aplicar um método de simulação em fluidodinâmica computacional para a obtenção de coeficientes de pressão próprios ao contexto criado e comparados aos coeficientes de pressão tabelados, amplamente utilizados, fornecidos pela AIVC. Para a análise comparativa, foi modelada uma unidade habitacional unifamiliar no *software* de simulação energética DesignBuilder e simulada com coeficientes de pressão obtidos pela simulação CFD e os encontrados no banco de dados AIVC. Os resultados encontrados indicaram níveis superestimados de renovações de ar para os coeficientes de pressão AIVC levando em consideração o contexto hipotético avaliado. Foram registradas diferenças de temperatura operativa horária que chegam a 1,05° C entre os dois modelos.

Palavras-chave: Coeficientes de pressão; Ventilação natural; CFD; Simulação computacional.

ABSTRACT

The limited availability of natural resources raised a global awareness to the necessity of optimizing the consumption of these resources in the civil construction. Thermal comfort is an important factor in the pursuit of making sustainable buildings since active conditioning systems are quite responsible for the high energy consumption in buildings. A properly designed natural ventilation is capable to provide thermal comfort during most of the time in the many climatic regions of Brazil. The use of thermal simulations assists the design process of natural ventilation, in which the context where the building is inserted must be considered. The aim of this research is to evaluate the influence of the pressure coefficients in the natural ventilation of an isolated residential building located in a specific context created in the city of Porto Alegre. The pressure coefficients are relevant components of the equations that evaluate the natural ventilation in the computer simulation. The method applied in this research relied on a Computational Fluid Dynamics simulation to obtain pressure coefficients specific to the context created and compared to the widely used AIVC pressure coefficients. In order to analyze the impact of the different pressure coefficients, the housing unit was modeled in an energy simulation software. Hence, it was simulated with the CFD pressure coefficients and the AIVC database pressure coefficients. The results found indicated overpredicted levels of air exchange for the AIVC pressure coefficients, considering the context evaluated. Differences in hourly operative temperature reached 1.05° C between the two models.

Keywords: Pressure coefficients; Natural ventilation; CFD; Thermal simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Definição da camada limite	24
Figura 2 - Porosidade de afastamento entre os edifícios	26
Figura 3 - Padrão do fluxo de ar ao redor de uma edificação.....	27
Figura 4 – Padrões de escoamento ao redor de uma edificação	28
Figura 5 - Efeitos aerodinâmicos em edificação isolada.....	28
Figura 6 – Características da esteira.....	29
Figura 7 – Regimes de fluxo de vento em diferentes disposições urbanas.....	31
Figura 8 - Efeitos aerodinâmicos em diferentes contextos topográficos.....	32
Figura 9 - Ventilação unilateral por ação dos ventos.....	35
Figura 10 - Fluxo do ar devido a diferenças de pressão e temperatura	36
Figura 11 - Ventilação por efeito chaminé	37
Figura 12 - Diversos mecanismos de ventilação natural ocorrendo em uma única edificação	38
Figura 13 - Gráfico da zona de conforto segundo Olgay	43
Figura 14 - Carta Bioclimática de Givoni	44
Figura 15 - Gráfico relacionando PMV e PPD	45
Figura 16 - Mudança de temperatura de conforto com média da temperatura externa mensal.....	46
Figura 17 - Limites de conforto para edificações de ventilação natural controlada pelo ocupante.....	50
Figura 18 – Planta Baixa da edificação em análise: (a) térreo e (b) segundo pavimento	61
Figura 19 - Implantação e corte do contexto a ser analisado	63
Figura 20 - Domínios: (a) norte – sul, (b) leste – oeste, (c) nordeste – sudoeste, (d) noroeste – sudeste.....	65
Figura 21 - Ferramenta vertex sizing.....	67
Figura 22 -Vista superior da malha do domínio	67
Figura 23 - Vista inferior da malha	68
Figura 24 - Malha das edificações.....	68
Figura 25 - Distribuição das linhas monitores.....	71
Figura 26 - Disposição das faces para as orientações dos ventos.....	72
Figura 27 - Padrão de inserção dos coeficientes de pressão	74

Figura 28 - Materiais dos componentes da envoltória	74
Figura 29 - Composições da envoltória: Paredes (a), Cobertura (b) e Laje de entre pisos (c).....	75
Figura 30 - Vistas do fluxo de vento para o vento leste: (a) vista norte, (b) vista de topo e (c) perspectiva	82
Figura 31 - Vistas do fluxo de vento para o vento oeste: (a) vista norte, (b) vista de topo e (c) perspectiva	83
Figura 32 - Vistas do fluxo de vento para o vento norte: (a) vista norte, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva	84
Figura 33 - Vistas do fluxo de vento para o vento sul: (a) vista sul, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva	85
Figura 34 - Vistas do fluxo de vento para o vento nordeste: (a) vista norte, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva.....	86
Figura 35 - Vistas do fluxo de vento para o vento sudeste: (a) vista sul, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva	87
Figura 36 - Vistas do fluxo de vento para o vento noroeste: (a) vista norte, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva.....	88
Figura 37 - Vistas do fluxo de vento para o vento sudoeste: (a) vista sul, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva	89
Figura 38 - Disposição das faces de acordo com a orientação do vento	91
Figura 39 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento leste	92
Figura 40 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento oeste	93
Figura 41 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento norte e sul respectivamente.....	93
Figura 42 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento sudeste e nordeste respectivamente	94
Figura 43 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento noroeste e sudoeste respectivamente	94
Figura 44 - Temperatura operativa durante o período de resfriamento: AIVC x CFD	96
Figura 45 - Taxas de renovação de ar no período de resfriamento: AIVC x CFD	96
Figura 46 - Temperatura operativa no dia 13 de dezembro: AIVC x CFD	97

Figura 47 - Dia 13 de dezembro: (a) taxas de renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento	98
Figura 48 - Temperatura operativa por zona para o dia 13 de dezembro: AIVC x CFD	99
Figura 49 - Dia 13 de dezembro por zona: (a) taxas de renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento.....	100
Figura 50 - Temperatura operativa por zona no dia 8 de dezembro: AIVC x CFD ..	101
Figura 51 - Dia 8 de dezembro por zona: (a) Taxas de renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento.....	102
Figura 52 - Temperatura operativa durante período de aquecimento: AIVC x CFD	103
Figura 53 - Taxas de renovação de ar durante todo período de aquecimento: AIVC x CFD.....	104
Figura 54 - Temperatura operativa horária para o dia 3 de junho: AIVC x CFD	105
Figura 55 - Dia 3 de junho: (a) Taxas de renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento.....	105
Figura 56 - Temperatura operativa por zona para o dia 3 de junho: AIVC x CFD ...	106
Figura 57 - Dia 3 de junho por zona: (a) Taxas renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento	107
Figura 58 - Temperatura operativa no dia 15 de julho por zonas	108
Figura 59 - Dia 15 de julho por zona: (a) Taxas de ventilação (b) orientação e velocidade do vento	109
Figura 60 – Simulação CFD em geometria aberta	113
Figura 61 – Convergência do modelo leste	129
Figura 62 – Convergência do modelo oeste.....	130
Figura 63 – Convergência do modelo nordeste.....	131
Figura 64 – Convergência do modelo sudeste	132
Figura 65 – Convergência do modelo noroeste.....	133
Figura 66 – Convergência do modelo sudoeste	134
Figura 67 – Convergência do modelo norte	135
Figura 68 – Convergência do modelo sul	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação simplificada de distintas formas urbanas em ordem decrescente aproximada de sua capacidade de influência no clima local	25
Tabela 2 - Efeitos aerodinâmicos	30
Tabela 3 - Escala de Beaufort	39
Tabela 4 - Resumo de equações e parâmetros dos limites de conforto para edificações ventiladas naturalmente	51
Tabela 5 - Variáveis relacionadas a cada fonte de calor em uma edificação	56
Tabela 6 - Síntese do método	61
Tabela 7 – Especificação das zonas	62
Tabela 8 - Velocidades médias mensais para Porto Alegre	69
Tabela 9 - Padrão de ocupação	76
Tabela 10 - Padrão de iluminação.....	77
Tabela 11 - Resumo de equações e parâmetros dos limites de conforto para edificações ventiladas naturalmente	79
Tabela 12 - Coeficientes de pressão: (a) resultados da simulação CFD e (b) Coeficientes de pressão AIVC.....	90
Tabela 13 - Temperatura operativa 13 dezembro por zona	125
Tabela 14 - Taxas de ventilação por zona no dia 13 de dezembro	125
Tabela 15 - Temperatura operativa 8 de dezembro por zona	126
Tabela 16 - Taxas de ventilação por zona no dia 8 de dezembro	126
Tabela 17 - Temperatura operativa 3 de junho por zona.....	127
Tabela 18 - Taxas de ventilação 3 de junho por zona.....	127
Tabela 19 - Temperatura operativa 15 de julho por zona.....	128
Tabela 20 - Taxas de ventilação 15 de julho por zona	128

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers
C _p	Coeficiente de Pressão
C _d	Coeficiente de Descarga
CFD	Dinâmica Computacional dos Fluidos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
TRY	Typical Meteorological Year
T _o	Temperatura Operativa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Tema e Delimitação do Tema	18
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Justificativa	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Ventilação	22
2.1.1 Ventilação no meio urbano.....	22
2.1.2 Ventilação natural em ambientes internos.....	33
2.1.3 Ventilação Híbrida ou de Modo Misto.....	40
2.2 Conforto Térmico	41
2.2.1 Conforto térmico, zona de conforto térmico e métodos preditivos.....	41
2.2.2 Conforto térmico adaptativo	49
2.2.3 Recomendações da ASHRAE 55	50
2.3 Parâmetros da ventilação natural	52
2.3.1 Coeficientes de pressão	52
2.3.2 Fluxo de ar através das aberturas	54
2.4 Simulações computacionais	55
2.4.1 Simulação Computacional.....	55
2.4.2 Arquivos climáticos para simulação.....	57
2.4.3 Simulação em fluidodinâmica computacional (CFD)	58
3. METODOLOGIA	60
3.1 Definição do modelo de edificação	61
3.2 Definição do contexto	63
3.3 Simulação CFD	63
3.3.1 Domínio.....	64
3.3.2 Malha.....	66
3.3.3 Configuração de Parâmetros da Simulação	69
3.3.4 Solução	70
3.3.5 Pós-produção	70
3.4 Simulações computacionais	72

3.4.1 Coeficientes de pressão CFD e AIVC	73
3.4.2 Envoltória	74
3.4.3 Atividade.....	76
3.4.4 Ganhos de calor interno pela iluminação e equipamentos	76
3.4.5 Aberturas.....	77
3.4.6 Estratégia de ventilação	77
3.5 Critérios para análises dos resultados.....	78
4 RESULTADOS.....	81
4.1 Simulação CFD	81
4.1.1 Convergência dos modelos.....	81
4.1.2 Análise dos efeitos aerodinâmicos resultantes na edificação.....	81
4.1.3 Coeficientes de pressão	90
4.2 Simulações dos períodos de resfriamento e aquecimento	95
4.2.1 Período de resfriamento	95
4.2.2 Período de aquecimento	103
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
6 CONCLUSÃO	115
REFERÊNCIAS.....	117
ANEXO A – RESULTADOS OBTIDOS PARA O DIA 13 DE DEZ.	125
ANEXO B – RESULTADOS OBTIDOS PARA O DIA 8 DE DEZ.	126
ANEXO C – RESULTADOS OBTIDOS PARA O DIA 3 DE JUN.	127
ANEXO D – RESULTADOS OBTIDOS PARA O DIA 15 DE JUL.	128
ANEXO E – CONVERGÊNCIA DOS MODELOS CFD.....	129

1. INTRODUÇÃO

A demanda mundial de energia vem aumentando rapidamente. Nesse cenário, as edificações colaboram de forma significativa para esse consumo, com destaque para os sistemas de climatização mecânica, como os maiores consumidores de energia dentro das edificações (LEDO; FIORENTINI; DALY, 2020). De acordo com a *International Energy Agency*, o setor de edificações é responsável mundialmente por 40% do uso de energia primária e por 24% das emissões de gases efeito estufa. Só o setor residencial é apontado como responsável pelo consumo de 27% do total de energia mundial (IEA, 2018). O uso de energia e as emissões de gases efeito estufa incluem tanto o uso de combustíveis fósseis *in loco*, quanto o uso indireto de eletricidade, sistemas de aquecimento, resfriamento e energia, incorporados nos materiais de construção. No Brasil, as edificações residenciais consomem 27,6% da energia produzida no país (EPE, 2021).

Em razão disso, há uma crescente preocupação internacional com a sustentabilidade, a qualidade do ar interno e a eficiência energética. Diversas são as estratégias de condicionamento térmico passivo que podem ser utilizadas nas construções, as quais devem atuar em conjunto para um melhor nível de conforto térmico. A ventilação natural é citada por diversos autores como uma das principais estratégias passivas de resfriamento de edificações. A NBR 15220 (ABNT, 2005) indica a ventilação natural como estratégia passiva de resfriamento para o verão na zona bioclimática 3, zona que apresenta altas temperaturas e altos níveis de umidade no verão, na qual se situa a cidade de Porto Alegre/RS.

A ventilação natural, além da sua capacidade de condicionamento passivo, auxilia na qualidade do ar, a qual diminui a probabilidade da transmissão de agentes patógenos a depender das taxas de renovação. O cenário da pandemia de COVID-19, no qual o vírus SARS-CoV-2 comprovou-se altamente transmissível, reforça a necessidade de ventilação natural como ferramenta de renovação do ar aliada ao conforto térmico, em razão da influência que uma pode causar no desempenho da outra. Nos seus canais oficiais, a Organização Mundial da Saúde – OMS (2020) tem recomendado o aumento dos níveis de trocas de ar nos ambientes a partir das aberturas das janelas e, portanto, da ventilação natural, quando possível. Em ambientes projetados, no entanto, levando-se em consideração apenas o

condicionamento passivo para a manutenção do conforto, tal medida torna-se impraticável em certos períodos do ano.

As simulações computacionais são ferramentas frequentemente utilizadas para avaliar o consumo energético e o comportamento térmico das edificações, possibilitando a determinação de estratégias de aperfeiçoamento do conforto térmico, redução do consumo energético, desenvolvimento da eficiência dos sistemas de climatização, otimização dos sistemas da edificação e auxílio na tomada de decisão em projetos (SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2017).

Dessa forma, serão abordados os comportamentos da ventilação natural em uma habitação unifamiliar e no ambiente urbano, bem como os métodos de obtenção de dados mais detalhados de coeficientes de pressão para uma abordagem aprofundada do microclima local nas simulações computacionais. Com isso, esta pesquisa terá por finalidade verificar a influência dos coeficientes de pressão do contexto da edificação, tanto topográfico quanto urbano, na simulação computacional de uma habitação unifamiliar.

1.1 Tema e Delimitação do Tema

Esta dissertação tem como tema a influência dos coeficientes de pressão na ventilação interna de uma habitação unifamiliar. Neste estudo, são abordados, mais especificamente, os comportamentos das movimentações do ar, em diferentes contextos, e como esses cenários distintos impactam na ventilação interna de uma edificação.

A ventilação natural como estratégia passiva de condicionamento será abordada em virtude da relevância de tal estratégia no desempenho das edificações. Os métodos preditivos de conforto térmico são expostos e, dentre eles, abordagem adaptativa é selecionada devido a sua adequabilidade à análise da ventilação natural.

A importância do detalhamento dos coeficientes de pressão, e seus possíveis métodos de obtenção também são temas desta pesquisa. Por fim, este trabalho tratará da temática das simulações computacionais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência dos coeficientes de pressão na ventilação interna de uma habitação unifamiliar, em um contexto criado para a cidade de Porto Alegre – RS.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Analisar os princípios da ventilação natural no meio urbano;
- b) Considerar os critérios e estratégias de ventilação natural em ambientes internos;
- c) Investigar a influência do entorno na simulação energética.

1.3 Justificativa

O cenário de rápido crescimento da demanda energética mundial, no qual as edificações são apontadas como as maiores consumidoras de energia, bem como a crescente preocupação internacional com a sustentabilidade, a qualidade do ar interno e a eficiência energética, traz consigo a necessidade do desenvolvimento de estratégias capazes de mitigar e auxiliar essas demandas. Os projetos de arquitetura adequados aos climas locais e às condições microclimáticas, portanto, são meios interessantes para a busca de um maior conforto térmico e desempenho energético das edificações.

Entre as estratégias de condicionamento passivo de maior destaque para resfriamento no período de verão no clima de Porto Alegre, pode-se citar a ventilação natural (ABNT, 2005). Contudo, muitos projetistas apresentam ressalvas à utilização dessa estratégia em função da baixa estabilidade se comparada à climatização artificial (TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010). Apesar destas ressalvas, a eficiência e o desempenho de uma edificação dependem significativamente da sua capacidade de prover conforto térmico, na qual a ventilação natural é capaz de promover a satisfação térmica do usuário dentro de certos limites.

Assim como a geomorfologia é capaz de influenciar o clima local, a morfologia urbana é capaz de definir regiões microclimáticas ao longo das cidades. A configuração das regiões microclimáticas depende de diversos critérios como disposição espacial, rugosidade, densidade, alturas das edificações e outros. Estes fatores modificam o fluxo do vento ao longo do meio urbano e podem influenciar no conforto térmico (VILLAS BOAS; SANTOS, 2000).

A ventilação natural como estratégia para o resfriamento de edificações pode ocorrer a partir da ventilação por ação dos ventos e por efeito chaminé (FROTA; SCHIFFER, 2003). Como a movimentação do ar flui naturalmente perante diferentes níveis de pressão, para a utilização da ventilação natural como estratégia de projeto, deve-se buscar a integração do projeto com estes diferentes níveis de pressão (ROAF et al, 2014). Dessa forma, tem-se que o desempenho da ventilação natural dependerá do entorno no qual a edificação está inserida e a maneira a qual foi projetada (SAKIYAMA et al., 2020).

Para a realização de análises de conforto térmico e desempenho, conta-se com programas de simulação computacional. Nesse sentido, a introdução do clima local na simulação computacional é realizada a partir da inserção de arquivos climáticos, gerados a partir do registro das variáveis climáticas obtidas em estações meteorológicas. Contudo, essas estações encontram-se em locais específicos e, a aplicação sem critério destes arquivos, tende a ignorar as alterações do microclima dentro do mesmo espaço geográfico e das variações da estrutura urbana do sítio no qual a edificação está inserida (CHARISI; WASZCZUK; THIIS, 2017). Como alternativa de melhor introdução do microclima local, é sugerido o uso de coeficientes de pressão mais detalhados (CHARISI; WASZCZUK; THIIS, 2017).

Esses dados são importantes parâmetros para a análise da ventilação natural pela ação dos ventos, haja vista que são dados de entrada de grande parte dos programas de simulação de desempenho térmico de edifícios e do cálculo de vazão do ar (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Os coeficientes de pressão utilizados nas simulações energéticas normalmente são simplificados ou tabelados, a partir de normativas ou banco de dados, de contextos edificadas pré-determinados (CHARISI; WASZCZUK; THIIS, 2017), no qual acabam por desconsiderar o real contexto em que a edificação está inserida. A partir desses coeficientes de pressão, tem-se a possibilidade de estimar o potencial das vazões internas entre fachadas de edificações (LIMA; BITTENCOURT, 2017).

Dessa forma, neste estudo, aplica-se um método comparativo, no qual investiga-se a influência dos coeficientes de pressão na ventilação natural de uma habitação unifamiliar. A partir da simulação CFD foram obtidos coeficientes de pressão detalhados para um contexto específico hipotético para a cidade de Porto Alegre - RS. Em seguida, tais valores são comparados aos valores oriundos do banco de dados AIVC. Por último, foi realizada a simulação energética dos dois modelos com vistas a se obter um melhor entendimento do impacto do uso desses coeficientes de pressão mais detalhados na ventilação natural e por consequência a influência do entorno na simulação energética.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

São estratégias de condicionamento térmico passivo aquelas capazes de favorecer o condicionamento térmico a partir da melhor integração do clima local com os elementos arquitetônicos que compõem uma edificação, sem utilizar-se de equipamentos mecânicos. Dessa forma, a normativa brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005) dispõe sobre o zoneamento bioclimático nacional e sobre as estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações unifamiliares de interesse social para as oito zonas bioclimáticas. A partir de uma análise dos dados climáticos em conjunto a uma adaptação da carta bioclimática de Givoni, foram estabelecidas as estratégias de condicionamento térmico passivo, conforme a posição dos dados na carta.

As estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 3, a qual pertence a cidade de Porto Alegre, são: ventilação cruzada, aquecimento solar da edificação e inércia térmica. A normativa também apresenta recomendações referentes às aberturas, as quais devem ser sombreadas no verão, permitir a entrada de sol durante o inverno e possuírem dimensões médias, com área que corresponde entre 15 e 25% do piso. Quanto à envoltória, as recomendações são que as paredes sejam leves e refletoras, e a cobertura, leve e isolada. Tendo em vista que a temática deste trabalho está relacionada a ventilação natural, este tema será aprofundado na sequência.

2.1 Ventilação

2.1.1 Ventilação no meio urbano

O principal determinante na movimentação dos ventos, a nível global, é a variação das pressões atmosféricas causadas pelas diferenças de temperatura, o aquecimento e o esfriamento das terras e dos mares, e o movimento de rotação da terra (FROTA; SCHIFFER, 2003). As variações globais de temperatura provocam a movimentação das massas de ar que, por consequência do movimento de rotação da terra, geram forças desviadoras que alteram a direção dessas massas.

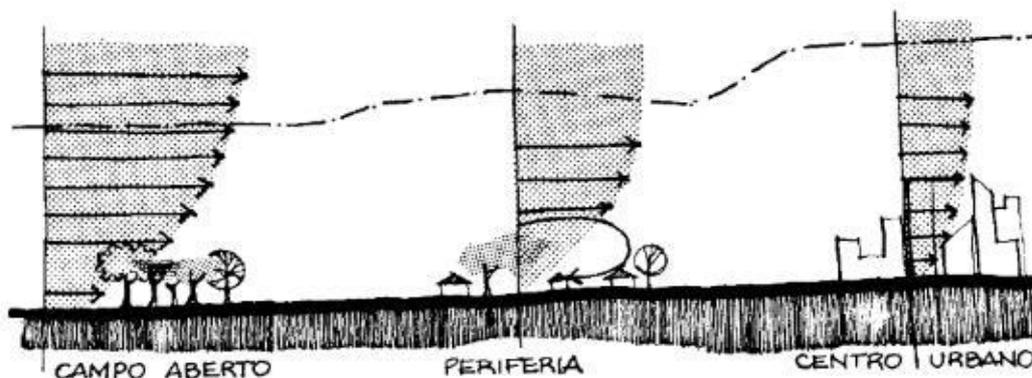
Em suma, Brown et al. (2004) explicam três princípios que devem ser analisados no que diz respeito ao movimento do ar para um local específico. A

velocidade do vento normalmente será menor quanto mais próximo ao solo, se comparada às partes mais distantes. Devido à inércia, o ar tenderá a se movimentar no mesmo sentido e, ao encontrar um obstáculo, tentará a fluir ao redor desse. Por último, o ar fluirá de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão, por exemplo, o ar, ao ser aquecido, diminui sua pressão e tende a subir, fazendo com que o ar de menor pressão, conseqüentemente de menor temperatura, flua nessa direção.

A morfologia urbana pode definir diversos microclimas dentro das cidades, em função de diversos atributos como conformação espacial, rugosidade, porosidade, densidade de construção, altura e dimensões do edifício, uso do solo, orientação do sol e do vento, permeabilidade do solo, propriedades termodinâmicas dos materiais de construção e a vegetação (VILLAS BOAS; SANTOS, 2000). Portanto, a nível local, o movimento do ar é influenciado por diversos fatores, tais como: a topografia, que desvia, altera ou canaliza o movimento do ar; as diferenças de temperatura causadas por tipos distintos de pavimentos e cobertura do solo, da vegetação e, quando no meio urbano, as diferenças de adensamento, alturas, pavimentos e disposições das edificações. Esses elementos influenciam nas características locais do vento, tais como diferenças de velocidade e de pressão. Dessa forma, as cidades demonstram comportamentos complexos em relação ao vento (MASCARÓ; MASCARÓ, 2020).

A rugosidade é definida por características da geometria e da textura de superfície que definem maior aspereza ao ambiente urbano, estando, desse modo, diretamente ligada com a área de bloqueio ocasionada por obstáculos (COSTA FILHO, 2017). Costa Filho (2017) explana que a rugosidade tem vínculo com a fricção do vento nas diversificadas tipologias superficiais urbanas e que interfere diretamente na velocidade da ventilação, alterando o seu perfil, sua intensidade de velocidade e a escala das turbulências. Assim, afeta o arrasto superficial do vento.

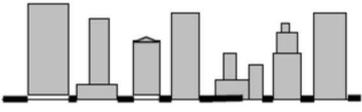
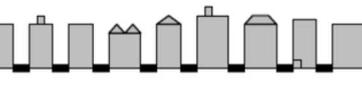
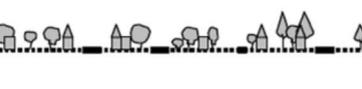
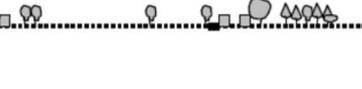
Figura 1 - Definição da camada limite



Fonte: Romero (2013)

O vento sofre uma redução em sua velocidade em decorrência do atrito com o solo nas camadas mais baixas da atmosfera: quanto maior a rugosidade do solo e, portanto, maior o atrito, menor será a velocidade do ar próximo à superfície (VILLAS BOAS, 1983 apud ROMERO 2013). Assim, a velocidade do movimento do ar será superior quanto maior a altura e a diminuição da perturbação do movimento desse. Em tal fenômeno, denominado de camada limite da atmosfera, a altura da camada ficará sujeita à rugosidade do solo e onde as velocidades do ar serão relativamente constantes (ROMERO, 2013). A altura da camada limite é aproximadamente equivalente à altura média dos principais elementos de rugosidade, como edifícios e árvores (OKE, 2004).

Tabela 1 - Classificação simplificada de distintas formas urbanas em ordem decrescente aproximada de sua capacidade de influência no clima local

Zona Climática Urbana	Imagem	Classe de Rugosidade	Razão	% área construída (impermeável)
1. Centro urbano intensamente desenvolvido com edificações próximas umas das outras e edifícios em alturas com revestimentos Ex.: Edificações áreas centrais urbanas		8	>2	>90
2. Centro urbano desenvolvido de alta densidade com edificações de 2 à 5 andares, próximas ou muito próximas revestidas com tijolos ou pedras. Ex.: Centros históricos		7	1,0 - 2,5	>85
3. Altamente desenvolvido, média densidade urbana edificações próximas Ex.: Casas, lojas e blocos de apartamentos.		7	0,5 - 1,5	70 - 85
4. Altamente desenvolvido, com baixa ou média densidade com grandes edificações de baixa altura e estacionamentos pavimentados. Ex.: Shoppings e pavilhões		5	0,05 - 0,2	70 - 95
5. Desenvolvimento médio, subúrbio, de baixa densidade com edificações de 1 a 2 pavimentos. Ex.: Casas, sobrados.		6	0,2 - 0,6 até > 1 com árvores	35 - 65
6. Grandes edificações de uso misto em campo aberto Ex.: Instituições como universidades, hospitais e aeroportos.		5	0,1 - 0,5, dependendo da vegetação	<40
7. Área semi-rural, com habitações espalhadas em áreas naturais ou rurais Ex.: Fazendas, Sítios		4	0,05, dependendo da vegetação	<10

Legenda:  Edificação  Vegetação  Solo impermeável  Solo permeável

Fonte: Adaptado de Oke (2004)

Figura 2- Porosidade de afastamento entre os edifícios



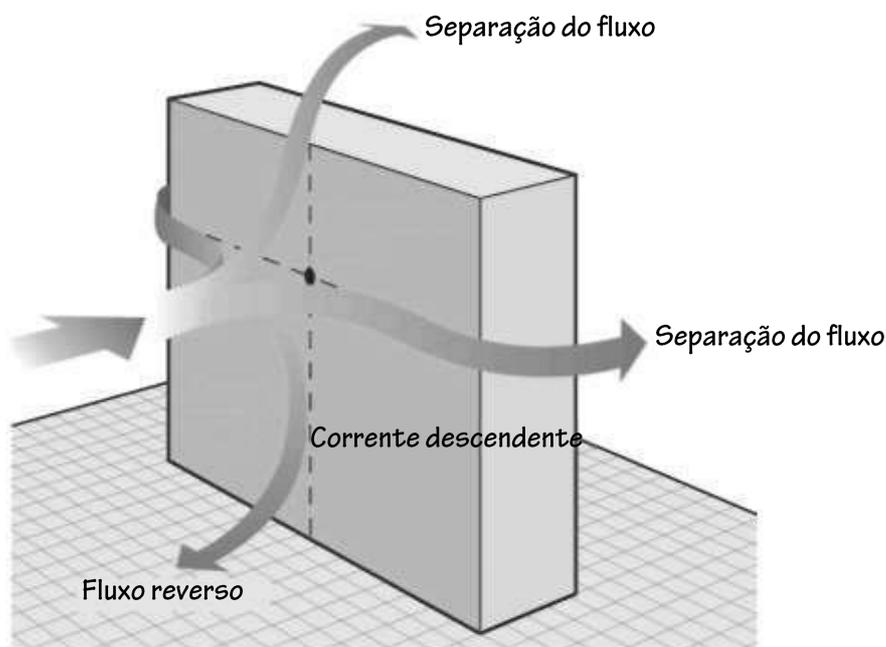
Fonte: Costa Filho (2017)

O escoamento do vento, dentro das cidades, é influenciado pela permeabilidade do tecido urbano, também denominada de porosidade (OLIVEIRA, 1983 apud COSTA FILHO 2017). Para Souza (2006), um meio urbano pouco poroso, ou seja, com edificações muito próximas umas das outras ou até mesmo “coladas”, forma um meio opaco, com pouca ou nenhuma penetração do vento. Já um meio urbano de maior porosidade, com edificações mais afastadas umas das outras, apresenta um desempenho melhor, pois há mais trocas térmicas, renovações do ar e possibilidades de ventilação cruzada no interior das edificações (SOUZA, 2006). A porosidade, se considerada como um atributo único, gera uma série de padrões de escoamento ao redor e através dos elementos construídos (VILLAS BOAS; SANTOS, 2000). Dessa forma, a rugosidade e a porosidade são parâmetros importantes para a qualidade da ventilação no meio urbano.

A forma como o ar flui ao redor das edificações, no meio urbano, é de vital importância para o entendimento do desempenho da ventilação natural em uma edificação. O fluxo de ar, ao entrar em contato com uma edificação, gera diversos efeitos aerodinâmicos. Escoamentos que ocorrem ao nível do solo resultam da reação complexa entre o vento e as massas estruturais. O efeito das estruturas nos escoamentos do vento depende de sua forma, tamanho e justaposição, estabelecendo a distribuição de diferentes zonas de pressão ao redor dos obstáculos (GANDEMER, 1976). Salienta-se ainda que, quanto maior a dimensão dos obstáculos

em relação à escala do vento, maior será sua influência no escoamento do vento (GANDEMER, 1976).

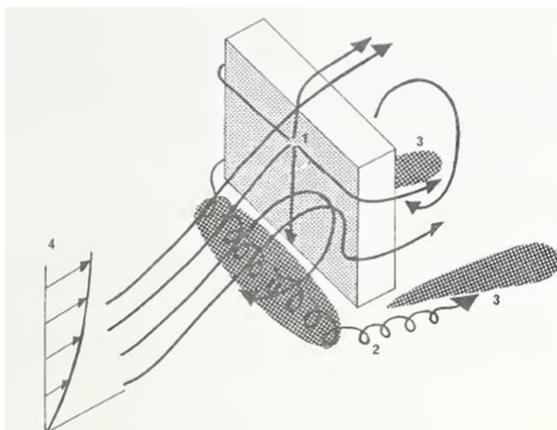
Figura 3 - Padrão do fluxo de ar ao redor de uma edificação



Fonte: Adaptado de Erell et al. (2011)

Na análise da Figura 3, é possível observar que, quando o vento incide em uma edificação, ele é defletido para o topo, para as laterais e para baixo (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011). Na face atingida diretamente pelo fluxo, cria-se uma zona de alta pressão, próxima ao centro médio superior, onde o vento é barrado, e dissolve-se para as laterais e para o topo do volume. O fluxo reverso, que se vê ocorrer a partir do ponto de separação da Figura 3, denomina-se deflexão vertical (LOREDO-SOUZA et al, 2004). Este, flui para baixo e ao encontrar-se com um solo cria um vórtice (GANDEMER, 1976). Isso ocorre principalmente, em edificações altas e gera um aumento de velocidade nas áreas próximas ao solo. Devido a este fenômeno, há aumento de pressão de sucção nas edificações de menor altura presentes no contexto (LOREDO-SOUZA et al, 2004).

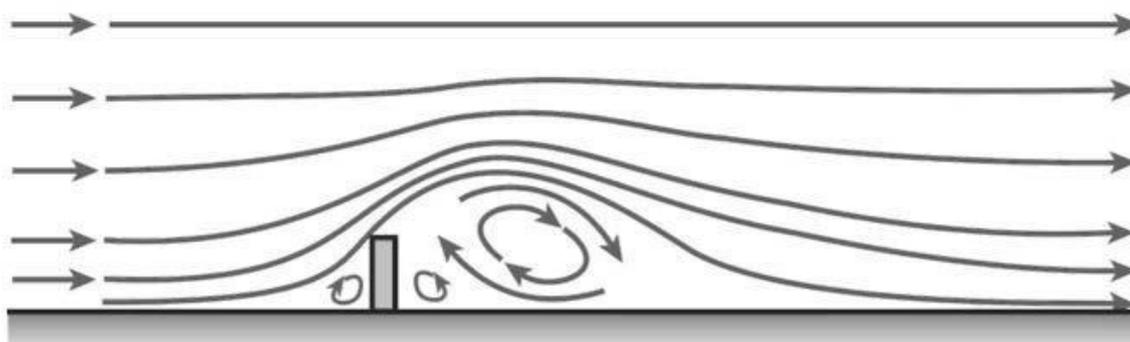
Figura 4 – Padrões de escoamento ao redor de uma edificação



Fonte: Gandemer (1976)

Quando as laterais, bem como o topo do volume, não possuem formas aerodinâmicas, o fluxo acelerado se descola da superfície, que, por consequência, causa um fenômeno de sucção nas laterais, no topo e na face, a sotavento do volume (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011). Dessa maneira, como o ar tende a se movimentar de alta para baixa pressão ocorrem vórtices nestas zonas, como é possível observar na Figura 5. Da mesma forma, a justaposição de volumes de ar à diferentes pressões devido à pilotis ou em esquinas induz fluxos rápidos, associados muitas vezes, à vórtices violentos (GANDEMER, 1976).

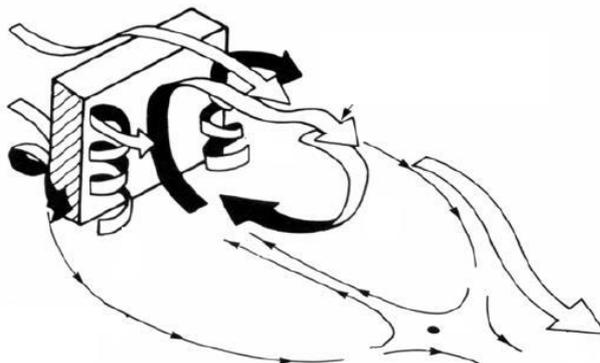
Figura 5 - Efeitos aerodinâmicos em edificação isolada



Fonte: Erell et al. (2011)

A região a sotavento de uma edificação pode ser denominada de região de esteira. Esta região possui um escoamento muitíssimo turbulento e influencia diretamente o escoamento do vento de edificações ali postadas (CARPEGIANNI, 2004). Ainda nesta região, poderá haver a ocorrência de efeitos dinâmicos, chamados de “efeitos de golpe”, e variações de pressões.

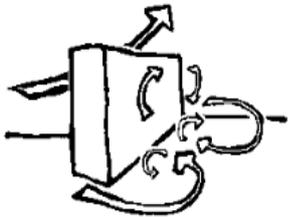
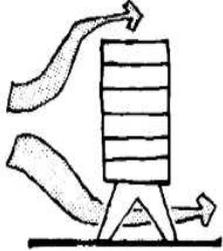
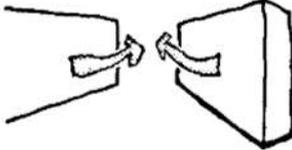
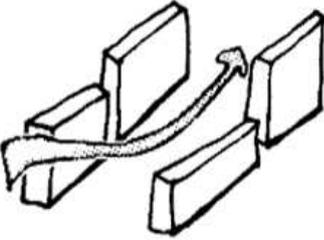
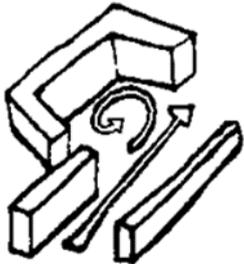
Figura 6 – Características da esteira



Fonte: Carpegianni (2004)

A suspensão de uma edificação sobre pilotis, evita a ocorrência do efeito esteira, resultando no efeito pilotis. Tal efeito se caracteriza pela movimentação do ar sob a edificação de forma difusa e com saída a jato (ROMERO, 2013). Na associação de conjunto de edificações, os fluxos de ar podem assumir diferentes movimentações e características, tais como o efeito venturi e o efeito canalização. O efeito venturi caracteriza-se por uma aceleração do fluido a partir do afinilamento da área ocasionado por um grupo de edificações (ROMERO, 2013). Já o efeito canalização, segundo Romero, caracteriza-se pelo escoamento do fluido por um grupo de edificações que formam um corredor a céu aberto.

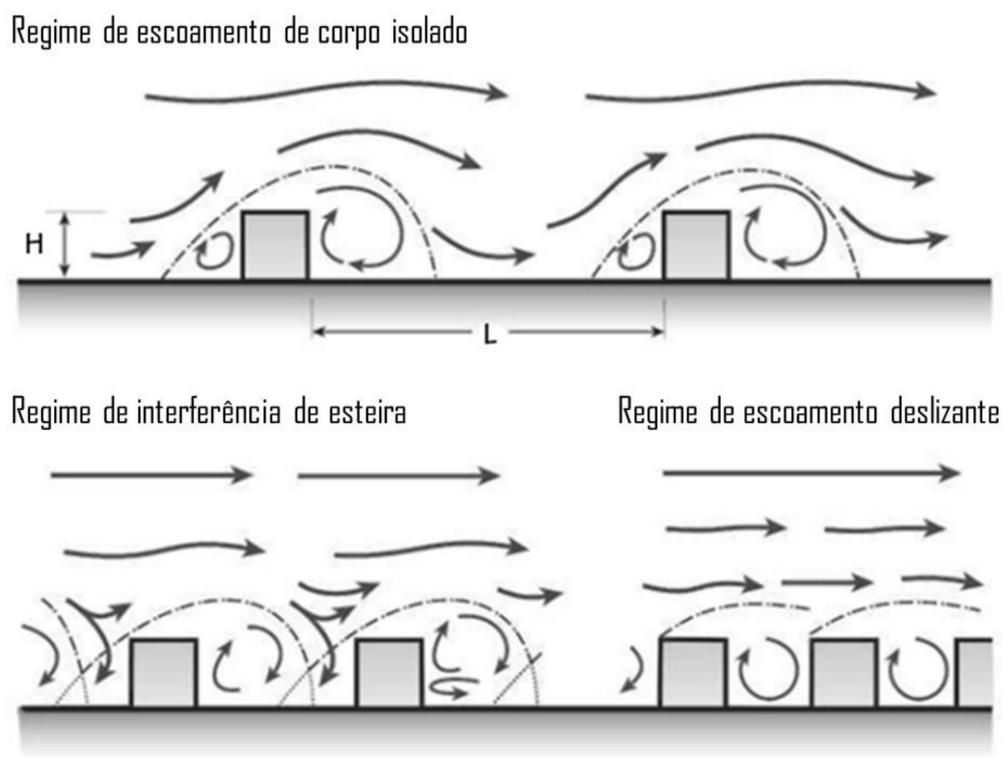
Tabela 2 - Efeitos aerodinâmicos

Efeito Esteira	Efeito Redemoinho	Efeito Pilotis
		
Efeito Venturi	Efeito Canalização	Efeito Malha
		

Fonte: Adaptado de Gardemer apud Romero (2013) e Souza (2006)

Segundo Erell *et al.* (2011), em uma disposição urbana onde há canais formados pelas ruas e um vento perpendicular a estes, três diferentes regimes de vento ocorrem: o regime de escoamento de corpo isolado, regime de interferência de esteira e o regime de escoamento deslizante, visualizados na Figura 7. O primeiro é caracterizado por agir de maneira isolada, onde a maior parte dos efeitos aerodinâmicos ocorrem ao redor da edificação, com pouco interferência do contexto. No regime de interferência de esteira ocorre uma perturbação do efeito esteira, à sotavento da edificação, perturbado por uma corrente descendente em direção contrária. Isso ocorre devido à falta de espaço suficiente para a formação completa da esteira (LOREDO-SOUZA *et. al.*, 2004). Esses ocorrem quando a razão entre o espaçamento e a altura da edificação for entre $0,5 < H/L < 0,65$. O regime de escoamento deslizante é ocasionado pela distribuição de edificações muito próximas umas das outras, causando uma barreira sequencial dos ventos. Para uma razão de espaçamento e altura maior que 0,65, o movimento do ar assume um regime estável de vórtice circular no espaço entre as edificações. Assim, há um efeito de proteção grande, pois as forças exercidas nos edifícios são muito pequenas individualmente, pois eles encontram-se dentro da esteira do primeiro (LOREDO-SOUZA *et. al.*, 2004).

Figura 7 – Regimes de fluxo de vento em diferentes disposições urbanas



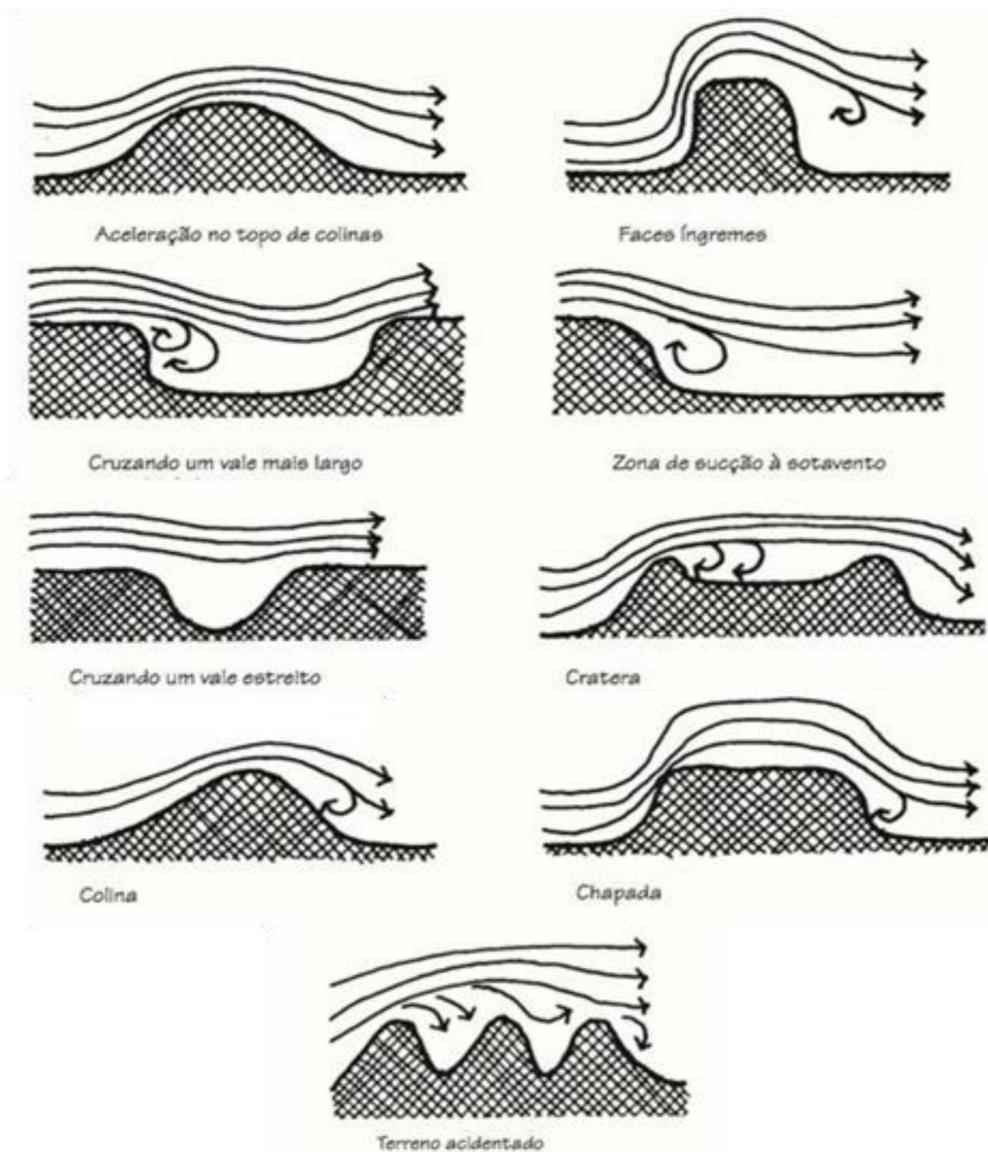
Fonte: adaptado de Erell et al. (2011)

Tais efeitos aerodinâmicos exercem influência no comportamento da ventilação natural das edificações e no meio urbano. Um exemplo disso é quando uma edificação localizada em uma zona de baixa pressão, ocasionada por outra edificação, terá, por consequência, a velocidade do vento e as pressões nas fachadas diminuídas, prejudicando a ventilação cruzada e dificultando o conforto térmico (SOUZA, 2006). Outro exemplo é o aumento da velocidade na separação dos fluxos do ar, ao redor de uma edificação, o qual pode causar zonas de velocidades desconfortáveis para pedestres próximos às arestas da edificação (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011). Há maneiras fazer uso desses efeitos como estratégia de planejamento de conforto ambiental urbano, como o efeito canalização. A criação de corredores de vento, ou de corredores de ventilação urbana, é uma das estratégias que têm sido amplamente recomendadas nos planejamentos urbanísticos das cidades chinesas para a manutenção do conforto no ambiente urbano (REN et al., 2018).

O comportamento do vento, perante as diferenças de topografia, é similar às edificações. Brown e Dekay (2004) apresentam alguns exemplos dessa movimentação no Figura 8. De forma semelhante às edificações, o vento, ao percorrer

um cânion, paralelamente a esse, terá sua velocidade aumentada. Já ao atravessar perpendicularmente um acidente geográfico, será registrada maior turbulência e menor velocidade a sotavento.

Figura 8 - Efeitos aerodinâmicos em diferentes contextos topográficos



Fonte: Adaptado de Brown e Dekay (2004)

A vegetação também é capaz de influenciar na ventilação. O desempenho da ventilação no meio urbano, com a influência da vegetação, depende, no entanto, da permeabilidade, da orientação em relação aos ventos, da densidade e do gabarito das edificações do meio urbano (MASCARÓ; MASCARÓ, 2002). Os fenômenos aerodinâmicos também são similares quando os ventos são levados em consideração.

Segundo Mascaró e Mascaró (2002), a vegetação é capaz de canalizar, defletir, obstruir e filtrar o vento. Esses fenômenos são bastante complexos, devido a suas variáveis que dependem inclusive dos tamanhos e das alturas de copas, assim como da permeabilidade da vegetação. Todavia, de acordo com Mascaró e Mascaró (2002), barreiras de vegetação podem ser até mais eficientes do que barreiras sólidas devido à redução gradual da velocidade, evitando, assim, zonas de turbulência.

Segundo Romero (2013), as alterações provocadas pela urbanização, como o aumento da capacidade térmica, a rugosidade, a impermeabilização do solo, juntamente com o fluxo material de energia, produzem um balanço térmico conhecido como domo urbano. Esse fenômeno, também denominado de ilha de calor, devido ao aquecimento urbano, provoca uma ventilação própria que pode alterar a movimentação de ar regional.

2.1.2 Ventilação natural em ambientes internos

A ventilação nas edificações pode ser classificada como artificial ou natural. A ventilação natural é o deslocamento de ar pela edificação através de aberturas ou janelas, as quais funcionam como vias de entrada e saída de ar externo (FROTA et al. 2003), e ocorre em função de forças naturais/climáticas. Já a ventilação artificial é mecânica e demanda consumo de energia para seu funcionamento. A ventilação artificial é utilizada quando a ventilação natural torna-se incapaz de prover conforto, quando o ambiente exigir demandas especiais ou então quando for necessário um maior controle da umidade relativa e da temperatura do ar do ambiente (MONTERO, 2006).

A ventilação natural nas edificações assume três funções principais. A função higiênica é vital para a dissipação de poluentes, vapores, organismos e poeiras (FROTA et al., 2003). A ventilação natural também auxilia na qualidade do ar haja vista que diminui a probabilidade da transmissão de agentes patógenos (HOBDA; DANCER, 2013 apud MORAIS et al., 2017), dependendo das taxas de renovação. No contexto da pandemia do COVID-19, a alta transmissibilidade do vírus SARS-CoV-2 reforça a necessidade do uso da ventilação natural como ferramenta de renovação do ar aliada ao conforto térmico, pela influência que uma estratégia causa no desempenho da outra. Nos seus canais oficiais, a Organização Mundial da Saúde - OMS (2020) tem recomendado aumento dos níveis de trocas de ar nos ambientes por

meio da ventilação natural sempre que possível. Para ambientes que são projetados levando-se em conta somente o condicionamento ativo para a manutenção do conforto, tal medida torna-se difícil de ser praticada, principalmente em certos períodos do ano. Dai e Zhao (2020) indicam que para que a probabilidade de contaminação por COVID-19 seja menor que 1%, as taxas de ventilação dos ambientes devem ser entre 1200 e 4000 m³/h por pessoa infectada no recinto. Caso os usuários presentes no recinto estejam utilizando máscaras, as taxas caem drasticamente de 300 a 1000 m³/h por pessoa infectada.

Outra função é a de resfriamento da edificação, que consiste na dissipação do calor acumulado nos ambientes, causado pela radiação solar, pelos ganhos internos com equipamentos, pela ocupação por pessoas e pela iluminação artificial (LÔBO; BITTENCOURT, 2003). No entanto, é necessário atentar para os ganhos de calor com a ventilação natural quando a temperatura externa for maior do que a interna.

Por último, há o resfriamento fisiológico, caracterizado pela evaporação do suor e pelas trocas de calor por convecção quando os fluxos de ar estão em contato com o corpo (LÔBO; BITTENCOURT, 2003). O resfriamento fisiológico ocorre quando o ar ao redor do indivíduo apresenta temperatura inferior ao da pele. Assim, o calor é carregado para fora do corpo. Esse processo torna-se mais eficiente à medida que a velocidade do vento aumenta. (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006). Destaca-se que o resfriamento fisiológico é de extrema importância para climas quentes e úmidos visto que o suor é um grande causador de desconforto (LÔBO; BITTENCOURT, 2003). Quando a temperatura das superfícies opacas que compõem o ambiente é inferior à da pele, há uma perda de calor por radiação. Para tanto, a ventilação pode contribuir para a redução da temperatura das superfícies opacas internas da edificação (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006).

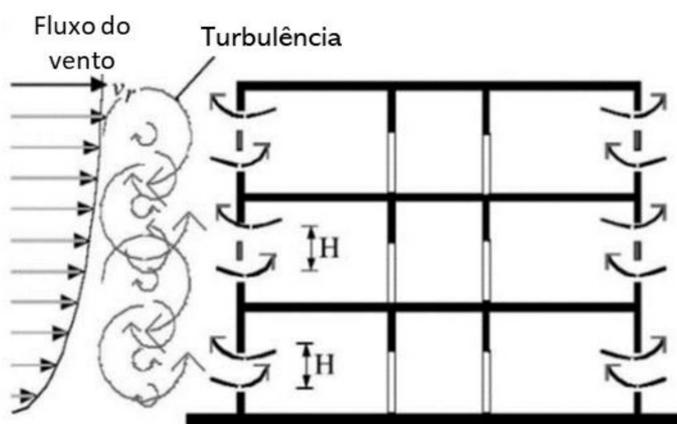
A movimentação do ar ocorre normalmente perante diferentes níveis de pressão, sendo que, ao utilizar a ventilação como estratégia de projeto, deve-se favorecer a ocorrência dessas (ROAF et al, 2014). Segundo Frota e Schiffer (2003), a ventilação natural para resfriamento de edificações ocorre a partir da ventilação por ação dos ventos e por efeito chaminé, os quais podem ocorrer simultaneamente.

A ventilação por ação dos ventos pode ser verificada de duas maneiras. A primeira delas se dá quando a pressão positiva ocorre a barlavento da edificação, ou seja, na face da edificação que sofre o primeiro contato do vento. Já na segunda maneira, a pressão negativa, que ocorre a sotavento da edificação, na face protegida

dos ventos, resulta em um fenômeno de sucção que puxa o ar para fora da edificação (ROAF, SUE; FUENTES, M; THOMAS, 2014). Tal fenômeno pode ser denominado de ventilação cruzada. Para Brown e DeKay (2004, p. 205), a ventilação cruzada mais eficaz ocorre quando “as entradas-de-ar são localizadas na área de alta pressão e as saídas-de-ar, na área de sucção”. A forma como essas pressões se distribuem depende da direção dos ventos (FROTA; SCHIFFER, 2003). Destaca-se que, não havendo variação maior do que 40° em relação aos ventos predominantes, não há significativa queda na qualidade da ventilação (BROWN; DEKAY, 2004).

A ventilação natural unilateral induzida pela pressão dos ventos é outro mecanismo ocasionado pela ação dos ventos. As movimentações de ar sofrem ações do vento e da flutuabilidade, ou seja, diferenças de temperatura e pressão no fluido. As variações desencadeadas por esses fenômenos provocam um efeito de bombeamento nas fachadas dos prédios já que, quando a temperatura interna é superior à temperatura externa, a flutuabilidade faz com que o ar frio externo entre pela parte mais baixa e expulse o ar quente pela parte mais alta de uma abertura (GHIAUS; ALLARD, 2006). Tal fenômeno pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Ventilação unilateral por ação dos ventos

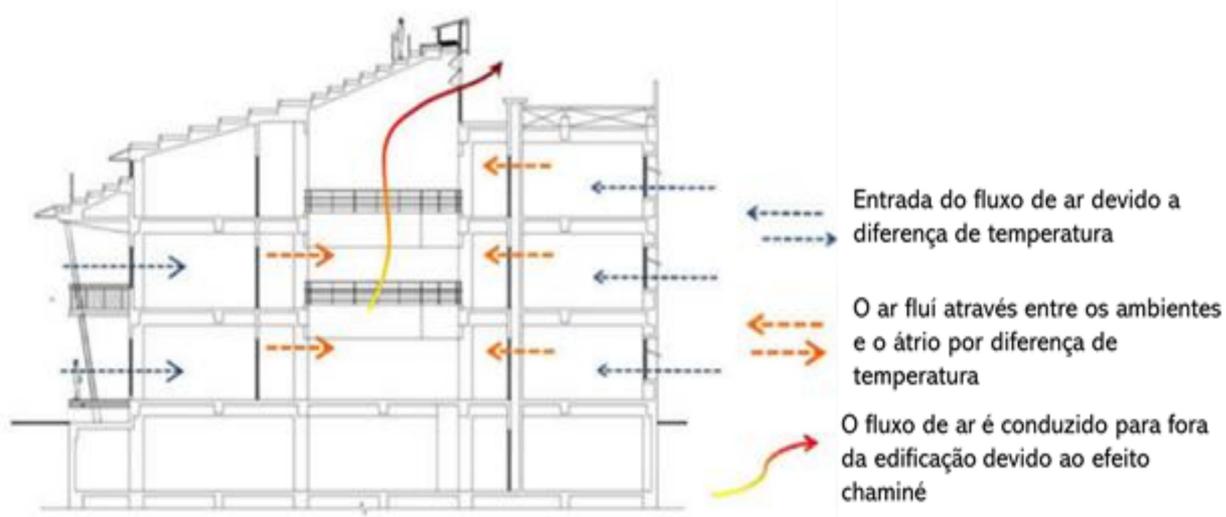


Fonte: Ghiaus e Allard (2006)

Outro mecanismo usado para ventilar edificações é o efeito chaminé. Segundo Roaf et al. (2014), esse fenômeno acontece a partir da diferença de pressão e temperatura do ar no interior da edificação. O ar quente, por ser menos denso, tende a ascender, enquanto o ar frio, mais denso, tende a baixar. Essa estratégia, segundo Frota e Schiffer (2003), é utilizada com a inserção de janelas contíguas ao piso e ao

teto, fazendo com que o ar da edificação, mais quente do que o externo, deixe o seu interior.

Figura 10 - Fluxo do ar devido a diferenças de pressão e temperatura



Fonte: Liu; Lin e Chou (2009)

Destaca-se que a eficiência dessa técnica depende da localização das janelas, pois quanto maior a diferença de altura entre as aberturas altas e baixas, melhor o desempenho do efeito (BROWN; DEKAY, 2004). A vantagem dessa estratégia é a independência da orientação e da ocorrência dos ventos (BROWN; DEKAY, 2004). Durante os períodos quentes, a eficiência da ventilação por efeito chaminé pode ser inferior, devido a menor diferença de temperatura entre o ambiente interno e o externo, permitindo, assim, uma influência significativamente maior da ventilação por ação dos ventos (GHIAUS; ALLARD, 2006). Ghiaus e Allard (2006) salientam, ainda, que, para edificações com uma diferença entre aberturas de 10 m de altura, a diferença de temperatura deve ser de aproximadamente 23° C para que se alcance maior eficiência do efeito chaminé. Já para alturas de aproximadamente oito andares, uma temperatura de 10° C tende a favorecer o efeito.

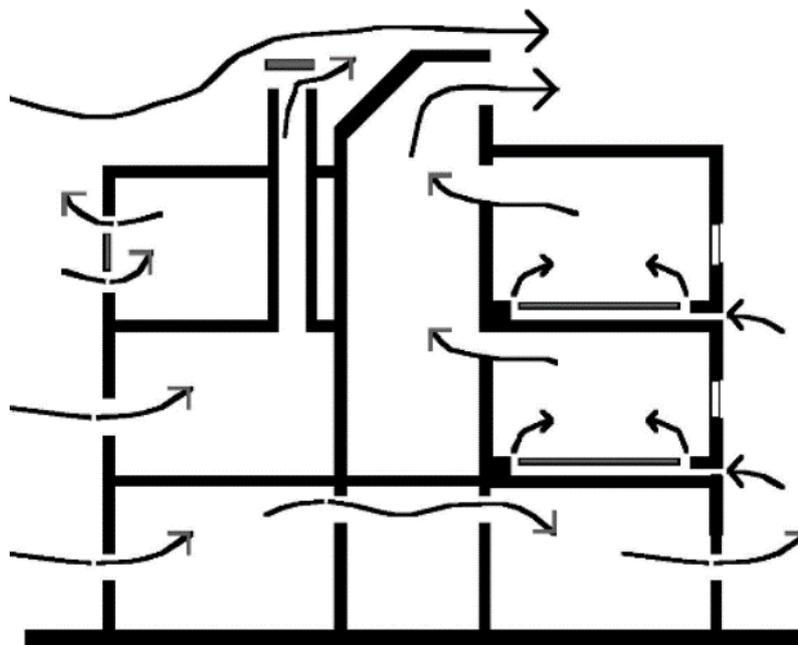
Figura 11 - Ventilação por efeito chaminé



Fonte: Yang e Clements-Croome (2012)

Há ainda sistemas de ventilação natural por efeito chaminé com auxílio de aquecimento solar. Nesses sistemas, os dutos de ventilação são aquecidos a partir do calor da radiação solar, causando uma diferença de temperatura maior do que as dos sistemas por efeito chaminé normais (GHIAUS; ALLARD, 2006). Dessa forma, é comum a integração de todos esses mecanismos de ventilação natural, de maneira concorrente, sobrepondo, no entanto, as limitações de um único mecanismo, que dependendo da situação é incapaz de atender às demandas, como demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - Diversos mecanismos de ventilação natural ocorrendo em uma única edificação



Fonte: Ghiaus e Allard (2006)

O período em que a ventilação natural ocorre em uma edificação também apresenta variações no desempenho. Ledo et al. (2020), ao analisarem estudos de outros autores, destacam que a ventilação noturna, auxiliada com outras medidas passivas para resfriamento, pode diminuir a demanda de resfriamento de edificações climatizadas mecanicamente. A ventilação noturna pode ser bastante efetiva, pois, ao se introduzir o ar fresco noturno, se expulsa o calor acumulado durante o dia, resfriando, conseqüentemente, o ambiente e suas superfícies (LECHNER 2015). Da mesma forma, a ventilação durante um período muito quente do dia, em que a temperatura externa está muito alta, pode gerar ganhos térmicos significativos, indicando uma vantagem na manutenção das aberturas fechadas.

A velocidade do vento é um fator de extrema importância na ventilação natural. Apesar de algumas normativas recomendarem uma velocidade do ar não superior a 0,2 m/s, algumas descobertas recentes demonstram que os usuários tendem a preferir velocidades superiores (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006). Segundo Olgay (2015), ventos acima de 1 m/s no interior das edificações (200 fpm) podem acarretar desconforto em situações de trabalho, necessitando de cuidados para solucioná-lo. Nesse sentido, Brown e DeKay (2004) enfatizam que a utilização de grandes

aberturas aumenta a vazão do vento e, por consequência, é capaz de reduzir a velocidade do ar, como relatado em edificações do clima caribenho.

Tabela 3 - Escala de Beaufort

Beaufort Número	Descrição do Vento	Velocidade (m/seg)	Descrição dos Efeitos dos Ventos
0	Calmo	Menor que 0,4	Vento não perceptível
1	Vento leve	0,4 a 1,5	Vento não perceptível
2	Brisa leve	1,6 a 3,3	Vento sentido no rosto
3	Brisa suave	3,4 a 5,4	Vento que levemente mexe a bandeira. Cabelos levemente desarrumados. Roupas balançando
4	Brisa moderada	5,5 a 7,9	Vento levantando poeira. Solo seco. Papéis voando. Cabelos desordenados.
5	Brisa fresca	8,0 a 10,7	Vento sentido com força no corpo. Nevasca. Limite do vento agradável ao nível do solo
6	Brisa forte	10,8 a 13,8	Uso de sombrinha com dificuldade. Cabelos muito desordenados. Dificuldade para caminhar erguido. Vento que produz ruído desagradável ao ouvido. Vento com neve na altura da cabeça.
7	Ventania moderada	13,9 a 17,1	Dificuldade para caminhar.
8	Ventania fresca	17,2 a 20,7	Geralmente impede o avançar. Equilíbrio difícil quando o vento vem por rajadas.
9	Ventania forte	20,8 a 24,4	As rajadas golpeiam as pessoas.

Fonte: adaptado de Mascaró (2020) apud Penwarden (1975)

A velocidade média do ar interno de um ambiente pode ser estimada a partir da Equação 1 (DOGAN; KASTNER, 2019). Entretanto, a obtenção do dado a partir desta equação é uma simplificação, não apresentando dados exatos de diferenças de velocidade dentro do ambiente onde o fluxo de ar passa, e sim uma estimativa. Para a determinação da área de seção cruzada da zona, o autor esclarece que pode ser obtida a direção de fluxo predominante identifica-se as janelas com normais opostas em uma zona. Esta direção é então usada para cruzar a geometria da zona com um plano perpendicular à direção do fluxo. O polígono resultante fornece a área da seção transversal do ambiente.

$$V_{\text{air, h}} = \frac{ACH_h \times \text{vol}_{\text{zone}}}{A_{\text{zone, Inflow}} \times 3.600} \quad (1)$$

Sendo:

ACH_h = Trocas de ar por hora

vol_{zone} = Volume da zona

$A_{\text{zone, Inflow}}$ = Área de seção transversal da zona

2.1.3 Ventilação Híbrida ou de Modo Misto

Edificações climatizadas apenas naturalmente, sem a utilização, portanto, de sistemas mecânicos, por dependerem do clima, dificilmente atenderão aos níveis de conforto térmico durante todo o tempo. Dessa forma, edificações que utilizam a ventilação híbrida surgem como opção, visto que fazem uso da ventilação natural e de sistemas mecânicos para resfriamento dos ambientes. Assim, sistemas mecânicos são utilizados com vistas a garantir que as condições de conforto sejam mantidas e, ao mesmo tempo, a explorar o potencial de resfriamento fornecido pelo clima. Pelo fato de utilizar também a ventilação natural, e não somente sistemas mecânicos, a ventilação híbrida se mostra efetiva na diminuição do consumo de energia (ENGEL; ROAF, 2019).

Os sistemas de ventilação híbrida podem ser *low-tech*, como janelas ou linhas de ventilação operadas manualmente, as quais não precisam de um sistema central de automação e dependem da atuação do usuário, ou podem ser *high-tech*, quando é necessário um sistema mecânico e eletrônico de controle. Exemplos de sistema de ventilação híbrida *high-tech* são as válvulas motorizadas para monitorar a corrente de ar nas entradas, os sistemas mecânicos que são automaticamente desativados quando os níveis de CO₂ estão no nível desejado e os sistemas que podem se sobrepor ao controle manual dos usuários de acordo com as condições climáticas externas e condições de conforto interna (ENGEL; ROAF, 2019).

Ainda assim, deve-se distinguir edificações que possuem uma ventilação natural direta, por meio de aberturas na fachada como janelas, daquelas que utilizam a ventilação por dutos (ENGEL; ROAF, 2019). No primeiro caso, há uma maior

conexão com o clima externo, e o resfriamento por movimento do ar é possível de ser executado. Já no segundo, há a possibilidade de pré-aquecimento do ar dentro dos dutos e a utilização de sistemas de recuperação de calor, como os sistemas de ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR).

O sistema de ventilação híbrida é extremamente adequado para a região sul do Brasil, pois, em trabalho de revisão de estudos acerca desse tipo de ventilação, Ledo et al.(2020) defendem que o clima mais adequado para edificações de ventilação híbrida é o clima subtropical úmido (Cfa), no qual se verificou redução máxima de 35% na demanda de resfriamento. Contudo, existe uma problemática na aplicação de métodos preditivos de conforto ao avaliar uma edificação de ventilação híbrida.

O método adaptativo, segundo a ASHRAE 55 (2017), é utilizado exclusivamente em edificações naturalmente ventiladas. O método analítico da ASHRAE 55 (2017), por sua vez, é utilizado somente em edificações climatizadas mecanicamente, sendo que, em edificações de ventilação híbrida, esse último método não é apropriado. O que se tem feito, nesses casos, são abordagens adaptadas, embasadas no método adaptativo, porém sem nenhuma instrução de normativas, (LEDO; FIORENTINI; DALY, 2020).

2.2 Conforto Térmico

2.2.1 Conforto térmico, zona de conforto térmico e métodos preditivos

O corpo humano é considerado um sistema termodinâmico, pois produz, através de “insumos” como alimento e oxigênio, trabalho mecânico e calor (BUTERA, 1998). Para que se garantam as condições saudáveis para o seu funcionamento, o corpo necessita de uma temperatura interna de aproximadamente 37° C. A temperatura corporal, ao se distancia desse valor (para mais ou para menos) pode vir a comprometer o funcionamento de órgãos e causar inclusive a morte. Dessa forma, o corpo humano é provido de mecanismos termorreguladores capazes de serem ativados quando as temperaturas corporais ultrapassam os valores desejados (LAMBERTS, ROBERTO; DUTRA, L; PEREIRA, 2014).

Esses mecanismos têm por função manter o equilíbrio térmico, essencial para a sobrevivência, e, além disso, são necessários mesmo que, em alguns casos, não gerem conforto (BUTERA, 1998). Vale destacar que, para que a sensação de conforto

térmico seja atingida, a quantidade de calor gerada pelo corpo deve ser igual à quantidade de calor perdida.

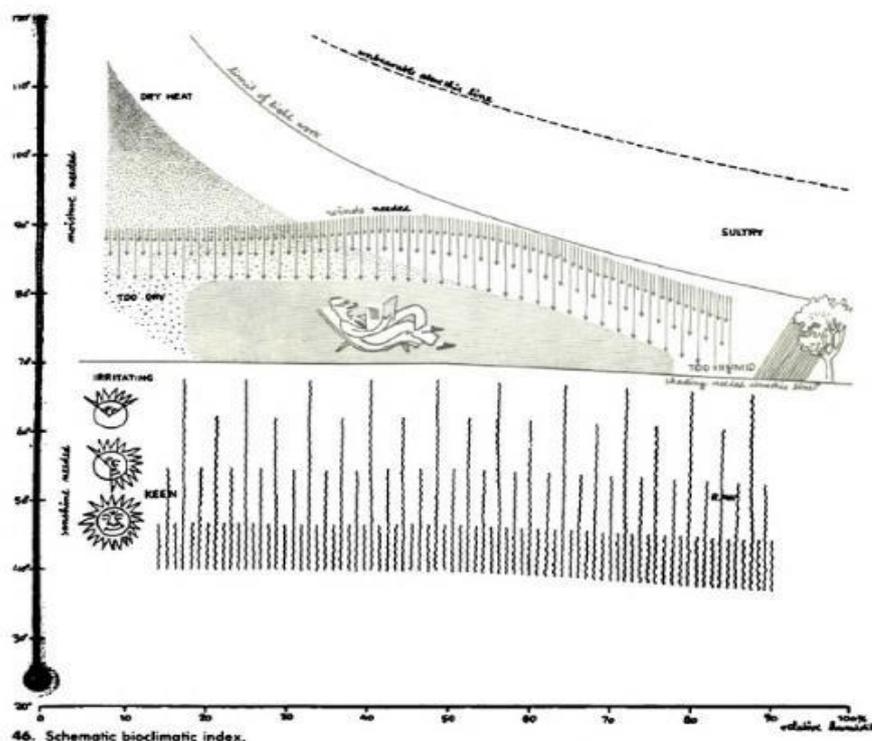
As trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente se dão por convecção, radiação, condução e transpiração (BUTERA, 1998). A convecção ocorre pelo contato do indivíduo com o ar e depende das temperaturas do ar e da pele, bem como da velocidade do ar. A radiação está relacionada diretamente à temperatura da pele e à das superfícies que compõem o ambiente. A condução, por sua vez, depende do contato do corpo com algum objeto sólido, sujeitando-se assim à temperatura do objeto, à temperatura da pele e às características termofísicas do objeto. Por último, a transpiração, que resulta na evaporação da água, é caracterizada pela perda de calor a depender da umidade relativa do ar.

As variáveis ambientais que possuem influência no conforto térmico e podem ser mensuradas são a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a umidade relativa e a velocidade do ar. Já as variáveis subjetivas, que mudam de acordo com o metabolismo, dependem da atividade física e da vestimenta do indivíduo (LAMBERT,; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O regulamento normativo da ASHRAE 55 (2017) estabelece que conforto térmico é um estado de espírito que expressa a satisfação com o ambiente térmico que, devido a situações psicológicas e fisiológicas, varia de indivíduo para indivíduo. Dessa forma, as condições ambientais necessárias para se atingir o conforto térmico não são as mesmas para todas as pessoas (ASHRAE-55, 2017). A zona de conforto, no entanto, é conceituada como o grupo de condições climáticas em que grande parte dos indivíduos não sentem desconforto térmico seja por calor ou por frio (SAYIGH; MARAFIA, 1998).

Muitos são os estudos que buscam definir as condições climáticas que compõem essa zona de conforto. Os irmãos Olgyay foram os primeiros a apresentarem, de forma gráfica e com maior notabilidade entre os teóricos da época, o conceito de zona de conforto. De acordo com Olgyay (2015), os humanos tendem a gastar o mínimo de energia para se ajustarem ao ambiente. Partindo disso, a zona de conforto é vista como a condição em que os seres humanos obtêm sucesso ao se adaptarem ao meio, sem gasto desnecessário de energia. Assim, a zona de conforto compreenderia os limites representados no diagrama demonstrado na Figura 13, o qual apresenta, no eixo vertical, a temperatura de bulbo seco com limite mínimo de 20° C e máximo de 27° C e, no eixo horizontal, a umidade relativa entre 20 e 70%.

Figura 13 - Gráfico da zona de conforto segundo Olgay



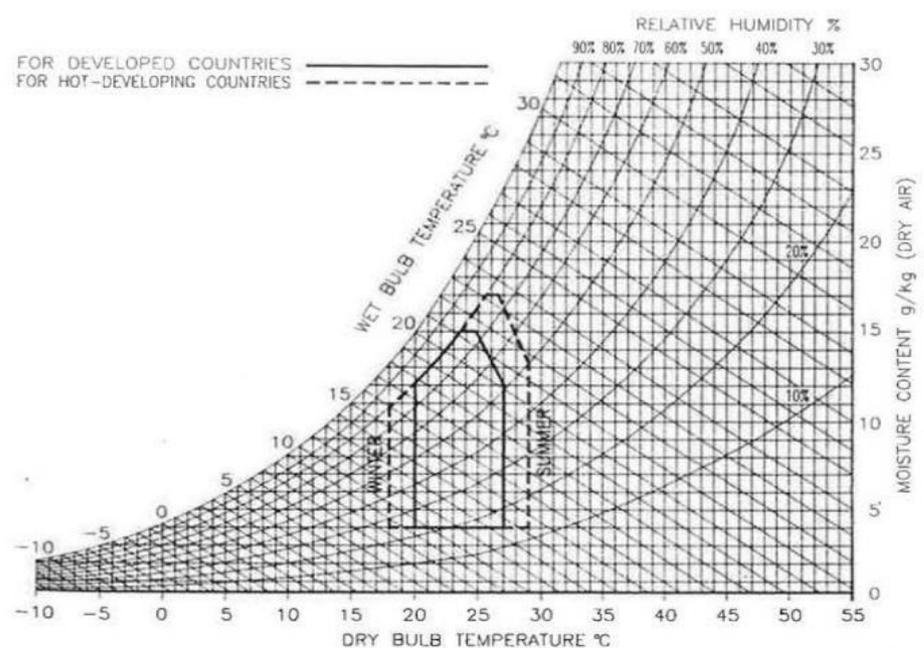
Fonte: Olgay (2015)

Entretanto, o autor afirma que a zona de conforto térmico não possui limites reais, visto que varia de pessoa para pessoa. Em outras palavras, a delimitação da zona de conforto térmico relaciona-se a uma série de variáveis tais como gênero, idade e aclimatação dos habitantes ao clima local. Para Olgay, a relação entre a temperatura externa e a temperatura de conforto interna estão muito próximas (GIVONI, 1992).

Todavia, segundo Givoni, a carta de Olgay é aplicável apenas para condições de conforto em ambientes externos, sendo sua aplicação inapropriada em regiões onde há uma variação térmica diária muito grande. Dessa forma, Baruch Givoni (1992) propôs a Carta Bioclimática da Edificação (*Building Bioclimatic Chart*). A carta referida foi elaborada por Givoni com base na observação de problemas na utilização da zona de conforto da ASHRAE, aplicadas em edificações não climatizadas. Esse diagrama é capaz de localizar, em um único ponto, ao mesmo tempo, temperaturas de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa e umidade absoluta. Assim, torna-se possível relacionar e estabelecer estratégias bioclimáticas e limites para uma condição de conforto térmico no interior de edificações sem climatização mecânica.

Segundo o diagrama, a zona de conforto está definida no conjunto de condições climáticas, na qual a maioria das pessoas não sentem desconforto térmico (GIVONI, 1992). O autor ainda ressalta que existem diferentes zonas de conforto para climas em países desenvolvidos, com maior uso de climatização mecânica, e em países em desenvolvimento de clima quente, com menor uso de condicionadores de ar e maior aclimação ao calor. Portanto, a zona de conforto para esses últimos possui limites mais brandos de temperatura, entre 18° C e 29°C, e de umidade do ar não superior a 80%, conforme a ilustra a Figura 14.

Figura 14 - Carta Bioclimática de Givoni



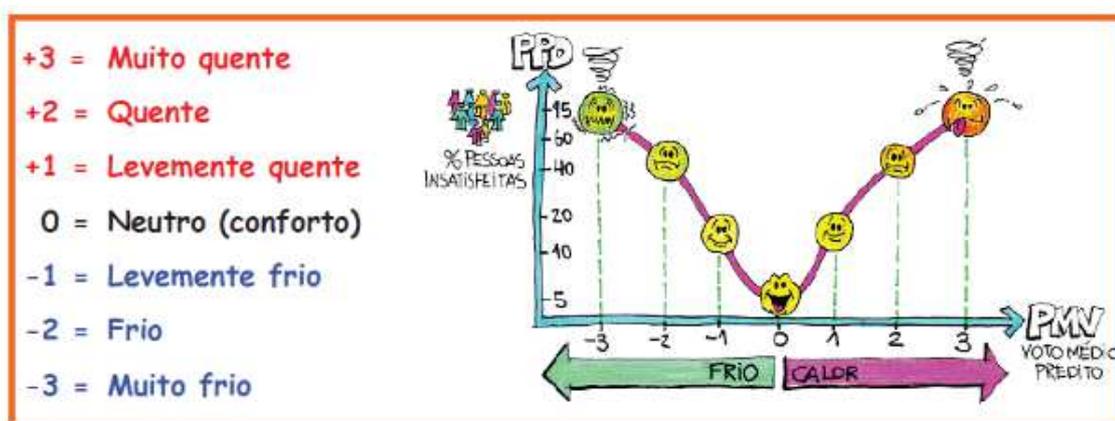
Fonte: Givoni (1992)

A utilização das tabelas de Mahoney é outro método empregado no auxílio da avaliação das estratégias de conforto térmico. As tabelas têm como propósito analisar características climáticas para, assim, sugerir indicadores ou diretrizes de projeto (SAYIGH; MARAFIA, 1998). As suas aplicações consistem no preenchimento de um conjunto de dados climáticos. Assim, ao interpretar e comparar os resultados das tabelas à zona de conforto de um específico clima, é possível diagnosticar grupos com os principais problemas climáticos. A seguir, com esses resultados, são indicadas as diretrizes de projeto para que seja possível alcançar o conforto térmico em edificações condicionadas naturalmente (United Nations 1971 apud RORIZ et al., 1998). Tais

diretrizes indicam situações de *layout*, orientação, forma e estrutura para que se obtenha um projeto responsivo ao clima (SAYIGH; MARAFIA, 1998).

Recentemente, dois modelos de avaliação de conforto térmico têm sido mais utilizados: o modelo analítico e o modelo adaptativo. O regulamento normativo da ASHRAE 55 (2017), referência internacional quando se trata de avaliação de conforto térmico, orienta a utilização desses dois modelos. O modelo analítico é baseado nos estudos realizados por Fanger, durante a década de 1970, e consiste na aferição de dois conceitos: o voto médio predito (PMV) e a porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Em sua pesquisa, realizada em câmaras climatizadas, Fanger fazia perguntas a pessoas submetidas a diversas combinações de variáveis ambientais, a vários níveis de atividade física e a vestimentas com tipos de isolamento distintos. As perguntas feitas estavam relacionadas à escala de sensação térmica (PMV) e aos valores aferidos com a porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD), ambos observados na Figura 15.

Figura 15 - Gráfico relacionando PMV e PPD

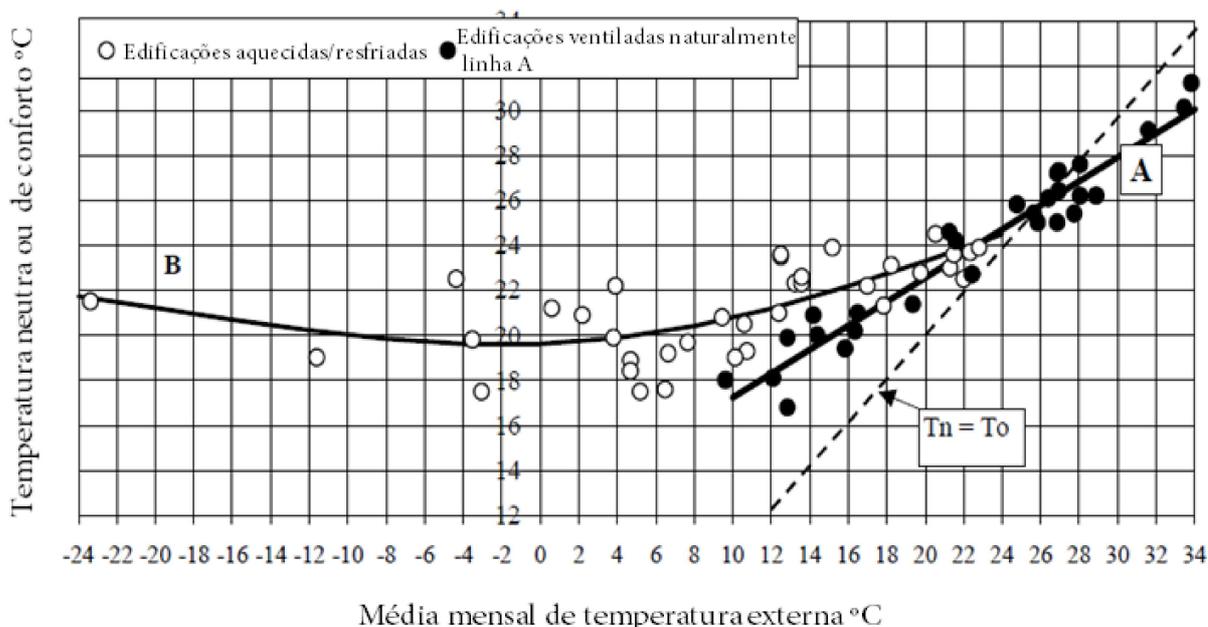


Fonte: Lamberts et al. (2014)

O PMV é uma escala numérica que representa o nível de satisfação térmica de um usuário, sendo a sensação de neutralidade equivalente a “0”. O PPD, por seu turno, diz respeito à porcentagem de pessoas insatisfeitas, a qual é computada pelo PMV (RUPP; GHISI, 2019). Para Fanger, os níveis aceitáveis para o PMV seriam de -1 a +1 (RUPP; GHISI, 2019). A ASHRAE 55, por sua vez, considera aceitáveis, para um ambiente, níveis de PMV entre -0,5 e +0,5, além de um PPD de 10%. A equação de Fanger utiliza as seguintes variáveis ambientais: temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa do ar, velocidade do ar, metabolismo e vestimenta.

O modelo adaptativo é baseado em descobertas feitas em pesquisas de conforto térmico realizadas em campo por diversos pesquisadores como Humphreys, De Dear, Auliciems, Brager e Nicol (HUMPHREYS; NICOL; RAJA, 2007). Esse conceito se baseia no princípio básico de que todos os indivíduos tendem a se comportar de forma a recuperar sua situação de conforto ao serem introduzidos a uma situação de desconforto. Da mesma forma, Humphreys propõe o estudo da aclimatização dos indivíduos que habitam lugares com um determinado clima, onde a temperatura de conforto está relacionada à média da temperatura do ar externa (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2014). Segundo a ASHRAE 55 (2017), o modelo adaptativo é aplicável exclusivamente a edificações ventiladas naturalmente. Já para o autor faz-se necessário distinguir entre as temperaturas de conforto para edificações climatizadas mecanicamente e para edificações ventiladas naturalmente, já que os usuários apresentam diferentes expectativas em certas situações. Em consonância, Givoni (1992) afirma que usuários de edificações não climatizadas tendem a aceitar mais facilmente a amplitude térmica e a velocidade do ar no interior de edificações ventiladas naturalmente.

Figura 16 - Mudança de temperatura de conforto com média da temperatura externa mensal



Fonte: adaptado de Nicol, Humphreys e Roaf (2012)

Ao se observar a Figura 16, é possível notar que há uma variação maior entre a temperatura considerada de conforto entre os usuários de edificações climatizadas e de edificações ventiladas naturalmente (*free-running*). Para edificações ventiladas naturalmente ou, por assim dizer, favorecidas de estratégias passivas, o autor sugere uma variação de temperatura de conforto entre os limites de 17° C e 30° C. Segundo Nicol et al. (2000), isso demonstra que a temperatura interna média de conforto que as pessoas admitem está vinculada à temperatura média externa nesses modelos de edificação. Nesse sentido, é sugerida a adoção da seguinte fórmula para o encontro da temperatura média de conforto ou temperatura neutra (Roaf et al. 2014): $T_c = 0,53 (T_{méd}) + 13,8$.

Roaf et al. (2014) ainda alertam para a problemática de índices absolutos de conforto. Isso porque há uma subjetividade em algumas variáveis, como o comportamento do usuário, a fisiologia e a aclimatização, as quais são difíceis de serem estimadas. Os autores ainda complementam que, em alguns casos, temperaturas altas, responsáveis por provocar o suor como reação termorreguladora, mesmo admissíveis a nível de conforto, podem gerar estresse psicológico. Da mesma forma, o uso de vestimentas pesadas pode atrapalhar a realização de determinadas atividades.

Apesar de muito utilizado, o método analítico vem gerando algumas contestações, feitas por outros teóricos, acerca da maneira como é empregado. Nicol et al. (2002) afirmam que há problemas na aplicação, em pesquisas de campo, do modelo analítico que se baseia em termos fisiológicos e físicos da transferência de calor para explicar a resposta dos indivíduos quanto ao ambiente térmico. Os autores asseguram que tais casos falham pela falta de precisão na estimativa dos níveis de isolamento da vestimenta e de metabolismo e pela complexidade desses índices. Além disso, a utilização de índices simples para estimar o voto de conforto térmico e as variedades de condições nas quais os indivíduos se sentem confortáveis é vista como melhor opção por ser mais abrangente do que o modelo analítico (NICOL; HUMPHREYS, 2002).

No entendimento de Humphreys et al. (2007), não há vantagem alguma ao se utilizar seis variáveis térmicas para se estimar o voto de sensação térmica (TSVs), como ocorre no modelo de Fanger. Para os autores, pelo contrário, haveria inclusive um déficit. Além disso, segundo o estudo reportado, haveria maior probabilidade de sucesso ao se utilizar a temperatura do ar externo como índice, devido a diversos

fatores, a saber: (a) a temperatura do ar e a temperatura radiante não são tão diferentes na prática como a modelagem térmica de uma sala vazia prevê, pois a presença de mobília no interior do ambiente aumenta a área de superfície disponível para as trocas de calor com o ar do ambiente, reduzindo assim a diferença entre a temperatura do ar e temperatura radiante; (b) a movimentação de ar em ambientes internos normalmente é pequena, prevalecendo a convecção com a superfície do corpo com vestimenta; e (c) se a pele não estiver coberta por suor, a umidade não afeta na transferência de calor. Portanto, para o autor, a temperatura do ar é índice suficiente para estimar o conforto térmico de ambientes internos.

Estudos realizados por Rupp e Ghisi (2019) avaliaram modelos preditivos de conforto térmico para o clima subtropical brasileiro. Durante o estudo, foram comparadas, a partir de pesquisas de campo, as respostas dos usuários nas quatro estações climáticas, sendo uma das edificações com sistema de ar-condicionado central e as demais com ventilação híbrida, na qual os usuários controlam a ventilação natural com a abertura de janelas e operação do sistema de ar-condicionado. A partir dos resultados obtidos pelos autores, foram encontrados fundamentos para explicar a exigência da ASHRAE 55 nos limites de PMV.

Dessa forma, os autores sugerem uma faixa mais branda para o PMV (de +1,0 a -1,0) para o clima subtropical brasileiro. Os autores ressaltam também que os resultados das pesquisas apresentaram semelhantes graus de conforto e aceitabilidade em edificações de ventilação híbrida e de sistema de ar-condicionado central. Ainda apontam a possibilidade de uma provável economia no consumo de energia e modificações de ventilação híbrida, sem comprometimento do desempenho térmico. Ressaltaram ainda que, a mudança de vestimenta dos usuários, em edificações de ventilação híbrida, permitiu que os sujeitos se adaptassem às alterações de temperatura interna de acordo com as variações de temperatura externa, indo ao encontro da teoria do modelo adaptativo. Sendo assim esse método seria adequado para avaliação do conforto térmico em edificações de escritório de ventilação híbrida, durante a operação da ventilação natural.

Para Humphreys et al. (2007), as edificações vernaculares tradicionais normalmente não são capazes de atingir níveis de conforto de normas que se embasam em fisiologia, ainda que possam atingir os requisitos do conforto adaptativo. Se as normativas do modelo adaptativo fossem mais bem formuladas, ao serem aplicadas, encorajariam o desenvolvimento de projetos responsivos ao clima e até,

possivelmente, criariam uma nova arquitetura vernácula (HUMPHREYS; NICOL; RAJA, 2007).

2.2.2 Conforto térmico adaptativo

O conforto térmico adaptativo foi estabelecido a partir de um série de estudos que destacaram a importância entre a percepção térmica e as condições internas e externas, partindo da prerrogativa de que o conforto térmico é um sistema autorregulador (HELLWIG et al., 2019). Essa prerrogativa se baseia no conceito de que os humanos tendem a, quando lhes é fornecida a oportunidade, interagir com o ambiente de maneira a assegurar o conforto. Em outros termos, as sensações desagradáveis desencadeiam reações que fazem com que as pessoas tentem controlar o conforto, seja a partir de reações fisiológicas ou comportamentais (NICOL; HUMPHREYS; ROAF, 2012). A abordagem adaptativa considera que as condições climáticas nas quais o indivíduo esteve exposto nos últimos dias influenciam seu comportamento de adaptação ao ambiente térmico (DE DEAR; BRAGER 2002 apud QUADROS; MIZGIER, 2020)

Os três princípios adaptativos são: os comportamentais, os fisiológicos e os psicológicos. Nesse sentido, o conforto adaptativo é o primeiro a levar em conta em questões como a termorregulação a partir da alteração do comportamento com a alteração da postura dos níveis de isolamento da vestimenta e do controle pessoal do ambiente (HELLWIG et al., 2019). Há ainda, dentro do princípio comportamental, questões sociais e culturais que devem ser levadas em conta. Quando uma situação social restringe a possibilidade de adaptação da vestimenta, essa deve ser considerada, assim como situações culturais que também podem surgir como limitações. Mecanismos psicológicos do conforto adaptativo incluem a percepção do usuário da sua capacidade de adaptação dentro do ambiente como, por exemplo, a acessibilidade e oportunidade da abertura de uma janela pelo usuário (HELLWIG et al., 2019).

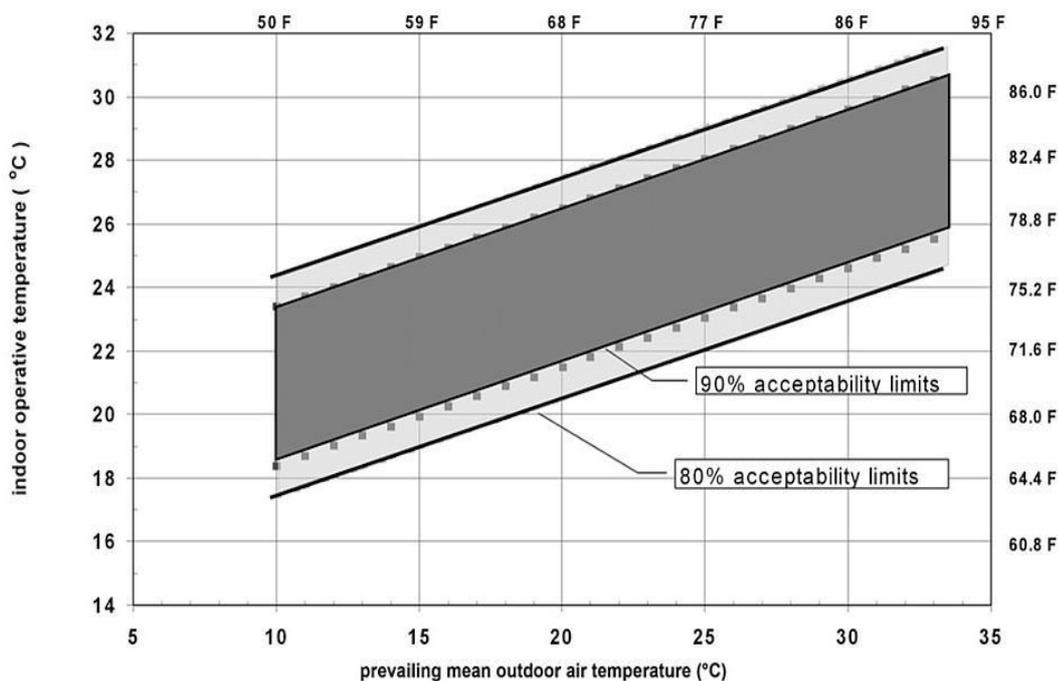
Para Nicol et al. (2012), uma temperatura interna que acompanha as variações climáticas externas é extremamente desejável, pois as expectativas de experiências térmicas diferem nas estações de inverno e verão. Os indivíduos, ao serem expostos a uma temperatura “de verão”, teriam uma temperatura desconfortavelmente quente se estivessem usando vestimentas de inverno (NICOL; HUMPHREYS; ROAF 2012).

Esses fatores contribuem com a utilização da temperatura média predominante externa para a determinação da zona de conforto, visto que uma faixa de temperatura muito limitada, como a que é utilizada no método analítico, prejudicaria a conexão dos usuários com o ambiente externo.

2.2.3 Recomendações da ASHRAE 55

A normativa americana ASHRAE 55 indica o método preditivo do conforto adaptativo para a avaliação de edificações climatizadas naturalmente com o controle do usuário. Para tanto, estabelece alguns parâmetros e limites que devem ser atendidos para a utilização do método.

Figura 17 - Limites de conforto para edificações de ventilação natural controlada pelo ocupante



Fonte: ASHRAE 55 (2017)

Os equipamentos de climatização mecânica para resfriamento não devem estar instalados, assim como o sistema de aquecimento não poderá estar ligado. Quanto aos níveis de atividade metabólica, esses deverão estar entre 1,0 e 1,3 met. Há também uma limitação quanto à vestimenta: os usuários poderão se adaptar a esse aspecto dentro dos limites de 0,5 a 1,0 clo. Por último, a normativa determina que a

temperatura média externa predominante deve ser maior que 10° C e menor que 33,5° C. Esse último aspecto talvez seja o maior limitante da norma para climas mais frios. A “temperatura média externa predominante” deve ser obtida a partir da média da temperatura externa de bulbo seco de, no mínimo, sete dias anteriores à avaliação e de, no máximo, 30 dias. A média poderá ser uma simples média aritmética ou uma média ponderada, na qual se estabelecem pesos menores, para cada dia subsequente, entre 0,6 e 0,9.

A normativa também estabelece que os dados utilizados devem ser da estação meteorológica mais próxima. Para a apresentação da zona de conforto desse método, tem-se o gráfico apresentado na Figura 17, no qual os limites, superior e o inferior, se dão pela equação apresentada no Tabela 4. O aumento da velocidade do ar, no ambiente interno, aumentará também o limite de aceitabilidade superior do gráfico, conforme Tabela B da Tabela 4, estando a velocidade do ar no interior do ambiente limitada a 1,2 m/s. Se um espaço da edificação avaliada não é regularmente ocupado ou está fora dos critérios da norma, ele deverá ser excluído da avaliação.

Tabela 4 - Resumo de equações e parâmetros dos limites de conforto para edificações ventiladas naturalmente

Método ASHRAE 55 (2017) para limites de conforto para edificações de ventilação natural controlada pelo ocupante				
Limite superior de aceitabilidade de 80% (° C) :		0,31 T _{pma(out)} +21,3		
Limite inferior de aceitabilidade de 80% (° C) :		0,31 T _{pma(out)} +14,3		
Temperatura operativa :		T _o = A.T _a +(1-A)T _r		
Tabela A: Valores para A			T_{pma} = Temperatura externa média predominante T_o = Temperatura operativa T_a = Temperatura média do ar T_r = Temperatura média radiante A = Constante de acordo com tabela “A”	
Velocidade do ar	0,2 m/s	0,2 a 0,6 m/s		0,6 a 1,0 m/s
Valor de A	0,5	0,6		0,7
Tabela B: Parâmetros da velocidade média do ar para aumento do limite superior de aceitabilidade de 80%				
0,6 m/s	0,9 m/s	1,2 m/s		
1,2 ° C	1,8 ° C	2,2 ° C		

Fonte: Adaptado de ASHRAE 55 (2017)

2.3 Parâmetros da ventilação natural

2.3.1 Coeficientes de pressão

Os coeficientes de pressão são essenciais para determinar a influência do entorno na ventilação natural nas edificações por ação dos ventos. Esses coeficientes são, portanto, importantes parâmetros para a análise da ventilação natural pela ação dos ventos, haja vista que correspondem aos dados de entrada de grande parte dos programas de simulação de desempenho térmico do edifício e do cálculo de vazão do ar (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Quando o vento atinge a face de uma edificação, uma pressão positiva é criada na região de barlavento e uma negativa, na de sotavento, sendo essas pressões normalmente expressas por coeficientes de pressão (C_p). Programas de simulação energética normalmente usam valores de C_p simplificados ou tabelados, a partir de normativas ou banco de dados de contextos pré-determinados (CHARISI; WASZCZUK; THUIS, 2017).

Charisi et al. (2017) problematiza o fato de as estações meteorológicas, que fazem a coleta de dados dos arquivos climáticos, estarem situadas em localizações específicas como em aeroportos e que, portanto, sua aplicação sem critério tende a ignorar o microclima do local, que varia dentro do mesmo espaço geográfico de acordo com a infraestrutura urbana. Como alternativa, os autores apresentam a utilização de dados mais detalhados dos coeficientes de pressão. Tais dados, segundo Charisi et al. (2017), combinados com os arquivos climáticos, podem introduzir o microclima do local na análise da edificação. O contexto e o microclima apresentam grande influência sob os coeficientes de pressão (C_p). Porém, é difícil encontrar dados de coeficientes de pressão para edificações de formas mais complexas ou inseridas em meios urbanos mais complexos e irregulares como os das cidades brasileiras (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011)

Atualmente, os coeficientes de pressão nas envoltórias das edificações, que caracterizam a distribuição da pressão do vento, podem ser obtidos das seguintes maneiras: testes em túneis de vento, simulações de dinâmica computacional de fluidos (CFD), tabelas de valores médios de acordo com a fachada e ferramentas de cálculo de regressão simplificados. (CHIESA; GROSSO, 2019).

Dogan e Kastner (2020) alertam que esses modelos, tabelados e de ferramentas de cálculo, não são capazes de prever o fluxo de ar induzido pela

distribuição de pressão de forma precisa. Métodos de estimativa dos níveis de coeficiente de pressão (C_p), como o de Swami e Chandra, quando implementados no estudo da ventilação natural, não são suficientes para analisar o potencial da ventilação natural, além de causarem taxas de ventilação superestimadas (DOGAN; KASTNER, 2020).

O CpCalc+ é um *software* amplamente utilizado na atualidade para obtenção dos coeficientes de pressão nas fachadas. Todavia, Dogan e Kastner (2020), ao realizarem estudos comparativos de C_p , entre CpCalc+ e simulações CFD, encontraram discrepâncias nos resultados do CpCalc+ quando há outras edificações no entorno, recomendando, portanto, o uso das simulações CFD. Nos estudos realizados, estes autores demonstram que essas superestimativas afetam significativamente a temperatura operativa e as horas de conforto térmico adaptativo, em especial nas edificações pesadas localizadas em climas tropicais. Para alguns autores, os modelos analíticos e os bancos de dados existentes não são capazes de introduzir os efeitos da topografia do sítio, detalhes nas fachadas ou informar sobre as incertezas dos dados fornecidos (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009).

Os dados de C_p são a base para o cálculo de algumas equações dentro das simulações, como exemplifica Tork et al. (2017, p. 330): “Pelos coeficientes de pressão, tem-se a possibilidade de estimar o potencial de vazões internas entre fachadas de edificações.”. Assim, ressalta-se a importância desses dados para o cálculo da ventilação natural e para a análise do conforto térmico dos projetos.

O coeficiente de pressão é “[...] o quociente adimensional entre a pressão dinâmica medida em um ponto x na fachada do edifício (P_x) e a pressão dinâmica do fluxo de ar (vento) não perturbado a barlavento (P_d)[...]”.(CÓSTOLA; ALUCCI, 2011, p. 146). Sua fórmula está demonstrada a seguir, na Equação 2. Já a pressão dinâmica (P_d), representada na Equação 3, corresponde à força por unidade de área exercida pelo vento em um plano ortogonal ao sentido do escoamento do vento (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011).

$$C_p = \frac{P_x}{P_d} \quad (2)$$

$$P_d = \frac{\rho \cdot V_{ref}^2}{2} \quad (3)$$

Sendo:

V_{ref} = Velocidade do ar tomada na mesma altura do topo do edifício (m/s)

ρ = Massa específica do ar (kg/m³)

2.3.2 Fluxo de ar através das aberturas

A pressão média pelo tempo, causada pelo fluxo de vento nas superfícies ou para longe de uma superfície, é dada pela Equação 4. O C_p é o coeficiente de pressão estática e “ ρ ”, a massa específica do ar em kg/m³. Já o “ v ” é a média da velocidade por tempo em m/s em um ponto escolhido, sendo comumente um ponto na abertura (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006).

$$P_w = \frac{C_p \rho v^2}{2} \quad (4)$$

A determinação do fluxo médio de ar pelas aberturas é fornecida pela Equação 5. Δp corresponde à diferença de pressão pela abertura. Q equivale à taxa média de fluxo de ar em m³/s, C_d é o coeficiente de descarga e A equivale à área transversal em m² da abertura (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006).

$$\Delta p = \frac{0,5 \rho Q^2}{(C_d A)^2} \quad (5)$$

A viscosidade do ar e a turbulência gerada nas proximidades das aberturas é considerada pelo coeficiente de descarga (C_d), caracterizado por meio da resistência ao fluxo de ar na entrada e na saída das aberturas (SORGATO, 2009). Essa função refere-se à velocidade do ar, à diferença de temperatura do ar exterior e interior da geometria das aberturas (FREIXANET; VIQUEIRA, 2004). Os valores para C_d variam conforme o tamanho e o tipo de abertura. Para aberturas pequenas, se considera 0,65; para aberturas médias, 0,78, enquanto para aberturas grandes, se considera 1,00 (FREIXANET; VIQUEIRA, 2004). A equação para cálculo da ventilação através de uma abertura também se dá pela Equação 6.

$$Q = C_d \cdot A_e \cdot v \cdot (\Delta C_p)^{0,5} \quad (6)$$

Onde:

Q = Taxa de ventilação

C_d = Coeficiente de descarga das aberturas

A_e = Área efetiva de ventilação (m^2)

v = velocidade do vento (m/s)

ΔC_p = diferença dos coeficientes de pressão (Pa) a barlavento e a sotavento

2.4 Simulações computacionais

2.4.1 Simulação Computacional

As simulações computacionais são ferramentas frequentemente utilizadas para avaliar o consumo energético e o comportamento térmico das edificações, possibilitando a determinação de estratégias de aperfeiçoamento do conforto térmico, redução do consumo energético, melhoramento da eficiência dos sistemas de climatização, otimização dos sistemas da edificação e auxílio na tomada de decisão em projetos (SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2017). Essas ferramentas utilizam algoritmos que modelam os balanços de energia e a transferência de calor entre as superfícies da edificação (TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010 apud ZHAI; CHEN, 2001). Os comportamentos termoenergéticos das edificações, para serem avaliados, necessitam da inserção de diversas variáveis e parâmetros, com o objetivo de simular as influências das características do local e dos sistemas da edificação no desempenho (CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013). Segundo Silva et al. (2017), “cada sistema adicionado a uma simulação dinâmica de edificações requer grande quantidade de informações e parâmetros, uso de diferentes métodos de cálculo e de convergência, e uso de diferentes bases de dados para as variáveis de entrada”.

Para que se contabilize o fluxo de calor no balanço térmico total da edificação, o modelo da simulação deve apresentar algumas variáveis que influenciarão as trocas de ganho de calor dos sistemas da edificação e da geração de calor pelos usos da edificação, equipamentos e iluminação (WESTPHAL, 2007). As variáveis fundamentais estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis relacionadas a cada fonte de calor em uma edificação

Fonte de calor	Variáveis relacionadas
Paredes e cobertura	Dimensões Orientação solar Transmitância térmica Capacidade térmica Absortância à radiação solar Emissividade
Piso	Dimensões Contato externo (com o solo ou não) Transmitância térmica Capacidade térmica Emissividade
Janelas	Dimensões Orientação solar Transmitância térmica Transmitância, absortância e refletância à radiação solar Proteções solares externas e internas
Infiltração	Taxa de infiltração horária
Iluminação e equipamentos elétricos	Potência Padrão de uso
Pessoas	Quantidade Taxa metabólica Rotina de ocupação

Fonte: Westphal (2007)

A precisão apresentada pelos resultados de uma simulação computacional, depende da calibração do modelo. Essa etapa se caracteriza pelo ajuste dos parâmetros do modelo pelo usuário, a partir de um método iterativo, para que o desempenho seja simulado de maneira adequada (WESTPHAL, 2007). Nesse sentido, existem diversos estudos como, por exemplo, o de Westphal (2007), no qual foi desenvolvida uma metodologia de apoio à calibragem dos modelos de simulação térmica e energética das edificações.

Muitos são os programas de simulação disponíveis no mercado e utilizados nos centros de pesquisa. Alguns deles são o EnergyPlus, o ESP-r, TRNSYS e DOE (TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010). O programa DesignBuilder fornece um ambiente virtual no qual é possível testar diferentes situações projetuais para analisar o desempenho e o conforto térmico da edificação, além do consumo energético e da ventilação natural em uma interface visual de menor complexidade (ISMAIL; BADAWEY; ELELA, 2015). Esse programa é indicado para simulação da ventilação

natural, fluxos de calor, consumo de energia e outras funções (NEGREIROS, 2010). Para o cálculo da ventilação natural, considera-se o tamanho da abertura, o coeficiente de descarga, o período de abertura, a velocidade corrigida e a diferença de pressão entre as aberturas do ambiente. Para efetuar esse último cálculo, são utilizados os coeficientes de pressão e a orientação dos ventos (NEGREIROS, 2010). O programa faz uso dos algoritmos do EnergyPlus tanto para o cálculo das transferências de calor quanto para o da ventilação natural a partir do Airflow Network.

2.4.2 Arquivos climáticos para simulação

Os arquivos climáticos são uma coletânea de dados gerada a partir de registros feitos por estações meteorológicas. Esses arquivos são de extrema importância para as simulações termoenergéticas, pois é a partir deles que as informações e os dados climáticos são introduzidas nos softwares de simulação, como o Energy Plus e o DesignBuilder. Para a ASHRAE 55, o Ano climático de referência (Test Reference Year-TRY) e o Typical Meteorological Year (TMY) são os arquivos para obtenção dos dados para o ano climático de referência ou ano típico das médias mensais de temperaturas (ASHRAE, 2009 apud CELIS; E SILVA, 2018). Para a região de Porto Alegre, estão disponíveis os arquivos climáticos INMET, TRY e TMY.

Arquivos INMET são elaborados com base nas informações coletadas por estações meteorológicas do INMET (LAMBERTS; MELO; SORGATO; SCHELLER, 2015). Já os arquivos SWERA fornecem informações climáticas para energias renováveis, principalmente solar e eólica, em diversos países parceiros do programa (OPEN EI, 2020).

Os arquivos TRY, que foram utilizados nesta dissertação, são formados pela definição de um ano de referência a partir da interpolação de registros climáticos de diversos anos (BUILD UP, 2020). Estes arquivos são formados pela coleta dos dados de hora em hora, onde totalizam 8760 horas por ano (BELTRAME; CUNHA, 2016). A partir da eliminação dos anos que possuem as temperaturas médias mensais extremas, mais elevadas ou mais baixas, define-se o ano base. Assim, primeiramente, elimina-se o ano que possui o mês mais quente, em seguida, o ano que possui o mês mais frio, e assim consecutivamente, até que reste o ano de referência que se traduzirá no arquivo TRY (BELTRAME; CUNHA, 2016).

Em estudo realizado por Lamberts et al. (2015), foram feitas análises comparativas de arquivos climáticos de diversas cidades do Brasil, incluindo Porto Alegre. Na cidade, por meio da comparação dos arquivos TRY e INMET, encontrou-se uma diferença considerável entre as temperaturas nos meses de julho, outubro e dezembro. Ao comparar a radiação solar dos arquivos TRY e INMET com o atlas SWERA, constatou-se discrepância de 12% no total anual no arquivo INMET e, de -0,8% no arquivo TRY.

Para que estes arquivos sejam utilizados nas simulações termodinâmicas, estes devem ser compilados em formato “.epw” pois este é o formato aceito pela plataforma de simulação. Este formato contém informações de data, horário, fonte dos dados, temperatura de bulbo seco (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C), umidade relativa (%), pressão atmosférica (Pa), radiação horizontal extraterrestre (Wh/m²), radiação normal direta extraterrestre (Wh/m²), radiação global horizontal (Wh/m²), radiação normal direta (Wh/m²), radiação horizontal difusa (Wh/m²), direção do vento (graus), velocidade do vento (m/s) e precipitação (mm) de um local específico (BELTRAME; CUNHA, 2016).

2.4.3 Simulação em fluidodinâmica computacional (CFD)

A fluidodinâmica computacional, ou CFD, é a análise dos sistemas envolvendo o fluxo dos fluidos, a transferência de calor e os fenômenos associados por meio de simulações computacionais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Sua aplicação envolve diversas áreas, tais como a hidrodinâmica dos navios, a aerodinâmica de aviões e de usina eólicas, além do estudo das ações dos ventos nas edificações. Os estudos de edificações em simulações CFD podem ser realizados para análises internas e externas (TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010).

A dinâmica computacional dos fluidos possui três diferentes técnicas numéricas para a solução dos modelos: diferença finita, métodos espectrais e elementos ou volumes finitos, sendo a última a mais difundida entre os programas de computação (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). O domínio geométrico do modelo é apresentado por grades de células. A solução para o problema dos fluxos, como velocidade, pressão e temperatura, é definida dentro dos nódulos de cada célula. A precisão de um modelo CFD depende do número de células presentes na grade, porém aumenta proporcionalmente em função da necessidade de uma maior

capacidade de processamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Uma malha pouco refinada pode ocasionar erros na convergência na simulação (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011).

De acordo com Versteeg et al. (2007), a simulação computacional da dinâmica dos fluidos ocorre em três etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento. No pré-processamento, são definidas a geometria da região de interesse ou o domínio computacional, a subdivisão do domínio, transformando-o em uma malha de células (*grid*), a seleção do fenômeno físico e químico que será simulado, a definição das propriedades do fluido e, por último, a especificação das condições das células que coincidem com os limites do domínio. Na solução, ocorrem, por meio da simulação do programa, a integração das equações do fluxo dos fluidos de todos os volumes finitos do domínio, a discretização, etapa em que se realiza a conversão dos resultados das equações integrais em um sistema de equações algébricas e, finalmente, a solução dessas equações por um método iterativo. Já o pós-processamento é a etapa em que os resultados são apresentados de forma gráfica para que seja feita a análise.

Os modelos de turbulência também são fatores importantes na modelagem. Esse é um fenômeno físico de altíssima complexidade e de natureza nebulosa (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Os programas de simulação dispõem de alguns métodos de modelagem da turbulência, porém diversos estudos têm selecionado o modelo de turbulência de primeira ordem $k-\varepsilon$ para suas simulações, em função da relação custo/benefício entre a qualidade de resultados e a menor necessidade de grande capacidade de processamento (PRAKASH; RAVIKUMAR, 2015; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011; GAO; LEE, 2016).

3. METODOLOGIA

A definição do método para investigar a influência dos coeficientes de pressão de um contexto urbano imediato na ventilação de uma edificação residencial unifamiliar durante o período de ventilação natural teve como base o modelo preditivo de conforto adaptativo da ASHRAE 55. Desse modo, levou-se em conta a aplicação exclusiva do método para edificações ventiladas naturalmente. Esse método, por abranger as influências da velocidade, qualifica-se como um bom meio para a predição da satisfação do usuário no ambiente ventilado naturalmente.

Um método segmentado em três etapas foi aplicado com a finalidade de avaliar a influência do contexto na qualidade da ventilação interna da edificação. A primeira consistiu na utilização de programas de dinâmica computacional dos fluidos (CFD) para a obtenção de dados de coeficientes de pressão (C_p) nas superfícies das fachadas, com base em um contexto hipotético. A segunda está dividida em uma simulação da ventilação natural com dados de C_p obtidos por simulações CFD e em outra que faz uso de dados de C_p tabelados encontrados na literatura. Por último, foi feito o levantamento da zona de conforto, utilizando o método adaptativo, o qual foi confrontado com os dados da simulação. Tal procedimento se repete na análise que fez uso de dados de C_p tabelados, obtidos em Liddament (1986). Por fim, os resultados alcançados foram comparados e as possíveis diferenças verificadas foram analisadas.

Para que seja possível determinar a real influência dos ventos na ventilação de uma edificação dentro de um contexto específico, com informações mais precisas e que representam uma situação mais próxima da realidade, as simulações em túneis de vento e as simulações em dinâmica computacional dos fluidos (CFD) são as mais indicadas. Porém, as simulações de túnel de vento despendem tempo e investimentos altos, além de conhecimentos específicos e de infraestrutura. As simulações CFD surgem, portanto, como alternativa para esse método, por serem mais acessíveis, apesar de menos precisas do que simulações em túnel de vento.

Para as análises do desempenho da edificação, utilizou-se o *software* DesignBuilder, capaz de calcular a influência da ventilação natural a partir do algoritmo do EnergyPlus, o Airflow Network. Após as simulações dos dois modelos da edificação, obteve-se a real influência dos obstáculos na ventilação da edificação e no desempenho.

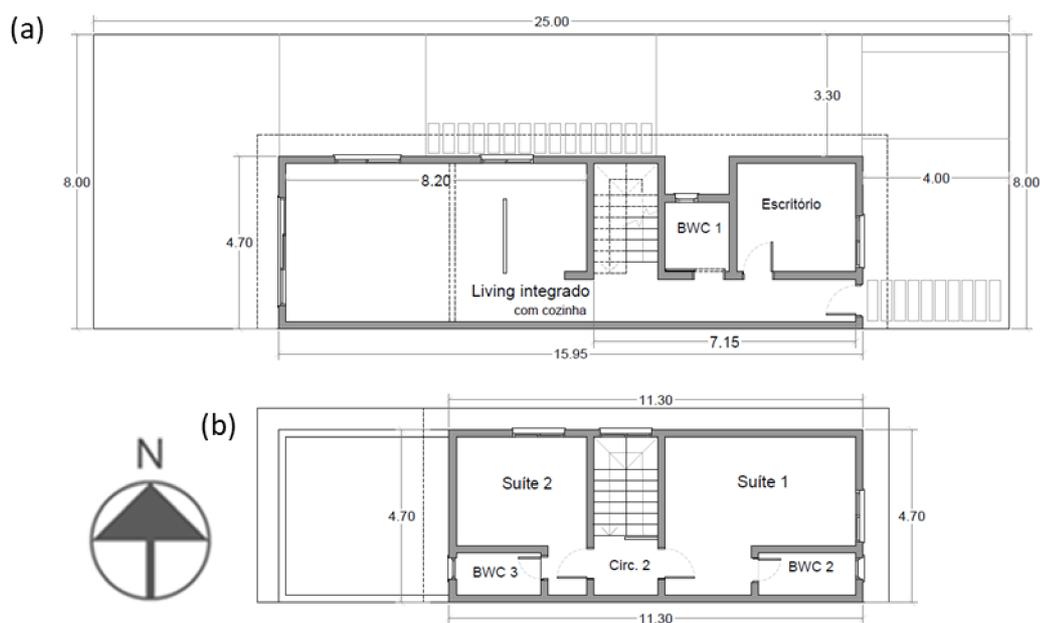
Tabela 6 - Síntese do método

SÍNTESE DO MÉTODO					
OBJETOS DO ESTUDO	SIMULAÇÃO CFD	ANÁLISE COMPARATIVA	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL		ANÁLISE COMPARATIVA
CASO A	Modelagem do entorno em ambiente virtual e simulação de 8 direções de vento	Cp obtidos via simulação CFD	Modelagem da edificação e inserção dos parâmetros constantes	Inserção dos Cp obtidos em CFD	Análise comparativa do impacto do entorno e do uso de dados de Cp tabelados na ventilação natural
CASO B		Cp tabela AIVC		Inserção dos Cp AIVC	

Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.1 Definição do modelo de edificação

Figura 18 – Planta Baixa da edificação em análise: (a) térreo e (b) segundo pavimento



Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo analisado é uma edificação habitacional unifamiliar de 126 m², divididos em dois pavimentos. O primeiro pavimento conta com um escritório, um banheiro e uma área social com sala de jantar, sala de estar e cozinha integradas. O segundo pavimento é composto por duas suítes. O pé direito de cada pavimento é de 3,00 m. O modelo é projetado para um lote de 200 m² de 8 m de frente e fundos por 25 m de comprimento. Esse se desenvolve através de um eixo oeste-leste, com a testada do lote voltada para oeste, conforme apresentado na Figura 18. Para a simulação do desempenho da edificação, é preciso definir as zonas térmicas. Portanto, foram definidas as mesmas zonas do modelo de simulação representadas na Figura 18. A garagem e a área de serviço, por estarem em áreas externas e descobertas, sem configurar um ambiente fechado, não foram consideradas na simulação.

Tabela 7 – Especificação das zonas

	Zona	Área interna de piso (m ²)	Área de abertura (m ²)	Área efetiva de ventilação (m ²)	Volume do ambiente (m ³)
Térreo	Living integrado	47,78	15,41	8,46	126,61
	Escritório	9,58	2,94	1,47	25,387
	BWC 1	3,32	0,35	0,17	8,798
Total Térreo		60,68	18,70	10,11	160,787
Segundo pavimento	Suíte 1	18,51	3,06	1,53	49,05
	Suíte 2	11,89	1,67	0,835	31,50
	BWC 2	3,04	0,35	0,175	8,05
	BWC 3	2,64	0,35	0,175	6,99
	Circulação 2	7,52	3,06	1,53	19,92
Total 2º Pavimento		43,6	8,49	4,245	115,51

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Definição do contexto

Figura 19 - Implantação e corte do contexto a ser analisado



Fonte: Elaborado pelo autor.

O contexto hipotético desenvolvido para a análise dos coeficientes de pressão e da ventilação natural é de um loteamento com edificações de igual altura à habitação em análise e espaçamentos entre as edificações do contexto. Tal contexto se enquadra em um ambiente amplamente residencial e de baixa densidade. Para que se tenha uma estimativa mais precisa da ventilação natural, foram modeladas três camadas de edificações no entorno da edificação analisada (TONG et al., 2016 apud DOGAN; KASTNER, 2020).

À leste da edificação, posiciona-se um elemento topográfico de altura igual a duas vezes o módulo “H” e com inclinação de 60°. Um módulo H equivale à altura de 7,15 m, correspondente à altura da habitação em investigação.

3.3 Simulação CFD

Para a realização das simulações CFD, o software escolhido foi a versão educacional do ANSYS WORKBENCH R1, no qual foi utilizado o módulo CFX para a execução das simulações. É comum, no desenvolvimento de simulações CFD, que se utilize os seguintes cinco passos (DOGAN; KASTNER, 2020):

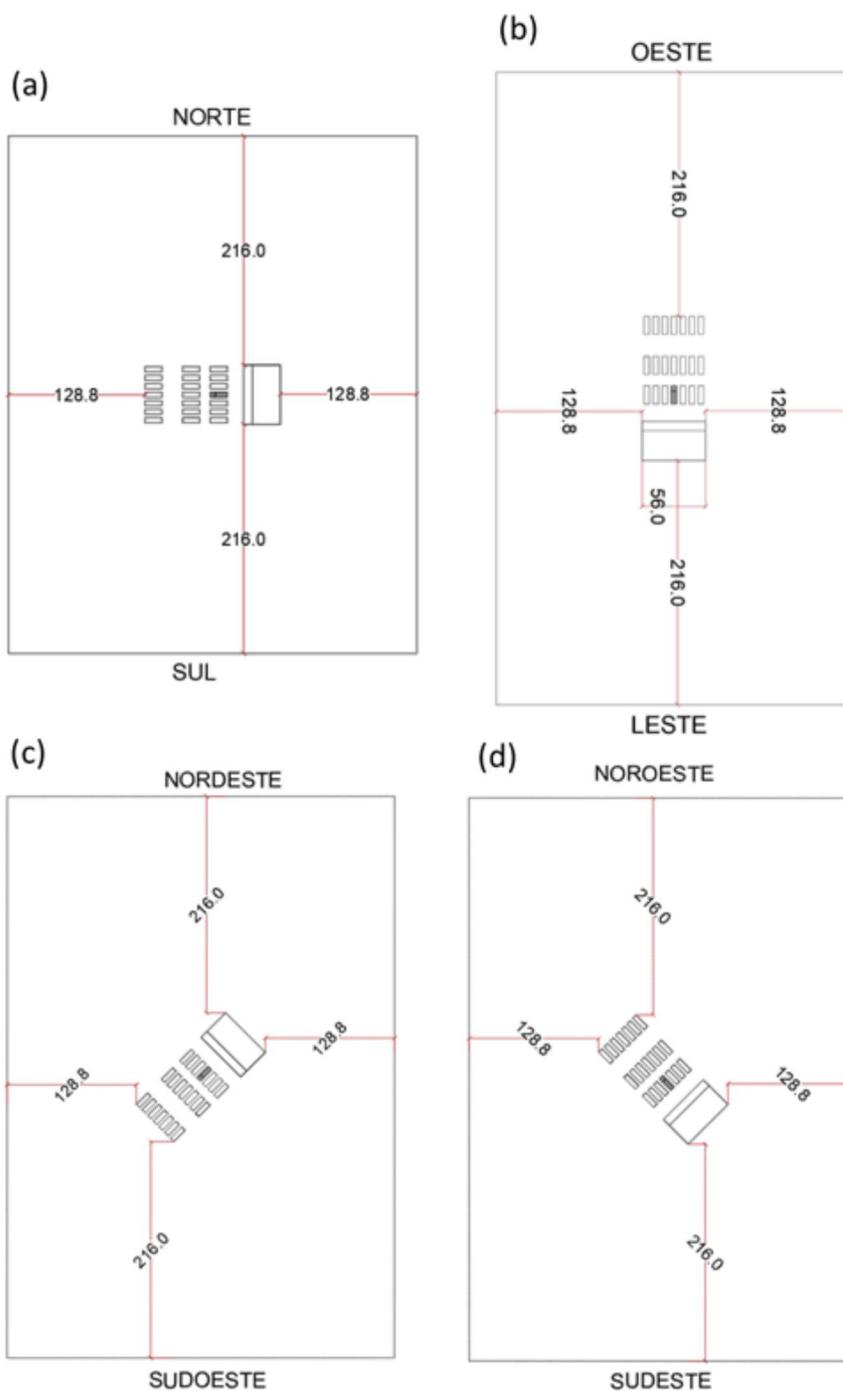
1. Modelar a geometria do entorno da edificação e seu o contexto em uma plataforma CAD;
2. Definir o domínio e a malha da geometria da edificação e topografia;
3. Conduzir as simulações de fluxos de vento para as direções de vento escolhidas, utilizando os limites apropriados de acordo com as diretrizes;
4. Realizar o pós-processamento dos resultados, com a extração dos valores de pressão nas aberturas para as múltiplas direções dos ventos;
5. Configurar o modelo energético para as simulações, providenciando os novos valores de coeficientes de pressão para todas as aberturas do modelo.

3.3.1 Domínio

O contexto-base utilizado nesta dissertação foi modelado com a versão Educacional da plataforma AutoCad. De forma mais específica, quatro domínios diferentes, relativos a oito diferentes direções do vento, foram modelados tridimensionalmente, possibilitando, assim, que se simulasse, por meio do software DesignBuilder, a inserção em intervalos de 45° de dados de Coeficiente de Pressão.

As oito direções do vento analisadas foram: norte, sul, leste, oeste, nordeste, noroeste, sudoeste e sudeste. Os domínios agrupados representam, em dupla, os ventos de sentidos opostos, sendo agrupados em: norte e sul, leste e oeste, nordeste e sudoeste e, por último, noroeste e sudeste.

Figura 20 - Domínios: (a) norte – sul, (b) leste – oeste, (c) nordeste – sudoeste, (d) noroeste – sudeste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A modelagem da geometria e do domínio foram realizadas separadamente, compondo, ao todo, 23 objetos. As dimensões do domínio foram modeladas de acordo com as diretrizes propostas pelo Architectural Institute of Japan (AIJ), extraídas do artigo de revisão de Tominaga et al. (2008), referência de diversos artigos do setor de

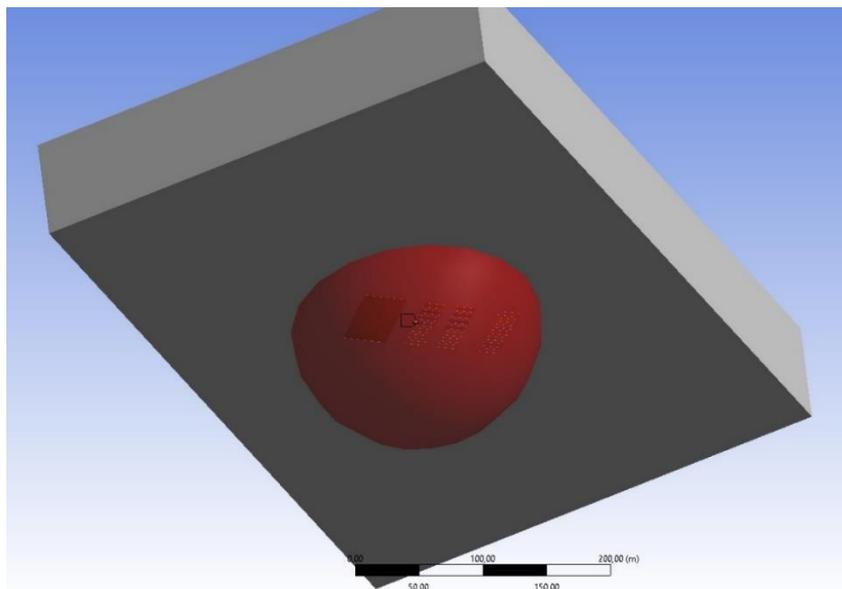
simulações CFD em edificações situadas em contextos urbanos. Dessa forma, determinou-se que as distâncias laterais deveriam apresentar distância aproximada de $2.3W$, onde “W” corresponde à largura do contexto analisado, cotados a partir do perímetro externo do contexto. As distâncias dos limites de fluxo de saída e entrada deveriam ficar em torno de $15H_{\text{máx}}$, no qual $H_{\text{máx}}$ corresponde à altura do maior elemento dentro do contexto analisado, cotados também a partir do perímetro externo do contexto (TOMINAGA et al., 2008). A altura do domínio é determinada pelo módulo $6H_{\text{máx}}$, que corresponde a seis vezes a altura do maior elemento modelado, correspondendo à altura total do domínio (DOGAN; KASTNER, 2020).

3.3.2 Malha

Para os quatro domínios modelados, optou-se por uma malha não estruturada, formada por elementos hexaédricos. Tal decisão ocorreu em virtude de esse método, apesar de resultar em uma construção de malha mais custosa, apresentar melhor adaptabilidade ao contexto de geometria prismática e, normalmente, melhor convergência do modelo.

Na modelagem da malha, foram utilizadas quatro ferramentas. Para a construção dos elementos tetraédricos, utilizou-se a opção “Patch Conforming Method”, selecionada entre as opções de modelos geométricos. Tominaga et. al. (2008) indicam que a resolução mínima da malha deve ter entre 0,5 e 5 m. Para tanto, a opção “sizing” foi selecionada três vezes em cada etapa. Inicialmente, optou-se para que, de maneira geral, a zona não perturbada do domínio que determina a malha tivesse o “tamanho de elemento” configurado para 5 m. Posteriormente, escolheu-se a opção “vertex sizing” e selecionou-se o vértice indicado na Figura 21.

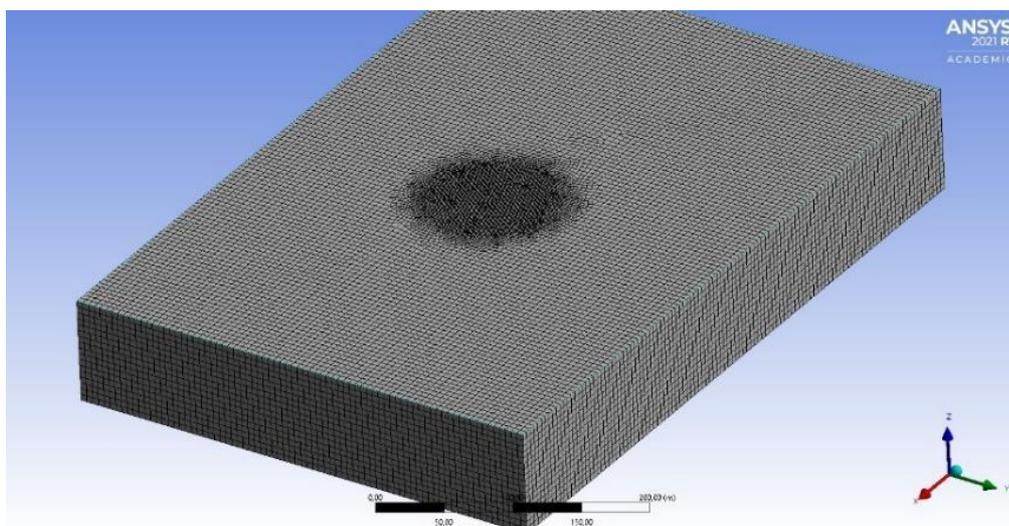
Figura 21 - Ferramenta vertex sizing



Fonte: Elaborado pelo autor.

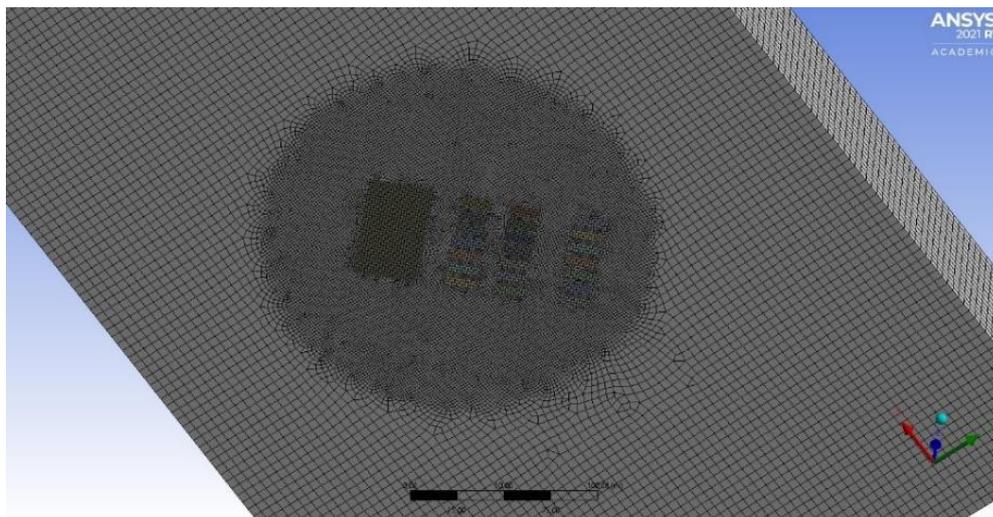
A partir desse vértice foi gerada uma esfera de raio de 100 m que fragmenta a malha em elementos menores, configurados para 1,5 m. Ambos atendem às recomendações de Tominaga et al. (2008). Selecionou-se a opção “sizing” também para a determinação da malha das edificações, as quais foram configuradas, da mesma forma, para uma dimensão de elemento de 1,5 m, atendendo à sugestão de Costa *apud* Tominaga (2008) de no mínimo 10 células por face.

Figura 22 -Vista superior da malha do domínio



Fonte: Elaborado pelo autor.

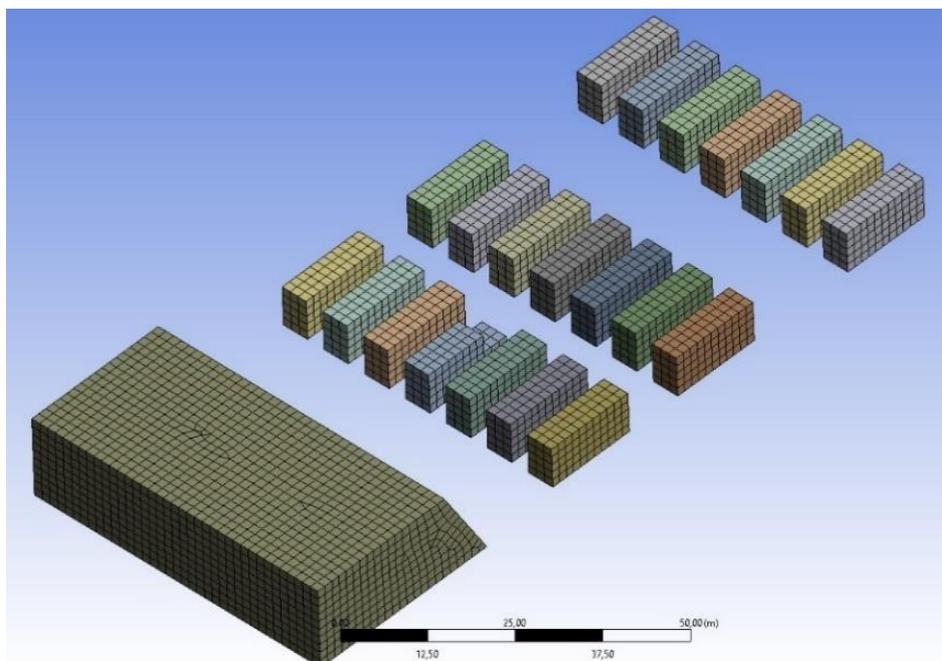
Figura 23 - Vista inferior da malha



Fonte: Elaborado pelo autor.

Infelizmente, a versão acadêmica da plataforma ANSYS WORKBENCH (2021) apresenta limitação em 512.000 vértices, o que restringiu o refinamento da malha para este estudo. O resultado da aplicação da malha pode ser observado nas Figura 22, 23 e 24.

Figura 24 - Malha das edificações



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Configuração de Parâmetros da Simulação

O modelo de turbulência escolhido para as simulações é o modelo k-epsilon. Cóstola e Alucci (2011) salientam que esse modelo apresenta uma boa relação entre os resultados e uma necessidade menor de processamento. Os autores defendem que o modelo de turbulência referido é largamente utilizado em trabalhos acadêmicos e de consultoria. Além disso, afirmam que existem diversas simulações validadas com sucesso para aplicações de engenharia de vento. No entanto, os estudos realizados concluíram que não é possível indicar, até o momento, superioridade deste modelo em relação aos demais modelos de turbulência de primeira ou de segunda ordem (FRANKE et al., 2007 apud CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Dessa forma, o modelo k-epsilon foi escolhido para a realização das simulações neste estudo.

A velocidade de referência para as simulações foi obtida a partir dos arquivos climáticos. Pelo fato de o contexto analisado possuir altura próxima a dos valores de medição das estações meteorológicas, não foi necessário realizar correções na velocidade do vento. Tais ajustes seriam imprescindíveis em caso de edificações mais altas no entorno. Salienta-se que as estações meteorológicas realizam medições das velocidades de ventos a aproximadamente 10 m de altura (PASSOS; LAMENHA; BITTENCOURT, 2017 apud BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008). Foram utilizadas, portanto, as velocidades médias de arquivos climáticos para as simulações. O arquivo climático da cidade de Porto Alegre foi o escolhido para obtenção dos dados de velocidade média dos ventos, medida no aeroporto Salgado Filho, com a extensão “BRA_RS_Porto.Alegre-Salgado.Filho.Intl.AP.839710_TMYx.epw”. As médias mensais podem ser observadas no Tabela 8. A velocidade média anual do vento, nesse caso, corresponde a 2,5 m/s, valor esse utilizado para as simulações.

Tabela 8 - Velocidades médias mensais para Porto Alegre

Médias mensais	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
Velocidade média do vento (m/s)	2	3	3	3	2	1	3	2	2	3	3	3

Fonte: Adaptado pelo autor de “BRA_RS_Porto.Alegre-Salgado.Filho.Intl.AP.839710_TMYx.epw”

Tominaga et. al. (2008) orientam que, para uma análise de um complexo de edificações, a configuração dos parâmetros de parede como rugosa pode levar a uma

má resolução do fluxo do fluido próximo às paredes, sugerindo assim, que o uso de uma parede lisa, para esse caso. Para a o limite de solo, foi selecionada a opção parede rugosa, com rugosidade de 0,1 cm. O número de iterações configurado foi de no mínimo 100 e no máximo 300.

3.3.4 Solução

Para que uma simulação CFD se demonstre adequada, é preciso verificar os indicadores de convergência do modelo. Assim, é possível analisar se o modelo é capaz de apresentar resultados representativos da realidade. Níveis de convergência abaixo de $1e-4$ dos indicadores RMS indicam resultados satisfatórios (DOGAN; KASTNER, 2020; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011) e resultados acima de $1e-4$ demonstram-se pouco confiáveis. Para o processamento da solução, foi selecionada a opção de dupla precisão.

3.3.5 Pós-produção

Após a realização das simulações e de uma convergência satisfatória apresentada pelo modelo, foi iniciada a etapa de pós-processamento. Nessa etapa foi realizado o tratamento dos dados já obtidos pelas simulações. Por configuração *default* do *software*, foi possível gerar a representação gráfica dos contornos de pressão (Pa) nas superfícies desejadas.

Para a obtenção dos dados de Coeficiente de Pressão (C_p), foram inseridas as Equações 2 e 3 na opção de expressões do software, em que P_x é igual à pressão obtida pelas simulações. A massa específica do ar ρ equivale a $1,1838 \text{ kg/m}^3$ a 25°C , A velocidade de referência utilizada é a velocidade média utilizada na simulação, portanto, $2,5 \text{ m/s}$. Depois dessas etapas, tornou-se possível visualizar os coeficientes de pressão atuantes nas faces da edificação analisada.

$$C_p = \frac{P_x}{P_d} \quad (2)$$

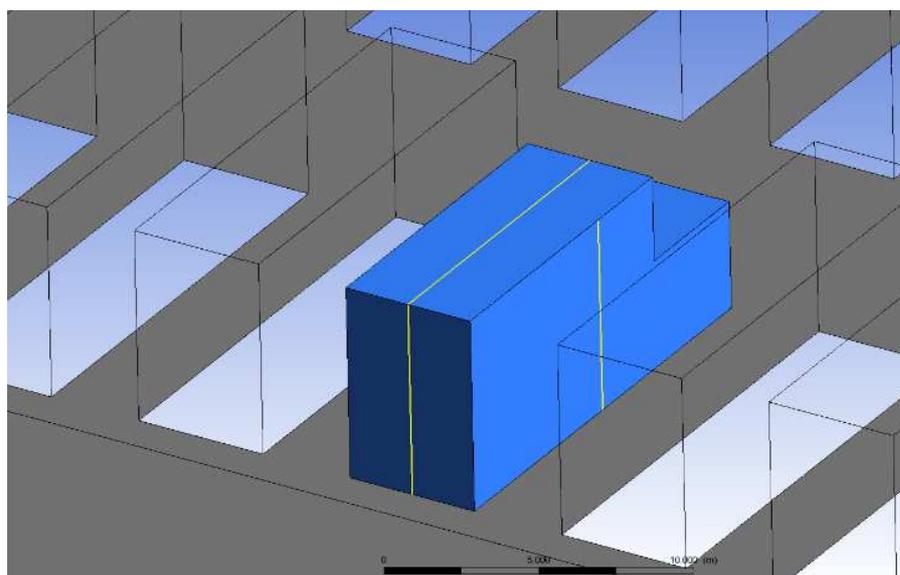
$$Pd = \frac{\rho \cdot V_{ref}^2}{2} \quad (3)$$

Sendo:

V_{ref} = Velocidade do ar tomada na mesma altura do topo do edifício (m/s)

ρ = Massa específica do ar (kg/m³)

Figura 25 - Distribuição das linhas monitores

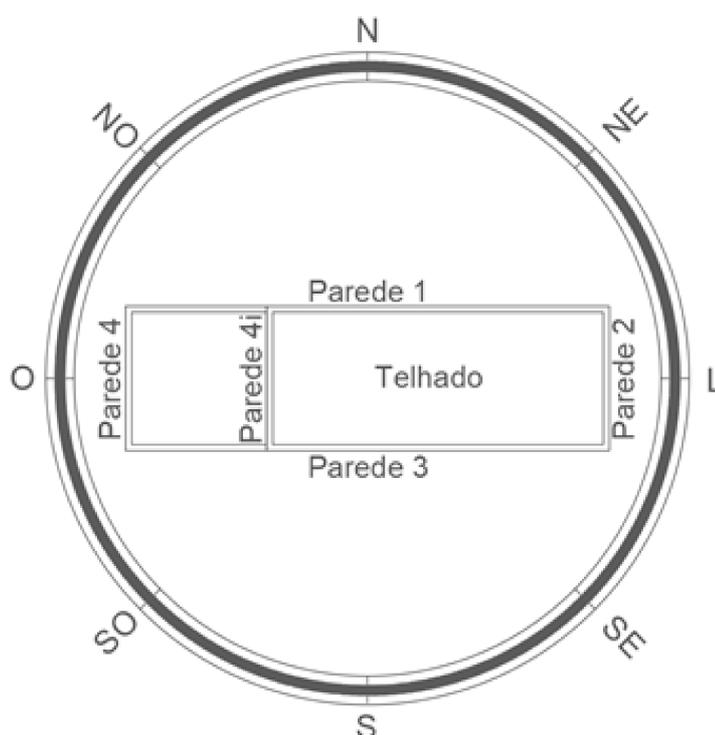


Fonte: Elaborado pelo autor.

Liddament (1986) ressalta que o coeficiente de pressão é uma média única para cada face da edificação, no qual a altura de referência de pressão para a velocidade do vento é considerada como a altura do edifício. De maneira a realizar a coleta dos coeficientes de pressão, foram criadas linhas monitores localizadas no centro das faces que representam as fachadas como mostra a Figura 25. As linhas monitores são capazes de extrair diversas amostras no percurso de uma linha. Nesse caso, foram retiradas 10 amostras por linha. Tais amostras compreenderam os dados utilizados para a obtenção da média aritmética dos coeficientes de pressão.

Foram executadas, ao todo, seis linhas de medição divididas em Parede 1, Parede 2, Parede 3, Parede 4, Parede 4i e Telhado. É possível visualizar as distribuições na Figura 26.

Figura 26 - Disposição das faces para as orientações dos ventos



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Simulações computacionais

O estudo da ventilação natural na plataforma DesignBuilder pode ser realizado de duas maneiras: programada e calculada. A ventilação programada utiliza taxas de trocas de ar por hora fixas, as quais são fornecidas pelo usuário e podem ser introduzidas quando conhecidas. A ventilação calculada leva em conta as taxas de infiltração e a ventilação natural pelas aberturas das janelas, frestas, diferenças de pressão por temperatura e por ação dos ventos. Para este estudo, portanto, a ventilação calculada foi selecionada. O arquivo climático, relativo a Porto Alegre, utilizado nas simulações de conforto foi o arquivo TRY.

3.4.1 Coeficientes de pressão CFD e AIVC

A ferramenta DesignBuilder utiliza, para as simulações, uma base de dados de Coeficientes de Pressão (C_p) de estudos realizados pelo AIVC (Air Infiltration and Ventilation Centre), os quais foram baseados na publicação de Liddament (1986) de situações padrão. Tais situações são: edificação exposta, cercada por outras edificações equivalentes à metade da altura da edificação e cercada por outras edificações de igual altura, as quais são aplicáveis para edificações com até três pavimentos de planta retangular, com inclinações de cobertura de 10° , 11° à 30° e maior que 30° . Os intervalos fornecidos são de 45° em 45° , portanto oito direções de vento: sul, sudeste, leste, nordeste, norte, noroeste, oeste e sudoeste. Esses valores de C_p não levam em consideração as influências topográficas, nem as variações do meio urbano na ventilação natural quando essas forem distintas das situações citadas por Liddament (1986). Por consequência, esses valores não levam em consideração também o impacto dos elementos sobre o conforto térmico.

Para tanto, nesta pesquisa, foi realizada uma análise comparativa da influência dos coeficientes de pressão na ventilação natural, utilizando-se de coeficientes de pressão obtidos banco de dados AIVC como parâmetro comparativo. Entre as opções disponíveis no banco de dados C_p de AIVC, foi selecionada a situação em que a edificação está cercada, protegida por edificações de mesma altura. Em seguida, estes foram comparados com os coeficientes de pressão obtidos por CFD a partir do entorno criado.

O software DesignBuilder disponibiliza padrões de inserção de coeficientes de pressão a cada 45° , conforme Figura 27. A inserção é realizada manualmente, em cada zona, na parede externa (wall), dentro da aba "openings". As paredes são identificadas de acordo com a sua orientação a partir do norte (ângulo de 0°). Cada parede externa possui uma orientação: norte (0°), Leste (90°), Sul (180°) e Oeste (270°). Entretanto, o ângulo de 0° indicado na Figura 27 corresponde aos coeficientes de pressão para ventos normais a parede escolhida. Dessa forma, por exemplo, para a inserção dos coeficientes de pressão para uma parede de orientação leste, parte-se de 90° , onde o coeficiente de pressão normal a superfície (0°) será definido pelos ventos advindos de leste (90°). Para as simulações no Design Builder, foram gerados dois modelos, um com coeficientes de pressão AIVC, nativos do software e outro com os coeficientes de pressão CFD, obtidos por simulação.

Figura 27 - Padrão de inserção dos coeficientes de pressão

Wind Pressure Coefficients	
Aspect face	1:1
Cps for Wind Angles to Surface in 45° Increments	
0° (normal to surface) (°)	0,20
45° (°)	0,05
90° (°)	-0,25
135° (°)	-0,30
180° (°)	-0,25
225° (°)	-0,30
270° (°)	-0,25
315° (°)	0,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.2 Envoltória

As paredes da habitação foram constituídas de blocos cerâmicos estruturais (14x29x19) de dois furos de 19 cm de espessura, sendo 14 cm do bloco, 2,5 cm de reboco interno e externo e 1 cm de argamassa de assentamento. A transmitância térmica adotada das paredes é a de 2,09 W/m²K. As paredes foram pintadas com cor clara, com absorvância de 0,2 e emissividade de 0,9 (ABNT, 2005).

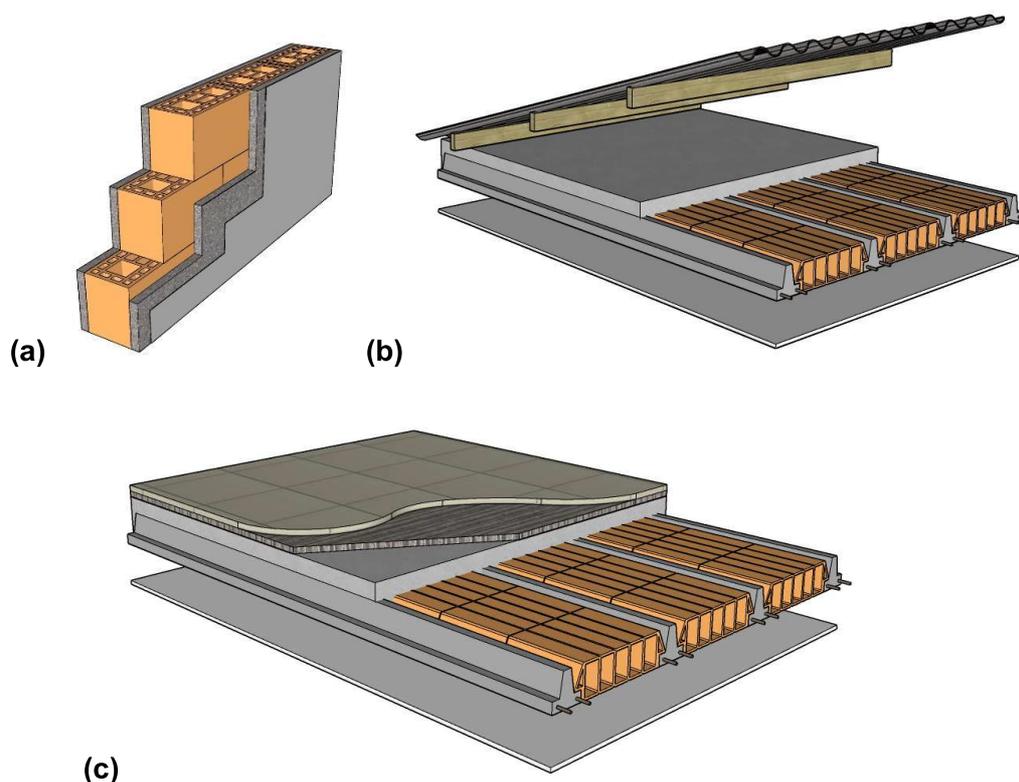
Figura 28 - Materiais dos componentes da envoltória



Fonte: Elaborado pelo autor.

A laje em contato com o solo tem sua composição formada por uma camada de 20 cm de brita de nivelamento, uma camada de 10 cm de concreto, uma camada de 3 cm de argamassa de assentamento e revestimento cerâmico de 1 cm. A laje entre pavimentos, por seu turno, foi composta por uma laje mista pré-moldada convencional em vigotas de concreto e enchimento em tabelas cerâmicas, de espessura total de 12 cm. Essa apresentou revestimento cerâmico de 1 cm e argamassa de assentamento de espessura total de 3 cm. Apresentou ainda um forro de gesso convencional de 1 cm e uma camada de ar de 20 cm entre a laje e o forro. A transmitância térmica total da laje entre pavimentos foi de $1,63 \text{ W/m}^2\text{k}$.

Figura 29 - Composições da envoltória: Paredes (a), Cobertura (b) e Laje de entre pisos (c)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A laje da cobertura também foi composta por uma laje mista de espessura total de 12 cm, com camada de 5 cm de concreto armado. A estrutura ainda conta com uma camada de ar de 20 cm e um forro de gesso convencional de 1 cm. Ao final, tem-se uma cobertura feita com telhas de fibrocimento de 0,06 cm, as quais são

consideradas escurecidas com o tempo e terão absorvância de 0,8. A transmitância da cobertura corresponde a $1,72 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3.4.3 Atividade

A edificação estudada tem uma ocupação hipotética de seis pessoas, considerando-se a ocupação máxima de duas pessoas por dormitório. Para o ambiente do *living*, integrado com a cozinha, a ocupação considerada foi composta por todos os moradores da edificação. O *schedule* para cada ambiente respeita o Tabela 9, adaptada com os dados de ocupação obtidos no regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações residenciais (RTQ-R, 2012), publicado pelo programa PBE edifica, conforme o respectivo ambiente.

Tabela 9 - Padrão de ocupação

Padrão de Ocupação					
Hora	Dormitórios		Hora	Sala/outro ambiente	
	Dias de Semana	Final de Semana		Dias de Semana	Final de Semana
1 às 7h	100%	100%	1 às 10h	0%	0%
8 às 9h	0%	100%	11h	0%	25%
10h	0%	50%	12h	0%	75%
11 às 20h	0%	0%	13h	0%	0%
21h	50%	50%	14h	25%	75%
22 às 24h	100%	100%	15 às 17h	25%	50%
			18h	25%	25%
			19h	100%	25%
			20 às 21h	50%	50%
			22 às 24h	0%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado da RTQ-R (2012).

3.4.4 Ganhos de calor interno pela iluminação e equipamentos

O padrão de iluminação seguiu os mesmos moldes que a ocupação, indicando diferentes horários para dias úteis e para finais de semana. A potência instalada foi de 6 W/m^2 , correspondendo a $3 \text{ W/m}^2\text{-}100\text{lux}$. O padrão de iluminação respeitou o disposto no Tabela 10 para o respectivo ambiente.

Tabela 10 - Padrão de iluminação

Padrão de iluminação					
Hora	Dormitórios		Hora	Sala / Outro Ambiente	
	Dias de Semana	Finais de Semana		Dias de Semana	Finais de Semana
1 às 6h	0%	0%	1 às 10h	0%	0%
7h	100%	0%	11h	0%	100%
8h	0%	0%	12h	0%	100%
9h	0%	100%	13 às 16h	0%	0%
10h às 20h	0%	0%	17 às 21h	100%	100%
21 às 22h	100%	100%	22 às 24h	0%	0%
23 às 24h	0%	0%			

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado da RTQ-R (2012).

Para os ganhos de calor interno por equipamentos, assumiu-se um período de utilização de 24 horas. A potência instalada de todos os equipamentos internos corresponde a $1,5 \text{ W/m}^2$, seguindo dados obtidos no RTQ-R.

3.4.5 Aberturas

As esquadrias consideradas foram as de correr, com abertura de 50% de sua área, seguindo as dimensões do projeto. A área efetiva de ventilação correspondeu a 50% desse valor. Os vidros eram monolíticos de 6 mm, incolores e com transmitância de $6,12 \text{ W/m}^2\text{K}$. O coeficiente de ganho de calor solar do vidro incolor correspondeu a 0,81 (WESTPHAL, 2007). Os montantes das esquadrias eram de alumínio, na cor branca.

No modelo da simulação, os dispositivos de sombreamento externos foram desprezados da análise da ventilação, pelo fato de o programa não considerar a influência desses fatores no comportamento da ventilação. As portas internas e externas eram de madeira maciça com área efetiva de ventilação de 90% da área.

3.4.6 Estratégia de ventilação

Como o objetivo desta pesquisa é o de avaliar a influência do contexto, apenas um modelo de ventilação foi avaliado. Esse foi constituído por uma ventilação natural seletiva diurna com dois *schedules* diferentes. Para o período de resfriamento, compreendido entre 21/9 e 20/3, a rotina de abertura corresponde aos horários de

abertura entre 7 e 20h. Para o período de aquecimento, compreendido entre 21/3 e 20/9, a rotina compreende aos horários de 8 e 17h.

A ventilação considerada foi constante durante os horários de ventilação, sem nenhum tipo de controle, evitando interferências. As infiltrações pelas aberturas e frestas da edificação foram desativadas para este estudo. O valor adotado para o coeficiente de descarga foi de 0,78, considerando-se o tamanho das aberturas como médias, e seguindo, assim, a recomendação de Freixanet e Viqueira (2004) para aberturas padrão.

3.5 Critérios para análises dos resultados

O parâmetro utilizado para a verificação do conforto foi a temperatura operativa horária. Como o método da ASHRAE 55 (2017) avalia o conforto térmico a partir da temperatura operativa do ambiente, essa foi considerada como dado a ser avaliado. A temperatura operativa é calculada conforme o apêndice J da ASHRAE 55 (2017), presente no Tabela 11. O valor para A escolhido é 0,5, ou seja, a velocidade do ar equivale a 0,2 m/s, levando-se em conta as possíveis correções do limite superior da zona de conforto com o aumento da velocidade do ar.

Os limites superiores e inferiores para aceitabilidade de 80% da temperatura operativa foram calculados conforme equações da norma da ASHRAE 55 (2017). Para um limite de 90% de aceitabilidade, foram adicionados 1° C ao limite inferior e subtraído 1° C ao limite superior (DE VECCHI et al., 2015). Esses limites de temperatura são utilizados para atividades metabólicas entre 1,0 met a 1,3 met (60W/m² a 75W/m²), correspondente a atividades leves, e níveis de vestimenta de 0,5 clo para períodos quentes e de 1,0 clo para períodos frios.

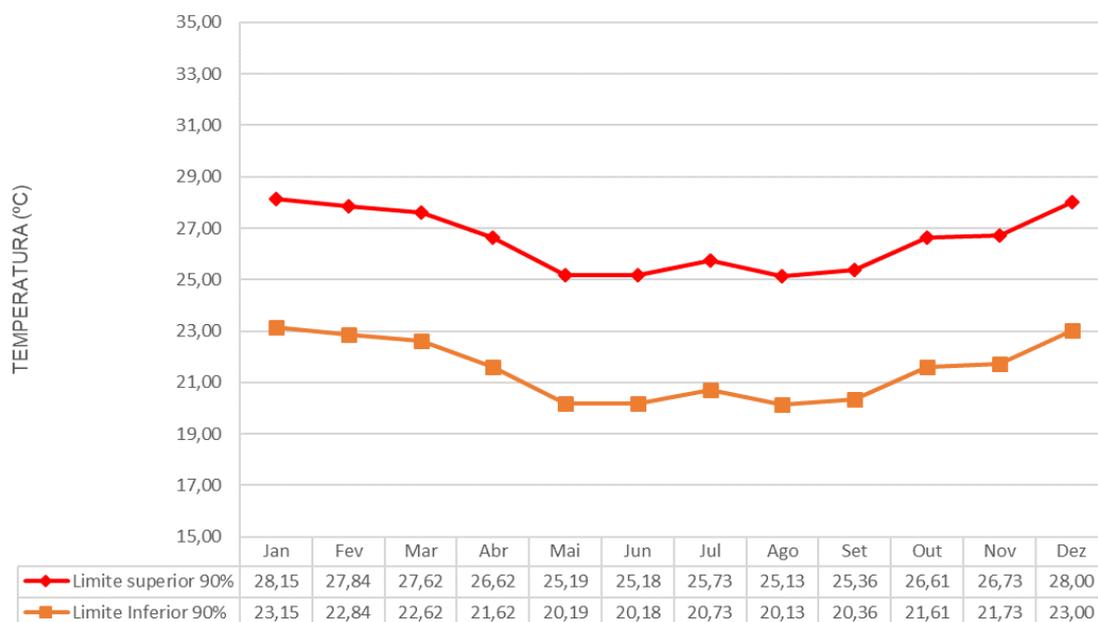
Tabela 11 - Resumo de equações e parâmetros dos limites de conforto para edificações ventiladas naturalmente

Método ASHRAE 55 (2017) para limites de conforto para edificações de ventilação natural controlada pelo ocupante				
Limite superior de aceitabilidade de 80% (° C) :		0,31 T _{pma(out)} +21,3		
Limite inferior de aceitabilidade de 80% (° C) :		0,31 T _{pma(out)} +14,3		
Temperatura operativa :		T _o = A.T _a +(1-A)T _r		
Tabela A: Valores para A			T_{pma} = Temperatura externa média predominante T_o = Temperatura operativa T_a = Temperatura média do ar T_r = Temperatura média radiante A = Constante de acordo com tabela "A"	
Velocidade do ar	0,2 m/s	0,2 a 0,6 m/s		0,6 a 1,0 m/s
Valor de A	0,5	0,6		0,7
Tabela B: Parâmetros da velocidade média do ar para aumento do limite superior de aceitabilidade de 80%				
0,6 m/s	0,9 m/s	1,2 m/s		
1,2 ° C	1,8 ° C	2,2 ° C		

Fonte: ASHRAE 55 (2017)

Os dados para a determinação dos limites de conforto foram obtidos a partir do arquivo TRY de Porto Alegre. Estes limites foram determinados a partir da média aritmética das temperaturas médias externas, correspondente aos 30 dias subsequentes ao dia do mês da análise. O Gráfico 1 demonstra os dados obtidos.

Gráfico 1 - Limites de temperatura de conforto para a cidade de Porto Alegre pelo arquivo climático TRY seguindo as recomendações da ASHRAE 55



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de análise do estudo compreende o período que vai de 21/9 a 20/3 para análise dos graus hora de resfriamento. Para os graus de hora de aquecimento, foi considerado o período compreendido entre 21/3 e 20/9. Desses períodos, foram geradas temperaturas operativas e taxas de ventilação para verificação dos contrastes obtidos pelas simulações do modelo AIVC e do modelo CFD.

4 RESULTADOS

Os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho consideraram a influência da inserção de coeficientes de pressão (C_p), obtidos através de simulações de fluido dinâmica computacional (CFD), nas simulações de conforto térmico em uma edificação habitacional em um contexto urbano específico. Para tanto, foi traçada uma análise comparativa entre os dados de C_p de AIVC para situações de contexto em que a edificação analisada está cercada por edificações de mesma altura, e, entre uma pequena variação de contexto hipotético, criado pelo autor.

Para a análise de conforto térmico, o modelo adotado sofreu somente alterações de direções em relação aos pontos cardeais, sem mudanças nas características construtivas. Dessa forma, são apresentados os resultados das simulações CFD e as simulações para os períodos de resfriamento e de aquecimento.

4.1 Simulação CFD

4.1.1 Convergência dos modelos

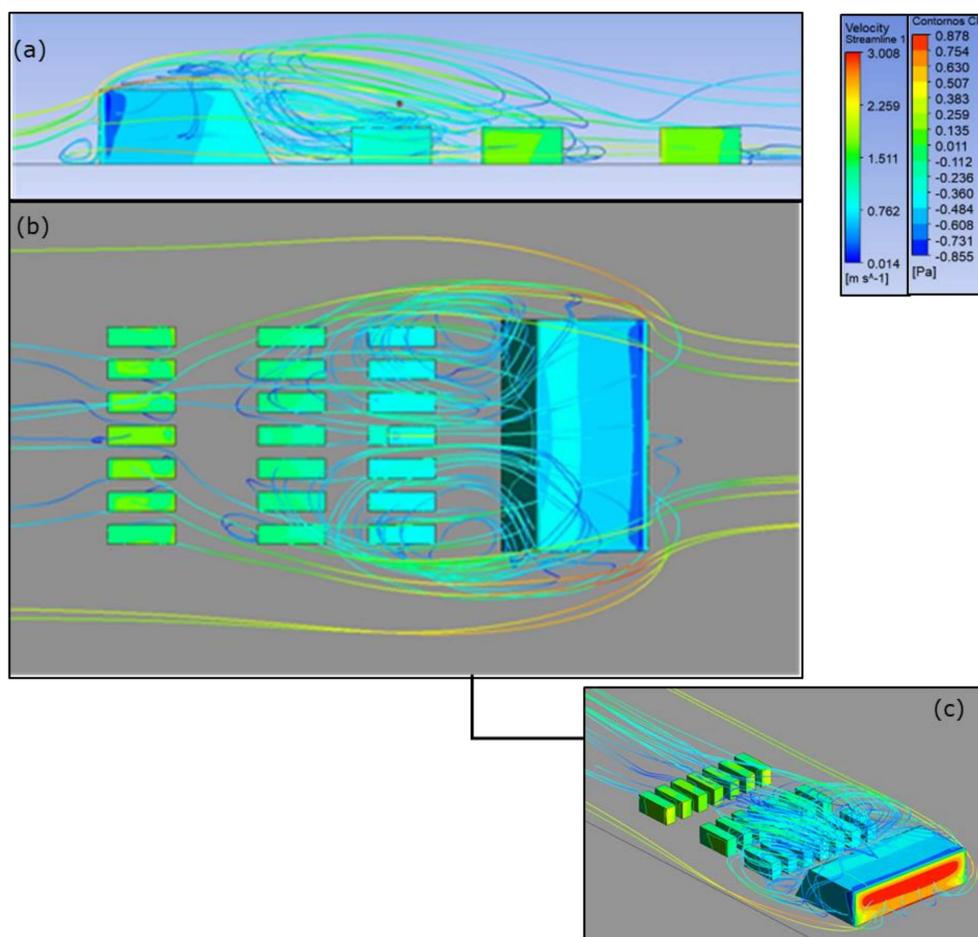
Em uma simulação CFD, a solução é considerada convergida quando todos os critérios são atendidos. Para este estudo, foi adotado o mesmo critério encontrado na literatura, segundo o qual os residuais médios (RMS) devem encontrar-se abaixo de $1.0e-4$ (DOGAN; KASTNER, 2020, CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Os gráficos dos residuais médios podem ser encontrados no Anexo E.

4.1.2 Análise dos efeitos aerodinâmicos resultantes na edificação

Ao observar os fluxos do vento ao redor das edificações do contexto em cada direção do vento, pode-se verificar a coerência dos resultados e se esses corroboram a teoria apresentada. Para a análise, foram gerados gráficos de linhas de fluxo, que ilustram o fluxo do vento após sua incidência nas edificações do contexto e na edificação analisada. As colorações azuis das linhas de fluxo indicam uma menor velocidade do vento, enquanto as avermelhadas indicam maiores velocidades. As hachuras presentes nas edificações e nos obstáculos indicam os coeficientes de

pressão atuantes naquele ponto específico das edificações e obstáculos respectivamente.

Figura 30 - Vistas do fluxo de vento para o vento leste: (a) vista norte, (b) vista de topo e (c) perspectiva

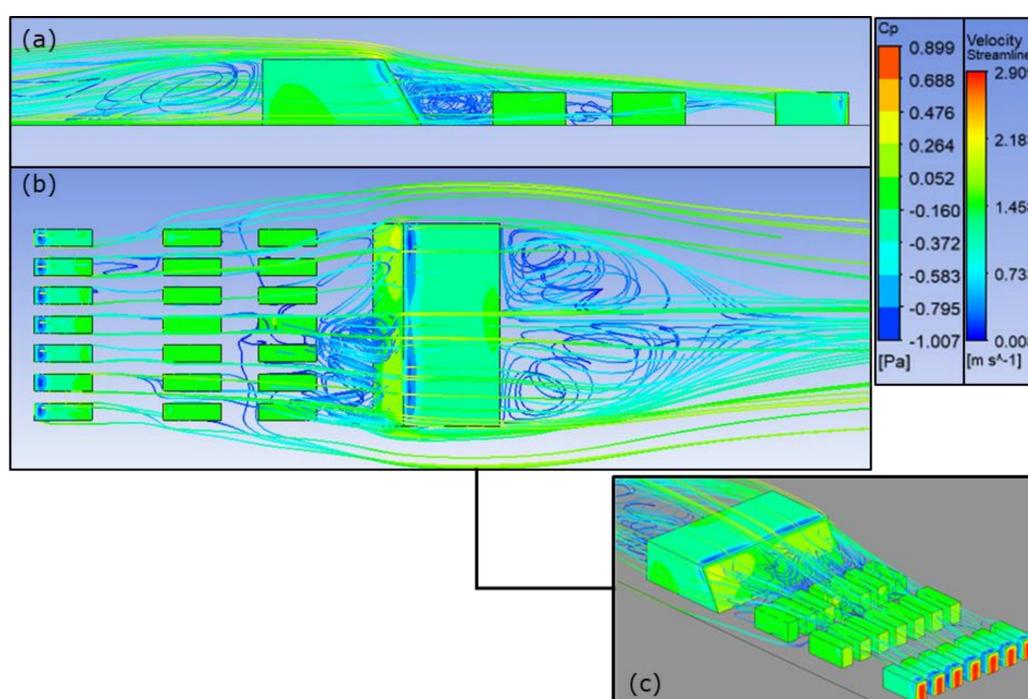


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 30, que representa a simulação do vento leste, verifica-se a ocorrência dos fenômenos aerodinâmicos apresentados nesta dissertação. A leste, quando há o contato do vento com o obstáculo que representa uma barreira, considerado nesta dissertação como um elemento topográfico do contexto, são gerados fenômenos de turbulência na região de esteira. O vento, ao incidir nesse elemento, causa linhas de escoamento que são forçadas a passar ao redor do obstáculo, criando zonas de baixa pressão. Nesse momento, na vista de topo, nota-se uma aceleração do escoamento nas laterais do obstáculo. Na região posterior da barreira, vórtices verticais e horizontais são gerados e configuram uma região de esteira bem definida. No centro do contexto, próximo à edificação-alvo desta análise,

há uma aceleração do escoamento entre os dois grandes vórtices que são notados na vista de topo. Tal aceleração pode configurar um efeito de golpe, dependendo da turbulência do meio. Ademais, salienta-se que há um grande impacto na velocidade do vento na região posterior do obstáculo topográfico. O reencontro dos fluxos de vento ocorre somente na última fileira de edificações presentes no contexto. Essa barreira pode, portanto, impactar diretamente na qualidade da ventilação da edificação em análise para quando o vento for de orientação leste.

Figura 31 - Vistas do fluxo de vento para o vento oeste: (a) vista norte, (b) vista de topo e (c) perspectiva

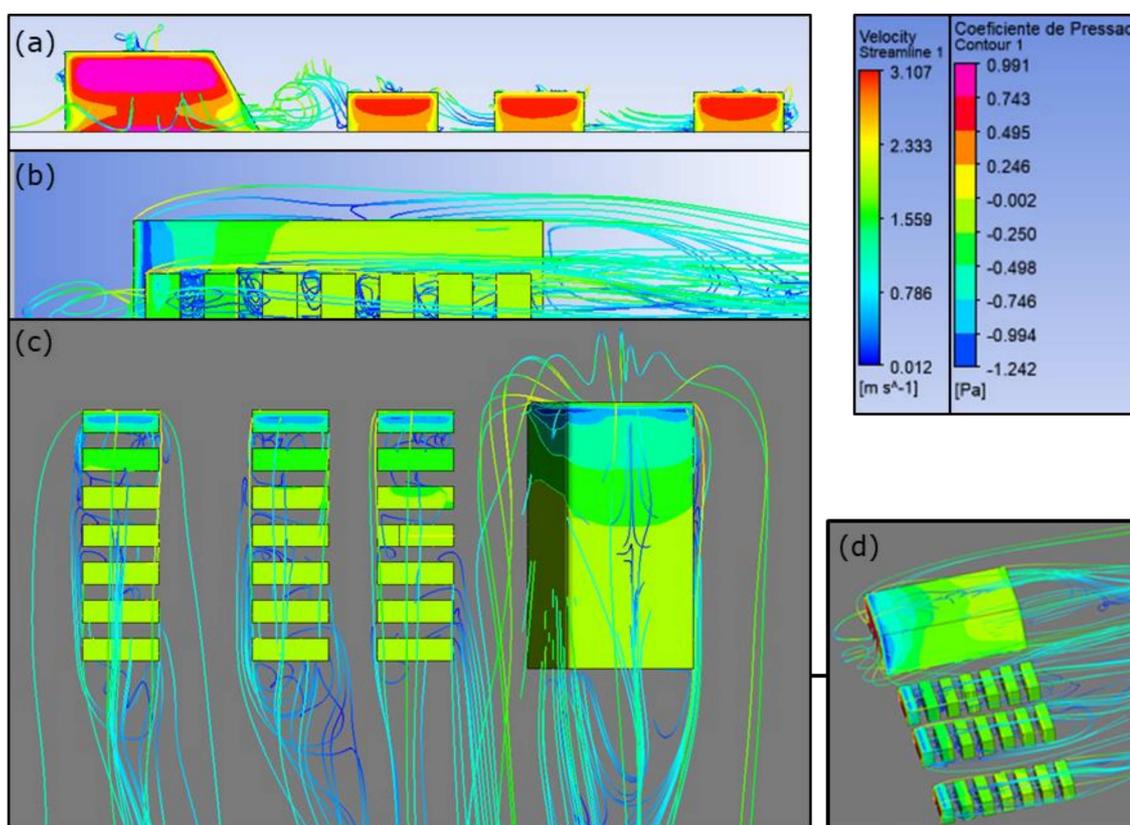


Fonte: Elaborado pelo autor.

A oeste, examina-se um regime de fluxo de vento menos perturbado no seu caminho até atingir a edificação em análise, muito devido a menor rugosidade que apresenta o contexto ao vento de orientação oeste. Verifica-se, na vista norte, que a primeira fileira de edificações atingida atua quase que em regime de escoamento isolado, perturbando pouco a segunda fileira de edificações. Já entre a segunda e terceira fileira atingidas há um regime de interferência de esteira entre as fileiras. Entretanto, o fator de maior influência aparenta ser a deflexão vertical do vento que ocorre após sua incidência no obstáculo mais alto do contexto. Essa barreira acaba por captar boa parte do fluxo não perturbado do vento, muito em função da baixa

rugosidade do contexto, e direcioná-lo para baixo criando um vórtice de pé de fachada. Esse vórtice afeta diretamente o escoamento a leste da edificação-alvo da análise. Também, devido à baixa rugosidade do contexto, há uma maior sensibilidade às ações do vento de orientação oeste e, portanto, há uma tendência de que ocorram pressões positivas nas faces voltadas para essa orientação. Destaca-se a variação entre as hachuras dos coeficientes de pressão entre as orientações leste e oeste, em que há uma indicação de pressões negativas na região de sotavento para quando a orientação do vento for leste. Por outro lado, para quando a orientação é oeste, têm-se, em sua maior parte, pressões positivas.

Figura 32 - Vistas do fluxo de vento para o vento norte: (a) vista norte, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva

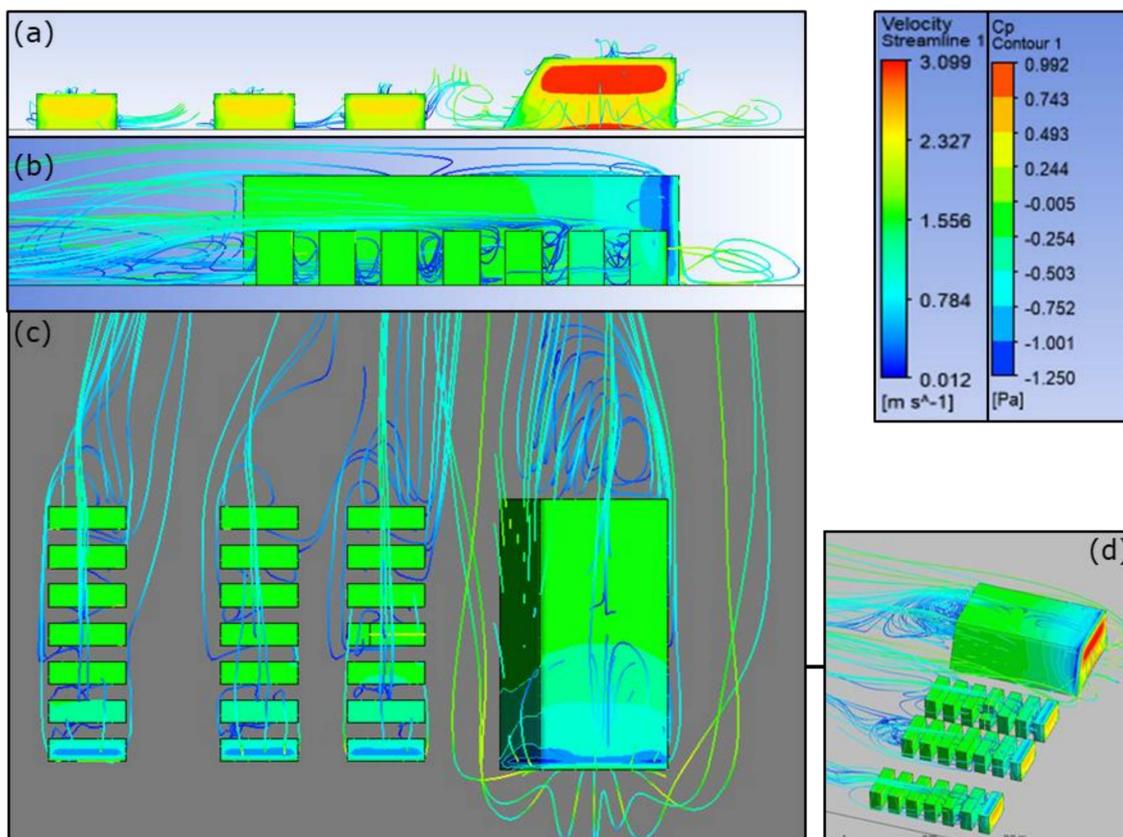


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na orientação de vento norte, as linhas de fluxo ilustram um efeito de canalização entre as fileiras das edificações e o elemento topográfico do contexto. Entre o elemento topográfico e a fileira de edificações do contexto, por sua vez, há um fluxo acelerado, que, por consequência, gera um fenômeno de sucção nos espaços entre as fileiras de edificações, como pode ser visualizado na vista de topo. Destaca-

se, na vista oeste, a ocorrência de um regime de escoamento deslizante, no qual há uma barreira sequencial dos ventos que acaba por gerar vórtices estáveis entre elas. Esses só são perturbados pelo fenômeno de sucção que ocorre nas laterais das fileiras de edificações.

Figura 33 - Vistas do fluxo de vento para o vento sul: (a) vista sul, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva

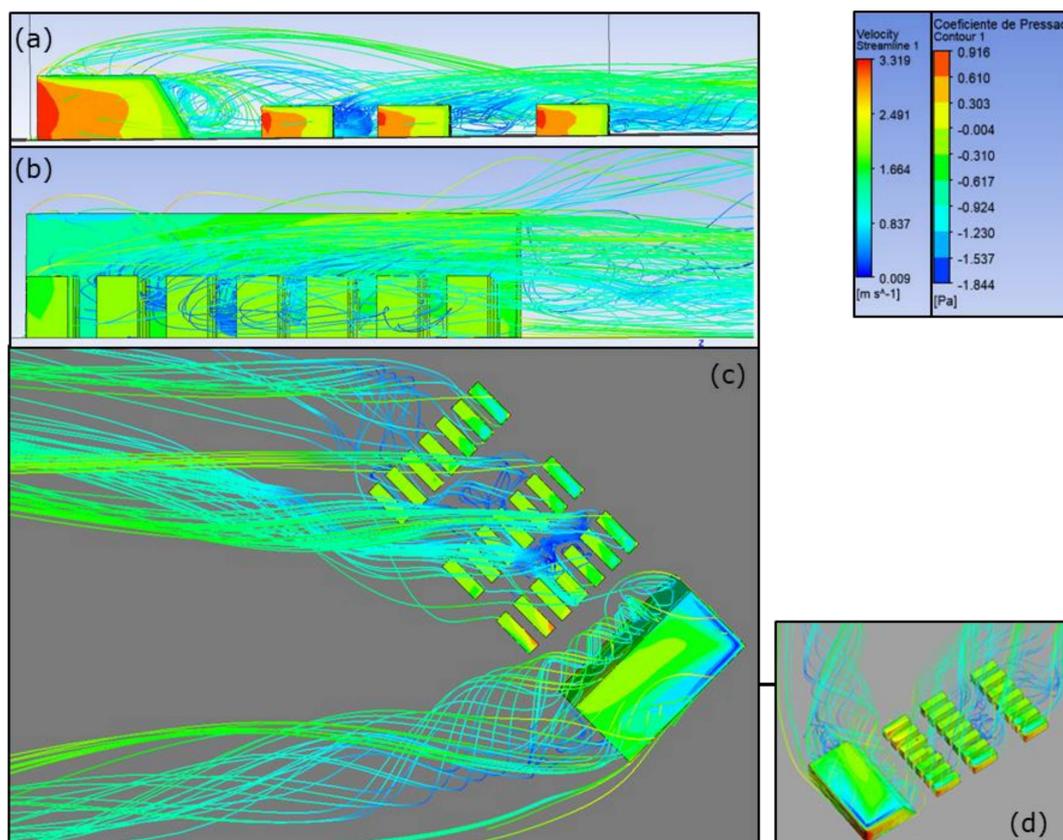


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os ventos de orientação sul, observam-se fenômenos similares aos de orientação norte: ocorre o efeito de canalização por entre as fileiras de edificações do contexto, onde há a sucção dos vórtices. Nota-se que a zona de maior pressão, onde há incidência direta do vento no contexto, localiza-se a uma aproximadamente de dois terços da altura. Já no topo do elemento topográfico, em virtude de seu grande comprimento posicionado em paralelo ao vento, vê-se a ocorrência de pontos de recombinação, nos quais há o descolamento do vento a partir do ponto de separação no topo e a recombinação muito próxima ao centro da face do topo. Para os ventos

vindos de norte e de sul foram encontrados valores similares de velocidade do escoamento e de coeficientes de pressão nas faces do contexto.

Figura 34 - Vistas do fluxo de vento para o vento nordeste: (a) vista norte, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva

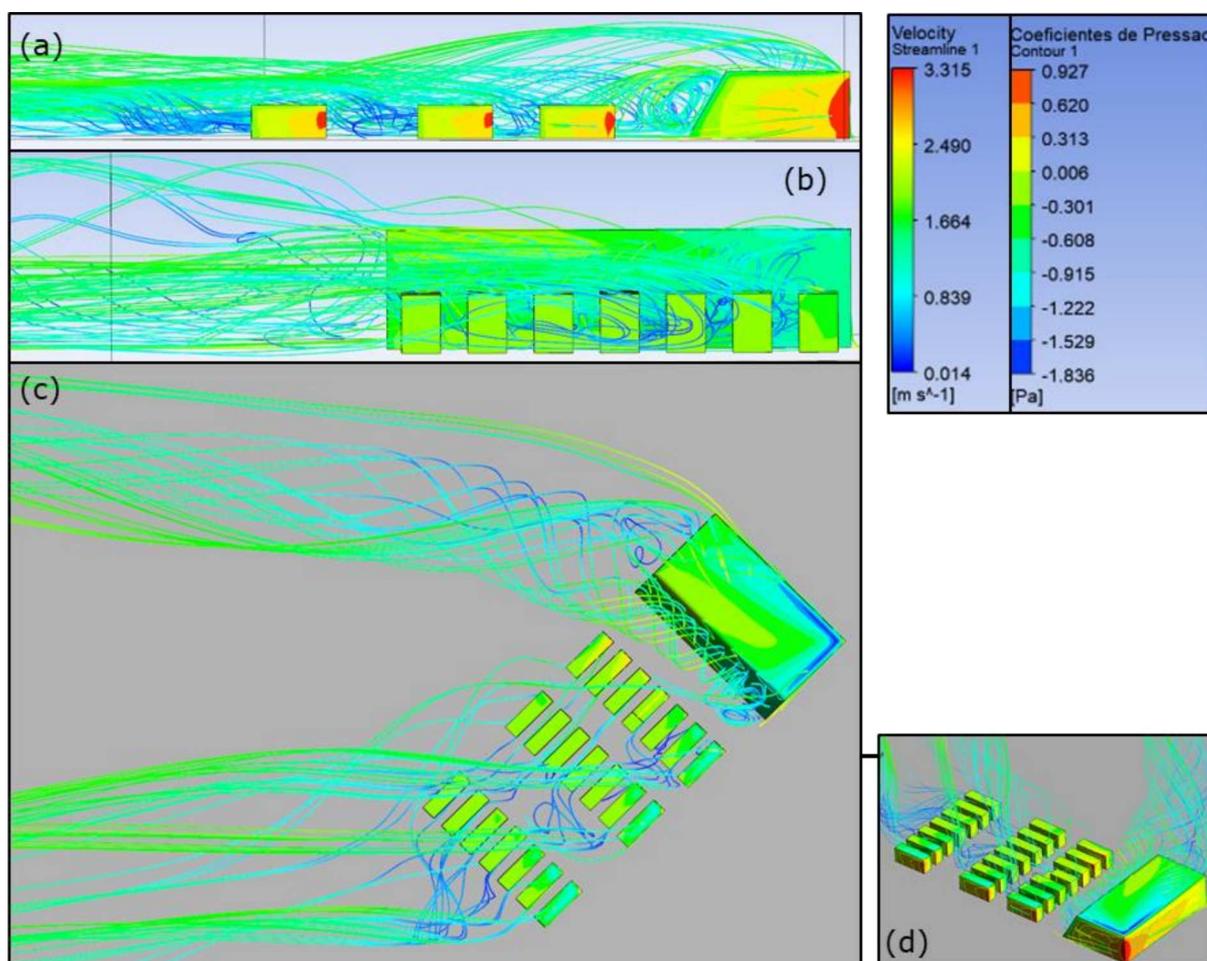


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ventos advindos de nordeste apresentam uma incidência direta dos ventos na edificação. Pelo posicionamento do contexto, oblíquo à direção do vento, percebe-se que há uma influência direta dos ventos na aresta nordeste da habitação. Há, ainda, a formação de um vórtice na região a sotavento da barreira topográfica, porém esse vórtice é desviado e canalizado pela rua, não afetando diretamente a edificação-alvo. Dessa forma, há uma menor influência do volume topográfico na ventilação da edificação em análise. Destaca-se também a formação de um vórtice a sotavento da habitação, o qual configura uma zona de sucção que atua principalmente nas faces de orientação sul e sudeste da habitação.

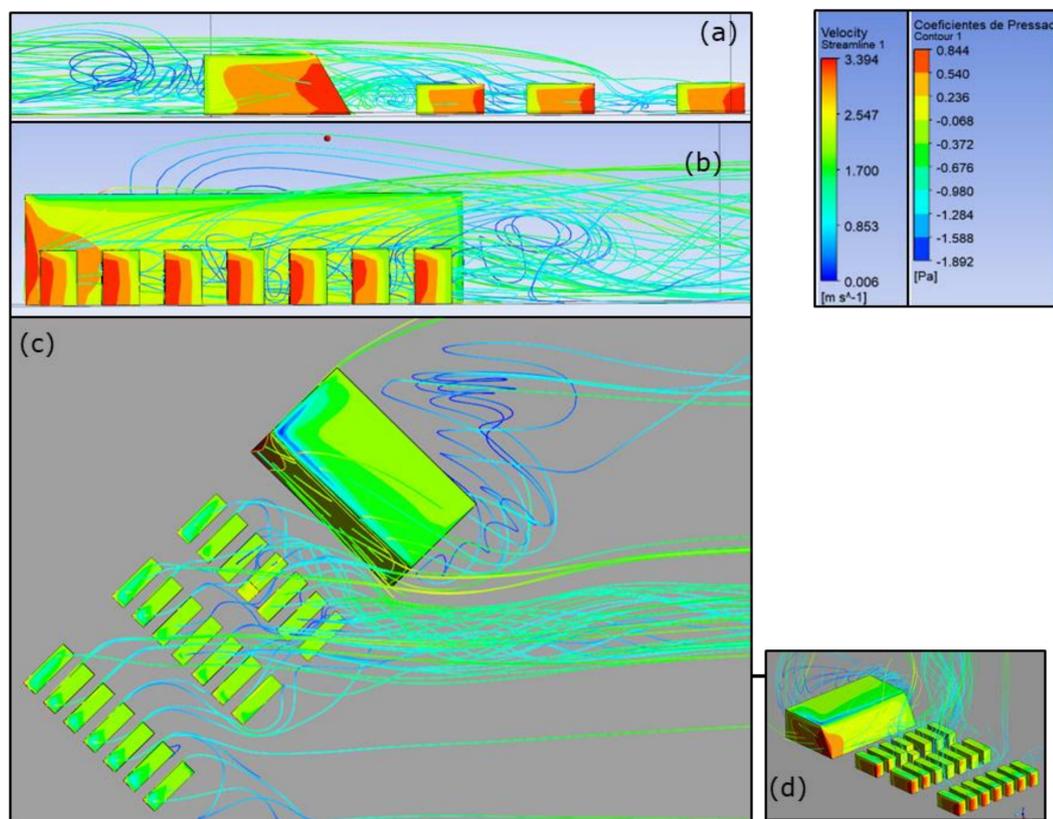
Nos estudos realizados para ventos advindos de sudeste, resultados similares de coeficientes de pressão e velocidade do escoamento foram encontrados. Aqui também ocorrem os fenômenos demonstrados para orientação oeste, essencialmente pela disposição similar das edificações. Nota-se a ocorrência também em ambas as orientações de um descolamento do fluxo que incide no obstáculo topográfico e desvia em direção à habitação.

Figura 35 - Vistas do fluxo de vento para o vento sudeste: (a) vista sul, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Vistas do fluxo de vento para o vento noroeste: (a) vista norte, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva



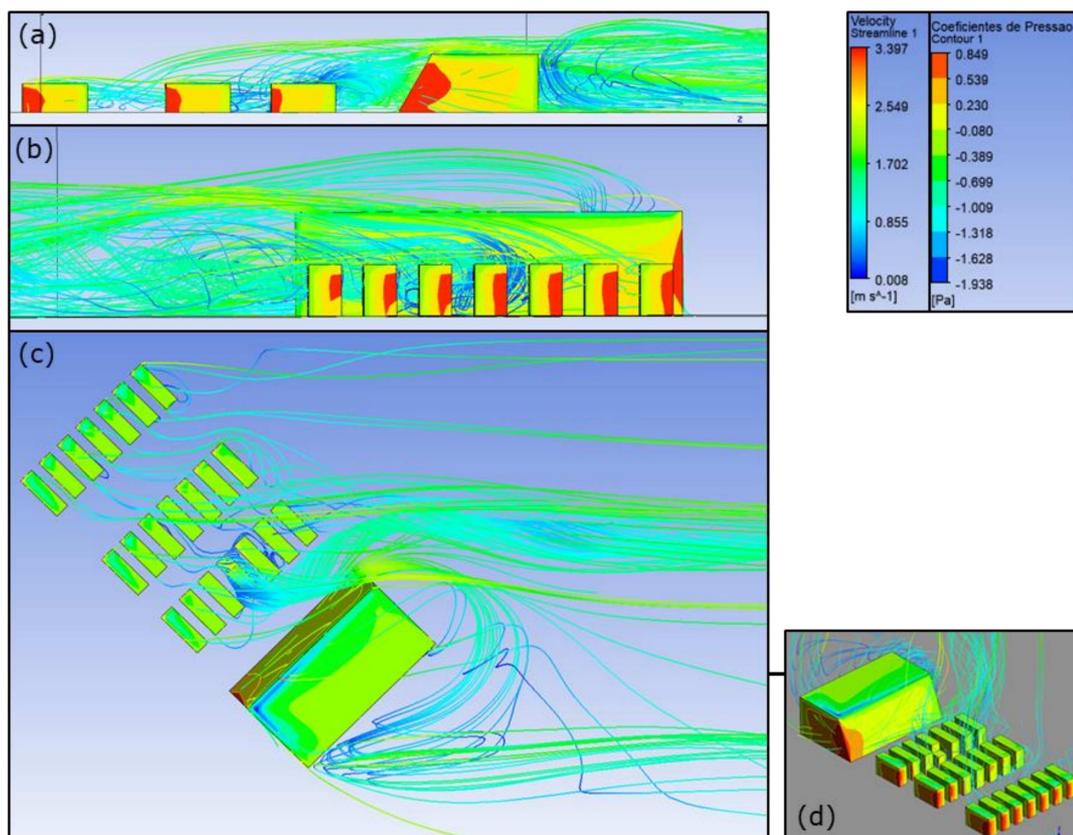
Fonte: Elaborado pelo autor.

Por último, nas orientações noroeste e sudoeste, o posicionamento das edificações do contexto oblíquas aos ventos acaba por mitigar a ação desses ventos, mesmo com a baixa rugosidade e alta permeabilidade do contexto. Desse modo, o vento que incide e é desviado por entre as edificações, acaba barrado pelas edificações sequencialmente, as quais agem como defletores de vento, até atingir a habitação. Ocorre, portanto, uma desaceleração do vento entre as edificações e uma diminuição da velocidade até a habitação. Pelo fato de o segundo pavimento da edificação possuir um recuo a oeste em relação ao primeiro pavimento, haverá uma incidência maior dos ventos, já que se constata aumento do espaço entre o contexto e a habitação. Nesse caso, a tendência será de uma zona de pressões negativas nas faces da edificação, excetuando-se as paredes a oeste que são mais afetadas pelo fluxo.

Ao analisar o fluxo ao redor da habitação em exame, destaca-se a baixa velocidade do vento. Na maioria das situações, as velocidades apresentadas

demonstraram-se inferiores a 1 m/s, sendo, portanto, enquadradas como ventos leves na escala de Beaufort.

Figura 37 - Vistas do fluxo de vento para o vento sudoeste: (a) vista sul, (b) vista oeste, (c) vista de topo e (d) perspectiva



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dessa análise, é possível verificar que, em um plano geral, há uma combinação de diferentes tipos de escoamento que se associam em um resultado particularmente complexo, no qual dependem diretamente da direção do vento assim como do contexto e da topografia local. Assim, a análise dos fluxos de vento é necessária para a verificação dos resultados dos coeficientes de pressão e se estariam corroborando o fluxo apresentado. Portanto, os resultados apresentados na próxima seção devem ser coerentes com os apresentados nesta.

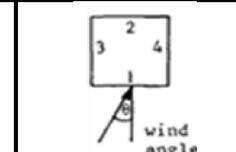
4.1.3 Coeficientes de pressão

Como mencionado anteriormente, os coeficientes de pressão são dados adimensionais que fazem parte das equações dos algoritmos que participam da simulação térmica de uma edificação. Existem recursos, como as tabelas de dados de C_p da AIVC, que apresentam esses dados para cada direção do vento em situações específicas de contexto.

Na Tabela 12, observa-se uma adaptação da tabela AIVC para situações em que a edificação em análise está cercada por edificações de mesma altura, com a cobertura com menos de 10° de inclinação e a proporção da edificação em 1:1, ou seja, um cubo. Aplica-se esse recurso somente para edificações de até três pavimentos.

Tabela 12 - Coeficientes de pressão: (a) resultados da simulação CFD e (b) Coeficientes de pressão AIVC

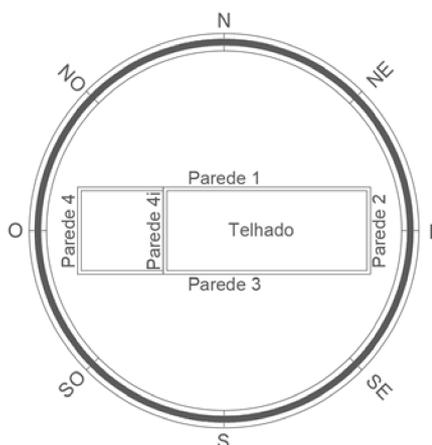
		Direção do Vento							
	Face	Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
(a) Simulação CFD	Parede 1 (0°)	-0,21	-0,21	-0,44	-0,12	-0,15	-0,07	0,05	-0,10
	Parede 2 (90°)	-0,16	0,06	-0,43	0,04	-0,15	-0,11	0,05	-0,10
	Parede 3 (180°)	-0,16	-0,12	-0,44	-0,17	-0,20	-0,12	0,03	-0,10
	Parede 4 (270°)	-0,19	-0,18	-0,15	-0,15	-0,18	-0,06	0,03	-0,05
	Parede 4i (270°)	-0,19	-0,21	-0,22	-0,19	-0,19	-0,01	0,05	0,02
	Telhado	-0,19	-0,18	-0,42	-0,17	-0,18	-0,13	0,04	-0,14
(b) C_p AIVC (Liddament, 1986)	Localização	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
	Face 1	0,20	0,05	-0,25	-0,30	-0,25	-0,30	-0,25	0,05
	Face 2	-0,25	-0,30	-0,25	0,05	0,20	0,05	-0,25	-0,30
	Face 3	-0,25	0,05	0,20	0,05	-0,25	-0,30	-0,25	-0,30
	Face 4	-0,25	-0,30	-0,25	-0,30	-0,25	0,05	0,20	0,05
	Telhado ($<10^\circ$)	-0,50	-0,50	-0,40	-0,50	-0,50	-0,50	-0,40	-0,50



Fonte: Adaptado de Liddament (1986).

Os dados da tabela AIVC demonstram que grande parte dos coeficientes, à exceção daqueles que representam ventos normais à superfície, isto é, perpendiculares a ela, indicam coeficientes de pressão negativos ou próximos a zero. Isso deve-se ao fato de que a edificação está abrigada do vento pelo contexto, diminuindo a pressão positiva a barlavento e decrescendo ainda mais naquelas que estão a sotavento da edificação em análise. O telhado, nessa situação, devido a sua baixa inclinação e forma pouco aerodinâmica, sofre pressões negativas em função do descolamento do fluxo acelerado que se distancia da superfície desse. Nota-se que, ao partir da orientação do vento que é normal à face, os coeficientes se repetem de maneira idêntica para cada uma delas. A Tabela 12 demonstra, portanto, dados pouco sensíveis dos dados AIVC a diferenças de contexto, de forma que, para as outras orientações de vento, os dados são apenas replicados.

Figura 38 - Disposição das faces de acordo com a orientação do vento



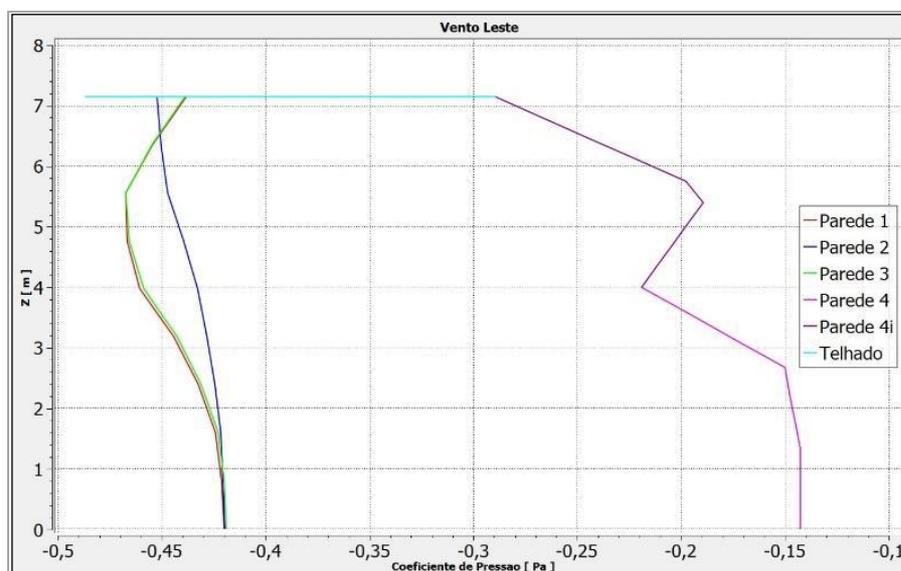
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes de pressão obtidos nas simulações CFD levam em consideração a especificidade do contexto, visto que são dados coletados diretamente na face de uma edificação inserida em um contexto específico. Entretanto, há similaridades entre os resultados de C_p CFD e os dados C_p AIVC, já que são, em sua maioria, negativos. Isso corrobora o fato de a habitação estar cercada por outras edificações que afetam os escoamentos do vento no entorno. Esses diferem, no entanto, quando a relação entre as pressões do vento nas faces normais à orientação do vento é examinada. Nessa situação específica, os valores AIVC chegam a um C_p de 0,20. Os dados de C_p CFD, por exemplo, apresentam valores de -0,43 quando o

vento é normal a “Parede 2”, ou seja, vento na direção leste. Esse resultado demonstra coerência com a questão de a habitação estar protegida pela barreira topográfica, diferentemente dos coeficientes de pressão AIVC para a mesma orientação.

Na orientação leste vê-se que, apesar de a “Parede 2” estar a barlavento, o coeficiente é negativo, claramente influenciado pelo volume de maior expressão localizado à leste. Na Figura 39, verifica-se a grande influência desse nas Paredes 1, 2 e 3, e uma pressão superior, ainda que negativa, na Parede 4 a sotavento. Esse volume pode ser considerado, portanto, de bastante influência quando os ventos são oriundos de leste.

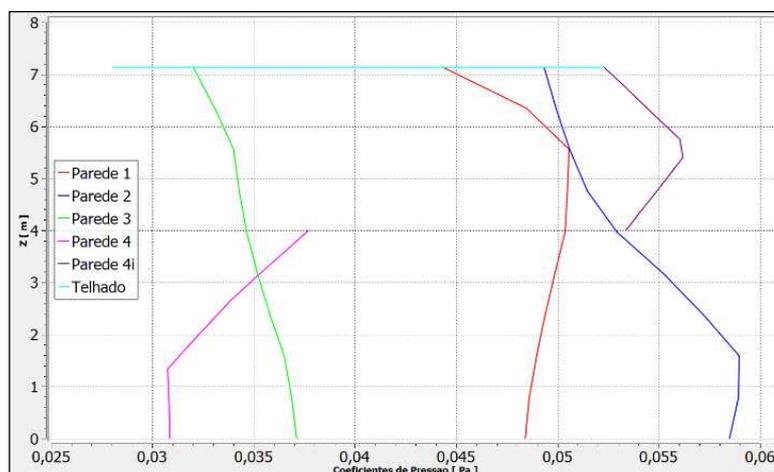
Figura 39 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento leste



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para quando os ventos são provenientes de oeste, os coeficientes de pressão de todas as faces são positivos, porém, próximos a zero. Tal fenômeno ocorre, pois, há uma pouca rugosidade do contexto voltada para oeste, e há a canalização do vento entre as edificações. Contudo, o coeficiente positivo apresentado na “Parede 2”, ocorre, pois, há um vórtice de pé de fachada, ocasionado pelo volume topográfico que acaba captando e defletindo a direção do vento para baixo e gerando uma zona de turbulência e pressões positivas na face a sotavento. Apesar dos coeficientes serem positivos, estão próximos de zero, indicando uma coerência por estarem bem protegidos a nível do solo pelo entorno.

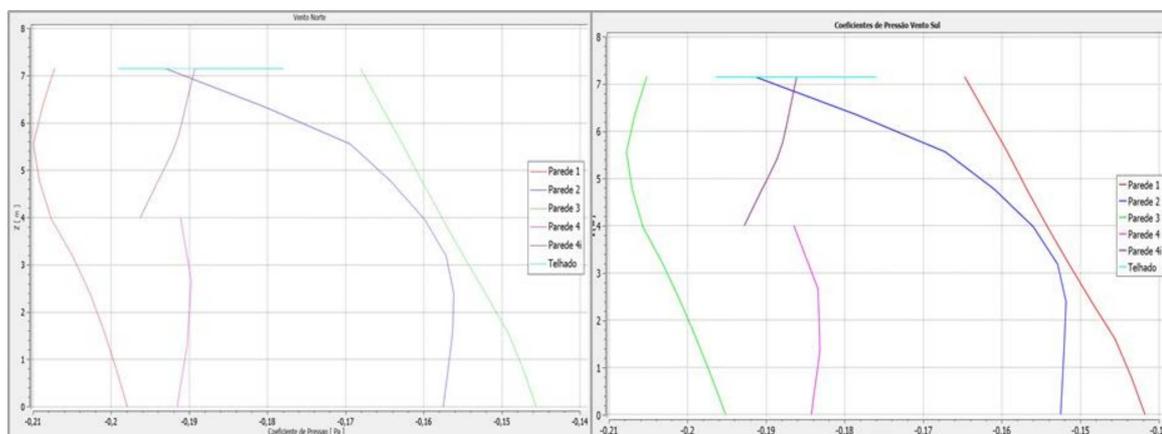
Figura 40 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento oeste



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas orientações nordeste e sudeste, é possível visualizar coeficientes positivos ocasionados pelos ventos oblíquos à “Parede 2”. Como mencionado no capítulo anterior, isso ocorre pois o vento, nessas orientações, incide com menor influência do volume topográfico principalmente na aresta da “Parede 2”. Essas, então, distribuem-se lateralmente e decrescem ao longo da fachada. Os demais coeficientes, a sotavento, apresentam valores negativos, como esperado.

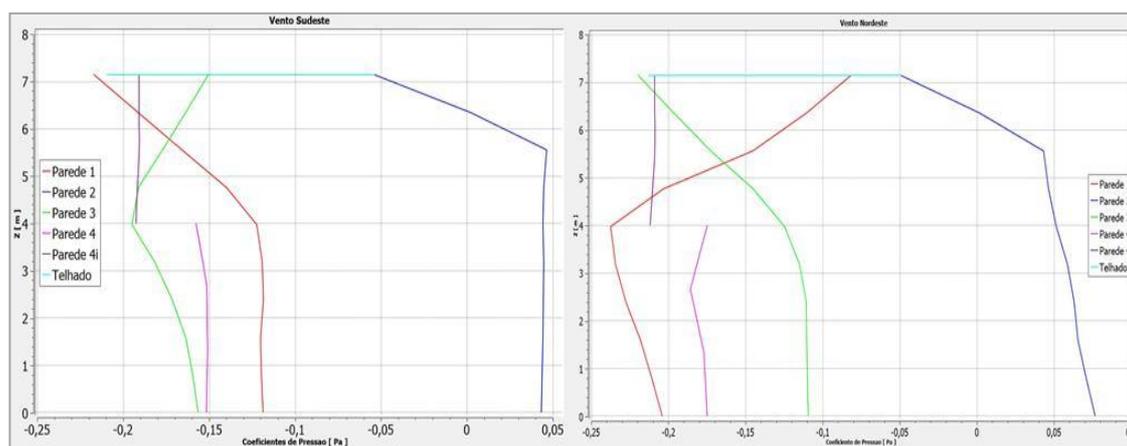
Figura 41 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento norte e sul respectivamente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes de pressão com valores negativos predominaram em todas as faces nos ventos provenientes de norte e sul. O pequeno afastamento entre as edificações cria barreiras que impedem uma influência da incidência direta do vento.

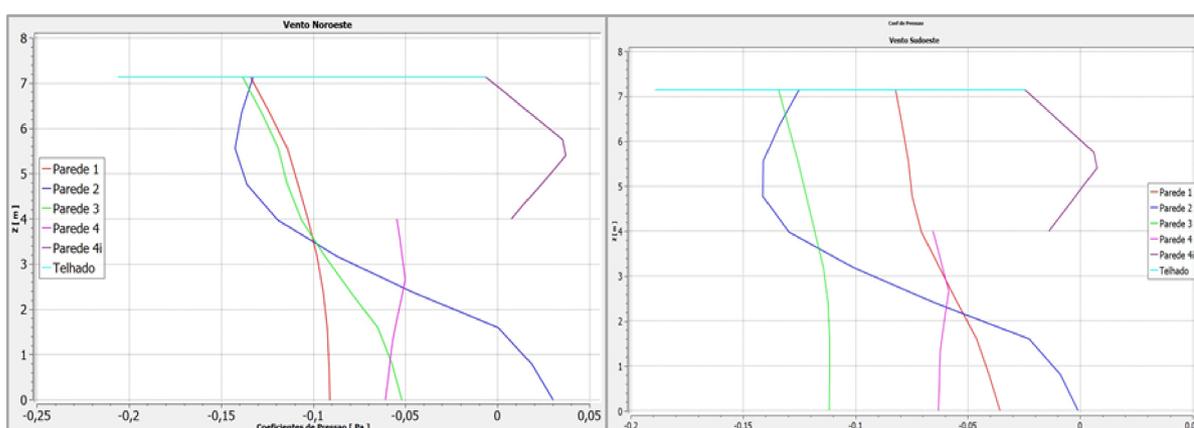
Figura 42 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento sudeste e nordeste respectivamente



Fonte: Elaborado pelo autor.

As orientações noroeste e sudoeste apresentam resultados muito próximos de coeficiente de pressão. Diferem, somente, na face “Parede 4i”, que apresenta valores positivos de C_p para ventos provenientes de noroeste.

Figura 43 - Distribuição vertical dos coeficientes de pressão do modelo CFD para o vento noroeste e sudoeste respectivamente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores apresentados representam uma média de dez valores coletados em uma linha ao longo das faces. As linhas foram locadas centralizadas ao longo das superfícies, em posição próxima à das aberturas. Alterações de posicionamento

poderiam causar variações na média, sem trazer, contudo, benefício para a simulação já que não apresentariam dados factíveis ao cálculo de fluxo de ar nas aberturas.

A face “Parede 2”, posicionada a leste da edificação, apresentou valores de coeficiente positivo mais vezes. Destaca-se que essa face sofrerá mais com a incidência direta dos ventos, dependendo, porém, da frequência de orientação deles. As faces da “Parede 1” e “Parede 3” apresentaram, com maior frequência, valores de coeficientes negativos.

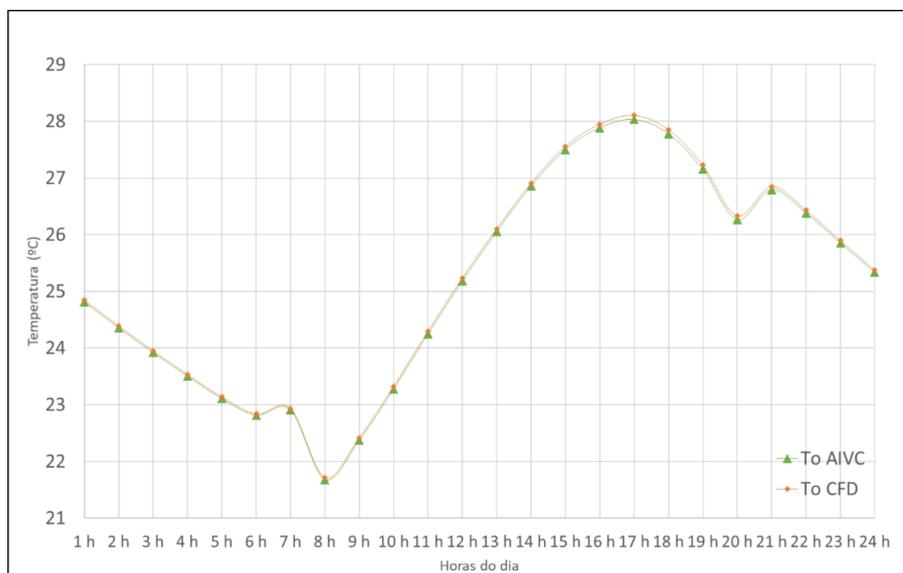
4.2 Simulações dos períodos de resfriamento e aquecimento

4.2.1 Período de resfriamento

Como mencionado anteriormente, a simulação, nesta pesquisa, foi segmentada em dois períodos. O período de resfriamento compreende as datas entre 21 de setembro a 20 de março e representa o período mais quente do ano. O período de aquecimento, por seu turno, compreende as datas entre 21 de março a 20 de setembro e representa o período mais frio do ano.

Nos graus-hora analisados durante o período de resfriamento na simulação de toda a edificação, foram encontradas pequenas diferenças de temperaturas operativas. A Figura 44 demonstra que as temperaturas operativas obtidas com os dados de coeficiente de pressão CFD demonstram-se mais quentes do que as temperaturas operativas obtidas com os dados de coeficiente de pressão AIVC. A menor diferença de temperatura foi de 0,02°C às 7h. A maior diferença alcançada foi de 0,08°C entre 17 e 19h. A distância, para uma análise levando em consideração todo o período, demonstra-se pequena.

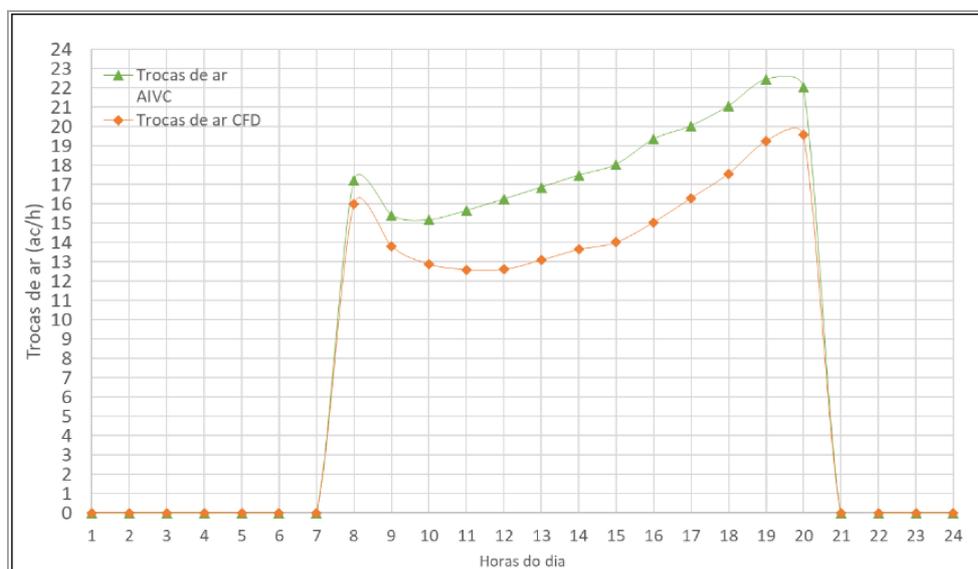
Figura 44 - Temperatura operativa durante o período de resfriamento: AIVC x CFD



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados, conforme demonstra a Figura 45, expõem diferenças para as taxas de renovação de ar com o modelo AIVC e CFD. No momento das aberturas das janelas, no horário das 7h, o contraste é menor, correspondendo a 1,23 ac/h. Durante o horário entre 15 e 16h, verifica-se aumento da diferença apresentada, de 4,03 para 4,31 ac/h, respectivamente, correspondendo aos maiores contrastes. Tal resultado, apontou para uma possível relação entre as trocas de ar (por hora) e a temperatura operativa da edificação durante o período.

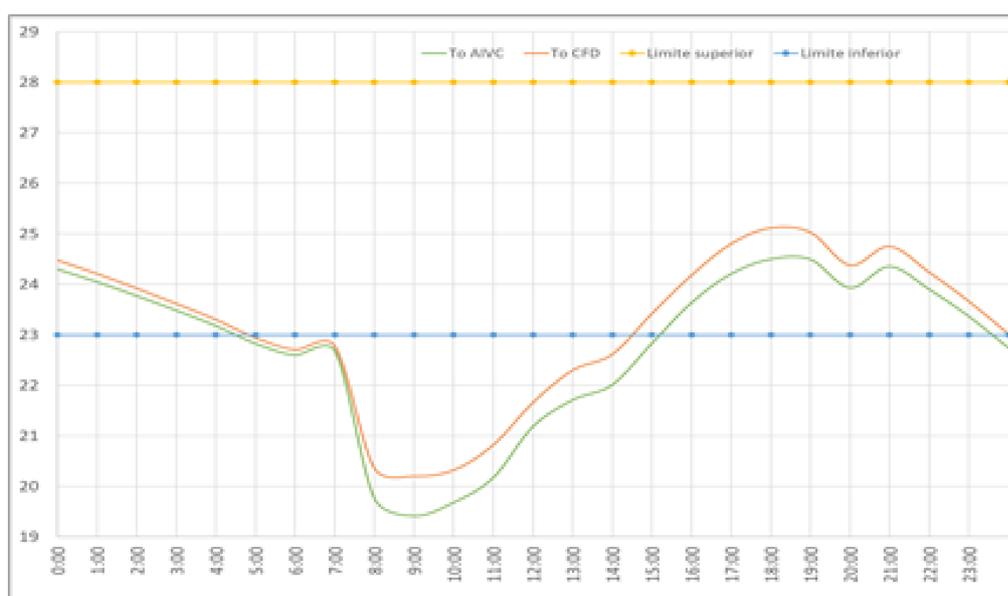
Figura 45 - Taxas de renovação de ar no período de resfriamento: AIVC x CFD



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o período de resfriamento, o dia que apresentou maiores diferenças de temperatura operativa foi 13 de dezembro. A maior diferença entre os dados, 0,78 °C, mais especificamente, ocorreu às 9 h do dia 13/12. A menor diferença de temperatura ocorreu às 7h, com 0,09 °C. A Figura 46 exibe as temperaturas operativas horárias para o modelo CFD e AIVC, além dos limites superiores e inferiores da zona de conforto para o mês de dezembro.

Figura 46 - Temperatura operativa no dia 13 de dezembro: AIVC x CFD



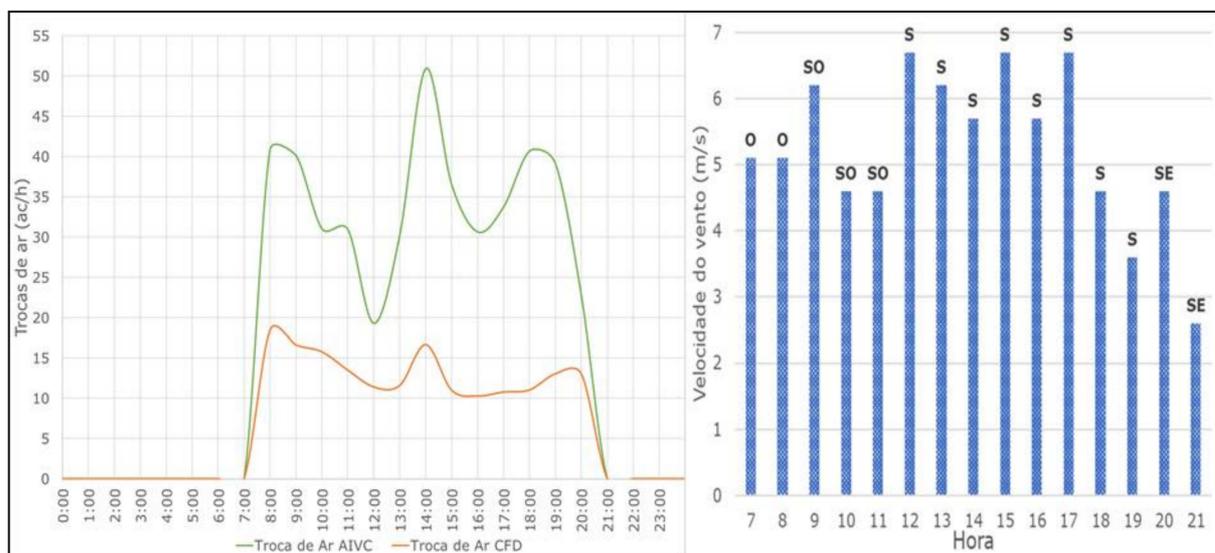
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados para o dia 13/12 demonstraram valores de To mais elevados para os modelos CFD. Como consequência, foram impactados os momentos em que a To atinge ou deixa a zona de conforto adaptativo. Nesse caso, ressaltam-se a temperatura alcançada às 15h, quando o modelo CFD atinge a zona de conforto com temperatura de 23,41°C, e o modelo AIVC, com 22,82°C, o qual não atinge o objetivo no mesmo horário. O mesmo ocorre às 24h, quando o modelo AIVC deixa a zona de conforto, com temperatura de 22,74°C e, o modelo CFD permanece na zona com temperatura de 23,01°C. Com isso, é possível afirmar que, para o recorte do dia 13 de dezembro, o modelo CFD permaneceu por mais tempo na zona de conforto adaptativo do que o modelo AIVC.

A Figura 47 demonstra as taxas de renovação de ar referentes ao dia 13 de dezembro. Novamente, os resultados apontam para dados mais elevados de trocas de ar no modelo AIVC. Destaca-se o horário das 14h, no qual foram alcançadas 50,90

ac/h no modelo AIVC e, apenas, 16,63 ac/h no modelo CFD. Esses dados representam uma discrepância de aproximadamente 34 ac/h.

Figura 47 - Dia 13 de dezembro: (a) taxas de renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento



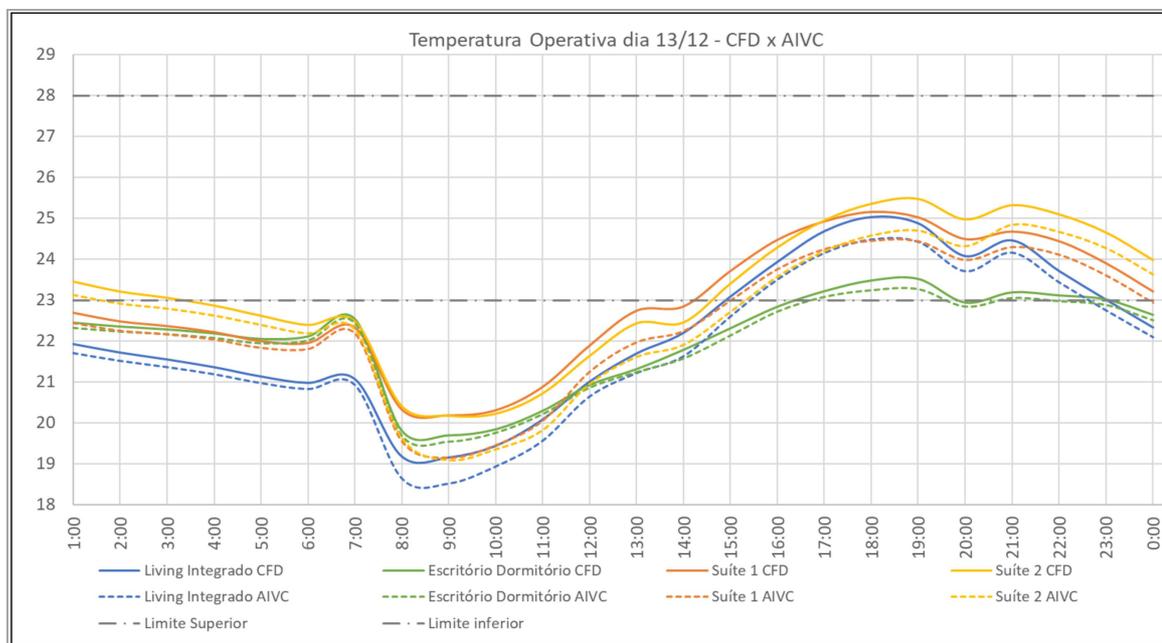
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os gráficos de renovações de ar e temperatura operativa, é possível verificar novamente uma relação entre o impacto das maiores trocas de ar AIVC nas temperaturas dos ambientes. No momento da abertura das janelas, há aumento dos contrastes de temperatura, ocasionado divergência entre a maior a temperatura de ambos os modelos. Tal influência é demonstrada quando há uma diminuição das taxas de trocas de ar às 12h, quando a diferença de temperatura operativa é visivelmente reduzida. Contudo, às 14h, com o pico das taxas de ventilação, as faixas de temperatura se distanciam novamente. A velocidade média do vento registrado no arquivo climático e que atou durante o período de abertura das janelas no dia 13 de dezembro foi de 5,46 m/s.

Estão demonstrados os resultados de temperatura operativa por zona para o dia 13 de dezembro a partir da Figura 48. As maiores diferenças de temperatura entre mesmas zonas foram alcançadas na “Suíte 1” e “Suíte 2” com aproximadamente 1,05°C de diferença no horário das 9h. As menores diferenças foram registradas na zona do “Escritório/Dormitório”, com 0,06°C às 12h. Identifica-se que todas as zonas apresentaram temperaturas mais baixas no modelo AIVC, principalmente a partir dos horários programados para as aberturas das janelas, destacando-se a zona do *living*.

Essa zona, por possuir 8,46 m² de área efetiva de ventilação, a maior entre os ambientes, é mais influenciado pelas diferenças de pressão entre as faces.

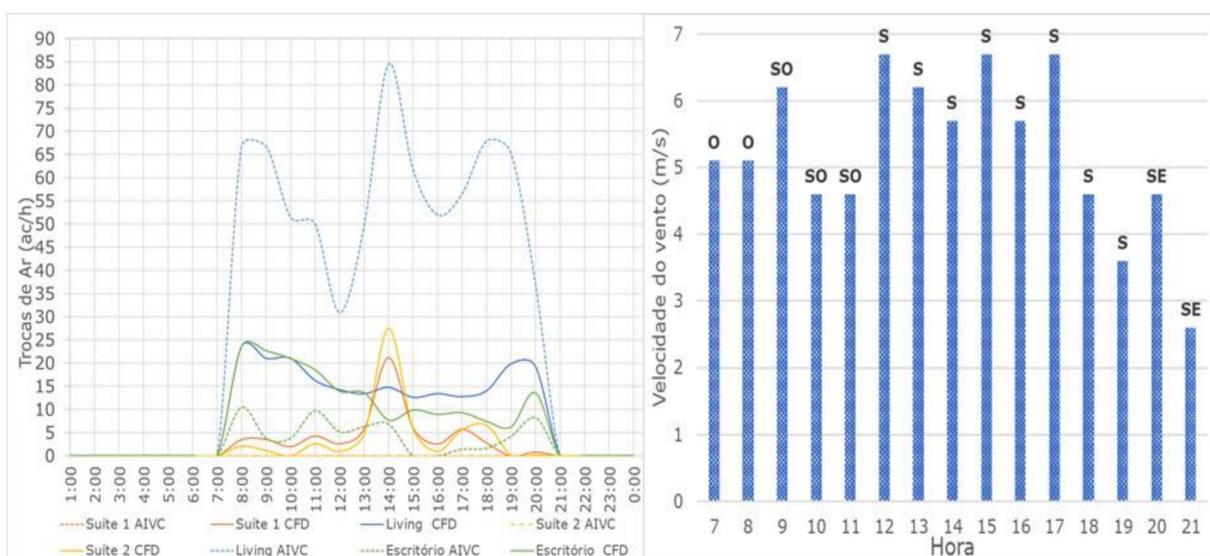
Figura 48 - Temperatura operativa por zona para o dia 13 de dezembro: AIVC x CFD



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 49, podem ser observadas as taxas de renovação de ar para todas as horas do dia 13/12 para cada zona. Aqui destaca-se a ocorrência de maior frequência dos ventos vindos de sul e de sudoeste pelo registrado no arquivo climático utilizado, na qual a velocidade média do vento para o dia 13 foi de 5,25 m/s. Para essas orientações do vento, a habitação encontra-se bem protegida pelas barreiras sequenciais formadas pelas edificações, tanto para sul, quando atuam em regime de escoamento deslizante, quanto para sudoeste, no qual o vento atinge as arestas das fileiras das edificações que atuam como defletores de vento. Dessa forma, algumas taxas de renovação de ar elevadas se destacam.

Figura 49 - Dia 13 de dezembro por zona: (a) taxas de renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na zona do *living* integrado, foram encontradas altas taxas de renovação de ar do modelo AIVC para a zona do Living, chegando a 85 ac/h, ou seja, uma diferença de aproximadamente 69 ac/h se comparada ao modelo CFD. Vale destacar que taxas de renovação de ar elevadas tendem a ser acompanhadas de velocidades de ar interno também superiores, e conseqüentemente, atingir níveis de desconforto pela velocidade da movimentação de ar.

As taxas de renovação do ar do modelo AIVC não aparenta relação com as condições de orientação do vento, as velocidades e o contexto do modelo. Com o fluxo de ar pelas aberturas, constata-se que o pico de renovação ocorre às 14h, na orientação de vento sul, no qual não há aberturas posicionadas. Ainda há um despreendimento da relação de renovação de ar entre o escritório e o living no modelo AIVC.

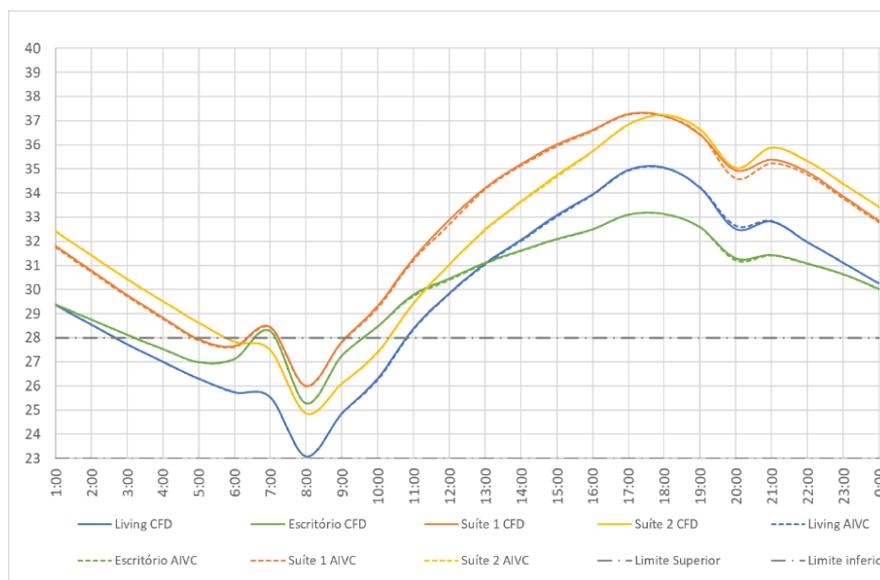
Entretanto, no modelo CFD, é possível observar a aparente relação da renovação de ar nos ambientes localizados no pavimento térreo com a orientação dos ventos. As zonas do Living e do Escritório possuem aberturas posicionadas tanto para leste quanto para oeste. No início do dia, quando as janelas são abertas, o vento está incidindo na face oeste e sudoeste, provocando um pequeno pico de renovação no living e no escritório. À medida que a orientação do vento muda para Sul, há uma redução das trocas de ar que só voltam a subir com a mudança dos ventos para

sudeste. Importante salientar que os ambientes do escritório e do living são interligados por aberturas e, portanto, devem apresentar uma forte conexão na ventilação interna.

Nota-se que, na zona do escritório e das suítes 1 e 2, as taxas de renovação do ar do modelo AIVC apresentaram-se muito baixas, chegando inclusive a zero. Às 14h, houve picos de ventilação nesses ambientes no modelo CFD. Nessa etapa, não foram encontradas evidências que justifiquem esse fenômeno.

Os maiores contrastes de temperatura e taxa de ventilação ocorreram durante o período de resfriamento. Dessa forma, foi selecionado um novo recorte temporal com o dia e com a hora mais quente do ano, equivalente a 36°C, que corresponde às 16h do dia 8 de dezembro.

Figura 50 - Temperatura operativa por zona no dia 8 de dezembro: AIVC x CFD

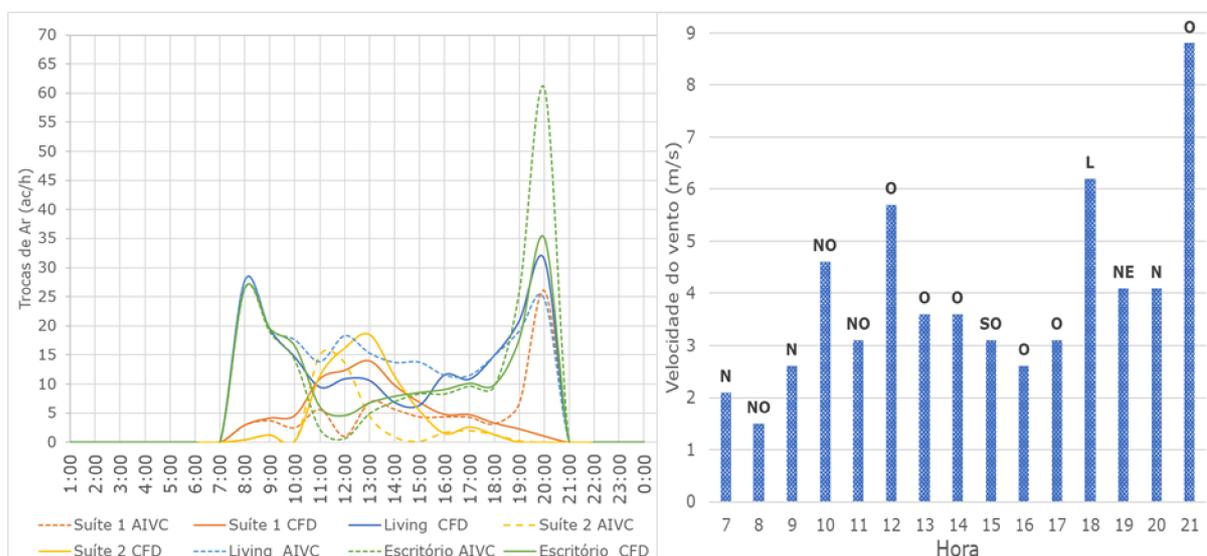


Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o período não foram encontradas grandes diferenças de temperatura entre os modelos CFD e AIVC, excetuando-se na zona “Suíte 1”, às 20h, onde registrou-se uma diferença de 0,34°C. O modelo demonstrou uma diferença de temperatura entre as zonas dos andares inferiores e superiores: as zonas do segundo pavimento apresentaram temperaturas mais altas, com diferenças na casa de 4°C, em comparação às zonas do pavimento inferior de ambos os modelos. Tal fato indica para uma relação com as taxas de renovação de ar mais elevadas no pavimento térreo em

relação ao segundo pavimento, como pode ser verificado na Figura 51. Associa-se isso a grande diferença de áreas efetivas de ventilação entre os pavimentos.

Figura 51 - Dia 8 de dezembro por zona: (a) Taxas de renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento



Fonte: Elaborado pelo autor.

No dia 8 de dezembro, durante o período de abertura de janelas, foram registradas variações na velocidade e orientação dos ventos. O vento, no período do dia 8/12, apresentou uma média de 3,9 m/s, ou seja, velocidades menores que o dia 13/12. A menor velocidade média do vento demonstra relação com taxas inferiores de ventilação que ocorrem nesse dia. Durante o período que compreende das 12 às 17 h, em que o vento é predominantemente oeste, as taxas de renovação são menores. Apesar da maior abertura da habitação posicionar-se a oeste, há uma queda nas taxas de ventilação, em que se destaca a atuação das pressões positivas contrárias à orientação do vento, causada pela deflexão vertical gerada pela barreira topográfica.

As maiores diferenças entre os modelos, no que diz respeito às trocas de ar, ocorreram na zona do escritório e da suíte 1 às 20h, com 25,78 ac/h e 25 ac/h, respectivamente. As taxas de ventilação registraram um elevado pico, ocorrendo às 20h na zona do escritório, atingindo aproximadamente 62 ac/h. Nesse momento, os ventos são provenientes do norte e apresentam velocidade de 4 m/s.

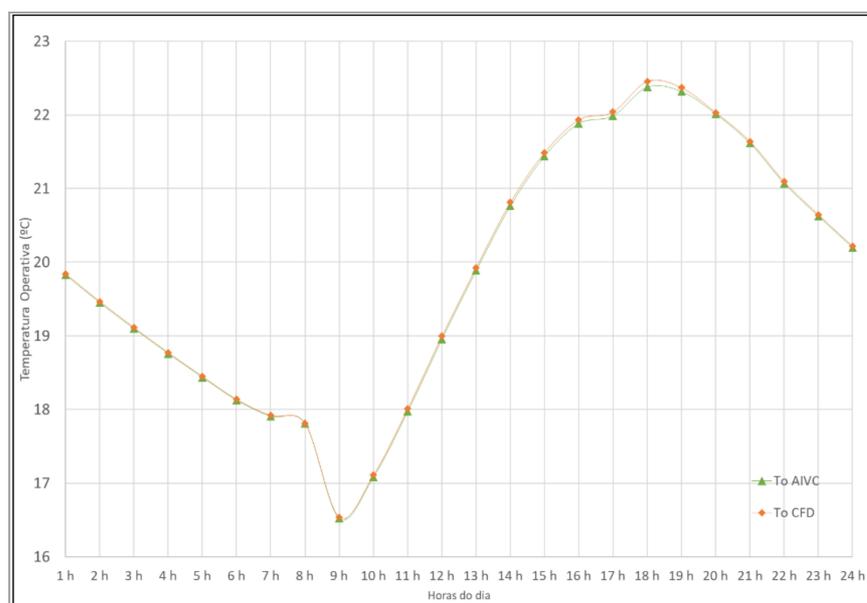
Em se tratando de conforto, os modelos e AIVC não atingiram os objetivos de conforto adaptativo determinados. Durante a maior parte do tempo, nos recortes

temporais, as temperaturas operativas permaneceram fora dos limites de temperatura que configuram o conforto.

4.2.2 Período de aquecimento

No período de aquecimento foram encontrados contrastes similares ao período de resfriamento. Durante as temperaturas operativas horárias do período, a maior diferença (equivalente a $0,08^{\circ}\text{C}$) ocorreu às 18h. No período, somente o horário das 8h não apresentou diferença de temperatura. Da mesma forma, as temperaturas obtidas no modelo CFD mantiveram-se, em sua maioria, mais quentes que no modelo AIVC.

Figura 52 - Temperatura operativa durante período de aquecimento: AIVC x CFD

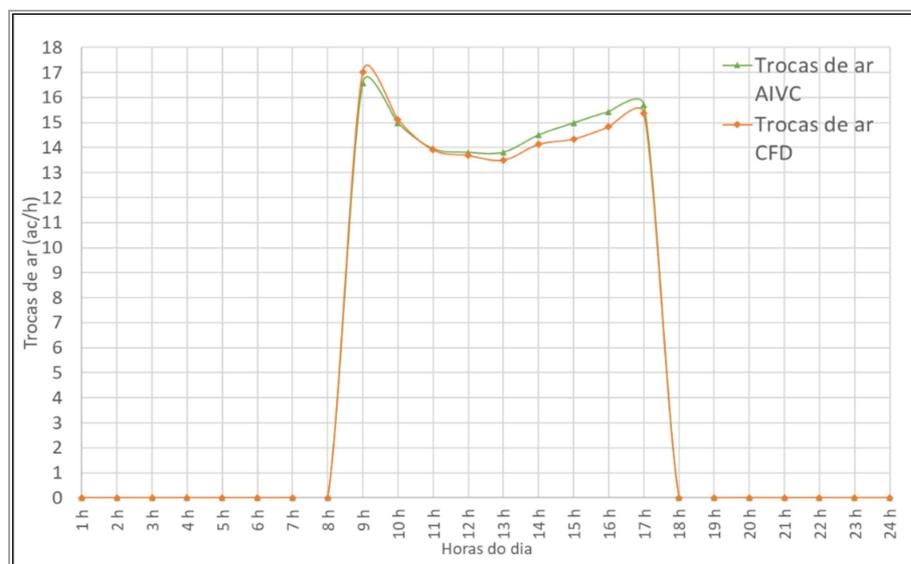


Fonte: Elaborado pelo autor.

O período de resfriamento apresentou menores taxas de ventilação em ambos os modelos do que o período de aquecimento. Da mesma forma, oposto ao período de resfriamento, o modelo CFD apresentou taxas de ventilação maiores do que o modelo AIVC durante alguns horários. A maior diferença de renovação do ar entre os modelos foi a de $0,64\text{ ac/h}$ às 15h. A menor diferença, por seu turno, foi registrada às 11h, com $0,06\text{ ac/h}$, logo após o modelo AIVC apresentar uma taxa de $0,45\text{ ac/h}$ maior do que o modelo CFD. Atribui-se essa menor diferença a menor média das velocidades do vento durante esse período e à programação de abertura das janelas

e portas, que, no período de aquecimento, são abertas por menos tempo. Dessa forma, há uma menor influência da ventilação nesse período.

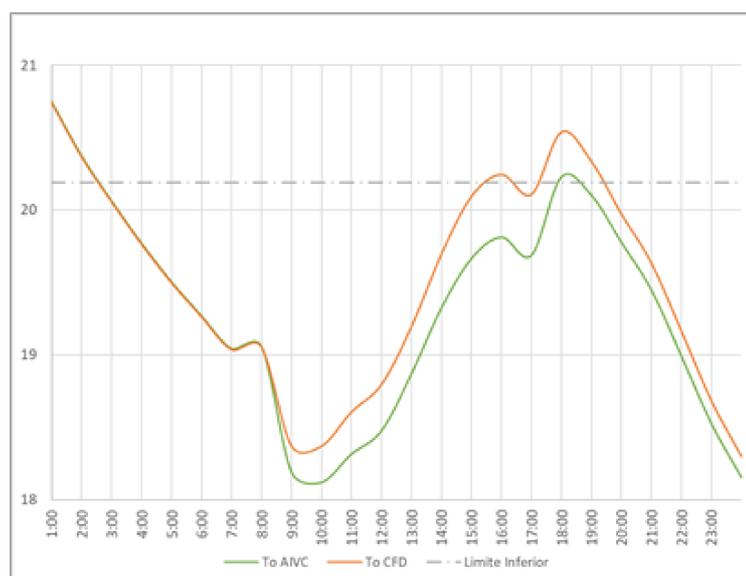
Figura 53 - Taxas de renovação de ar durante todo período de aquecimento: AIVC x CFD



Fonte: Elaborado pelo autor.

O recorte temporal que apresentou maiores alterações entre os modelos simulados foi o do dia 3 de junho. A maior diferença de temperatura apresentada foi registrada às 16h, equivalente a $0,43^{\circ}\text{C}$. A menor diferença, por sua vez, foi a de $-0,005^{\circ}\text{C}$, marcada às 6h. O modelo CFD permaneceu durante cinco horas dentro da zona de conforto, ou seja, duas horas a mais que o modelo AIVC.

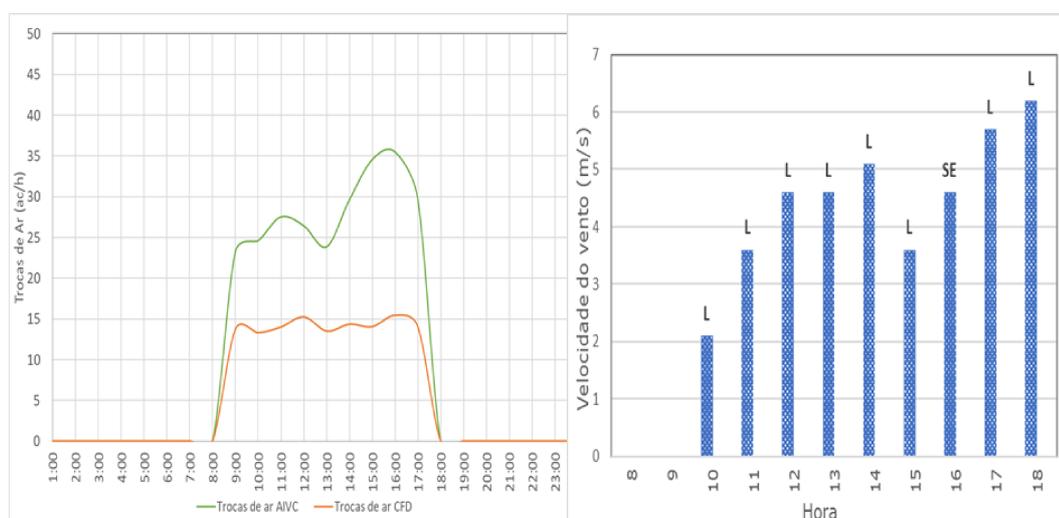
Figura 54 - Temperatura operativa horária para o dia 3 de junho: AIVC x CFD



Fonte: Elaborado pelo autor.

As trocas de ar horárias para o modelo AIVC também foram superestimadas no recorte realizado para o dia 3/6. O maior contraste de taxas de ventilação registrado foi de 20,53 ac/h, às 15h. A menor diferença foi registrada às 9h, com 9,53 ac/h. O pico da taxa de ventilação do modelo AIVC foi de 35,52 ac/h as 16h, assim como o pico do modelo CFD com 15,45.

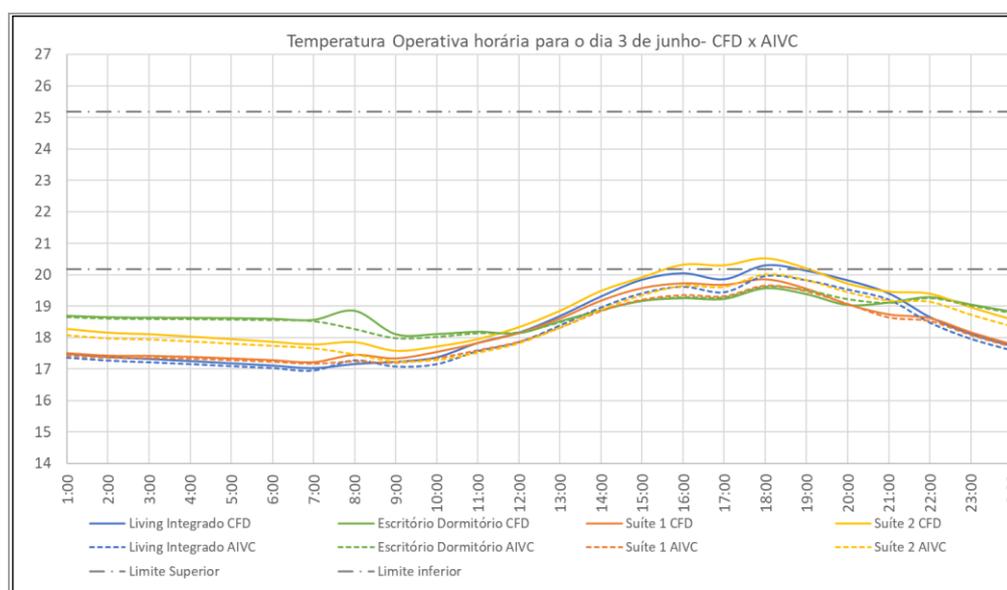
Figura 55 - Dia 3 de junho: (a) Taxas de renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme indica a maior parte dos resultados, o modelo AIVC demonstrou taxas de ventilação superestimadas, principalmente com o aumento das velocidades do vento. A média da velocidade do vento, durante a programação de abertura das janelas, para o dia 3 de junho, foi de 3,76 m/s.

Figura 56 - Temperatura operativa por zona para o dia 3 de junho: AIVC x CFD

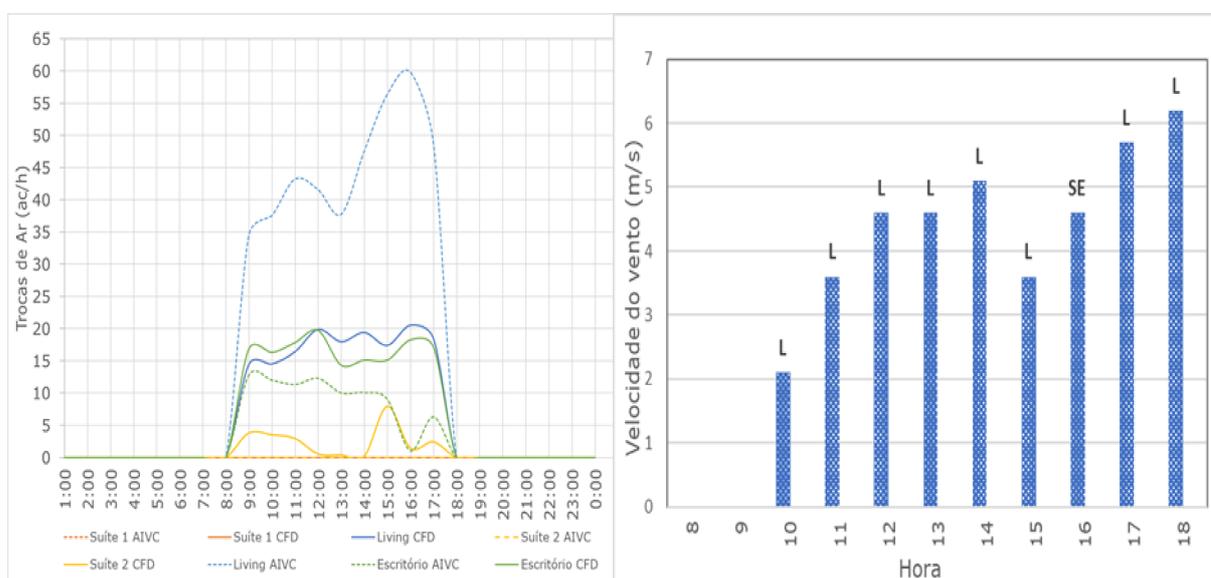


Fonte: Elaborado pelo autor.

A maior diferença de temperatura entre zonas foi registrada na “suíte 2”, com o modelo CFD 0,69° C mais quente em comparação com o modelo AIVC. Tal diferença faz com que a zona suíte 2 do modelo CFD entre na zona de conforto adaptativo ainda que o modelo AIVC não atinja a situação de conforto para zona. Os ambientes “suíte 2” e “living”, do modelo CFD, foram as únicas que atingiram condição de conforto térmico durante o dia.

Da mesma forma que no recorte temporal com maiores diferenças de temperatura operativa no período de resfriamento, ocorreram diferenças de renovações de ar consideráveis nas zonas que compõem a habitação. Com o vento predominantemente de orientação leste, é possível verificar a influência da barreira topográfica na ventilação interna da edificação, onde as pressões atuantes na fachada leste para ventos normais a superfície no modelo AIVC são positivas. Em contraposição, no modelo CFD essas pressões são negativas.

Figura 57 - Dia 3 de junho por zona: (a) Taxas renovação de ar (b) orientação e velocidade do vento



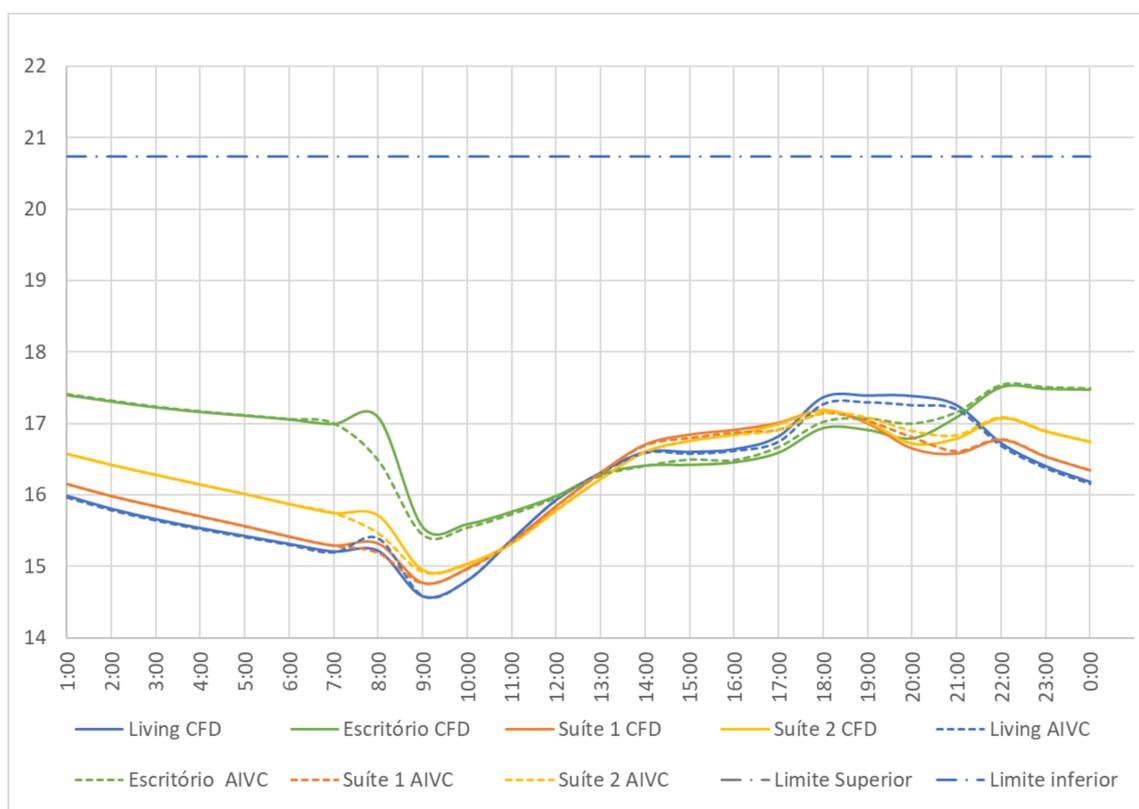
Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo AIVC apresenta taxas de renovação de ar que atingem 59 ac/h na zona do living às 16h. Entretanto, no mesmo horário, a zona do escritório, que é atingida diretamente pelo vento no modelo AIVC, apresentou 1,05 ac/h para o mesmo horário. O modelo CFD apresentou taxas de ventilação menores, com o pico em 20,51 ac/h às 16h na zona do living. Já na zona do escritório, o modelo apresentou trocas de 18,23 ac/h no mesmo horário. As zonas do living e do escritório, como dito anteriormente, são interligadas e, portanto, compartilham uma certa dependência entre as taxas de renovação de ar. As renovações de ar permaneceram estáveis, sem grandes picos, no modelo CFD. A habitação, abrigada da incidência direta dos ventos de leste, possui velocidades menores do ar no seu entorno para essa orientação. A zona da suíte 1 não registrou trocas de ar para ambos os modelos. A zona da suíte 2 apresentou renovação de ar, ainda que baixa, para o modelo CFD.

A temperatura horária mais fria do ano ocorreu às 7h do dia 15 de julho segundo o arquivo TRY. A análise desse dia, como recorte temporal, não demonstrou grandes variações entre os modelos tanto em taxas de ventilação quanto em temperatura. No horário das 8h, há um pico de diferença de temperatura que chega a 0,60° C na zona do escritório, e a 0,17 °C na zona do living. Contudo, ambos os resultados não evidenciaram uma influência da ventilação nas temperaturas operativas. A atividade

do vento para o recorte temporal do dia 15/7 foi baixa, com velocidade média, durante o período de abertura das esquadrias, de 2,2 m/s.

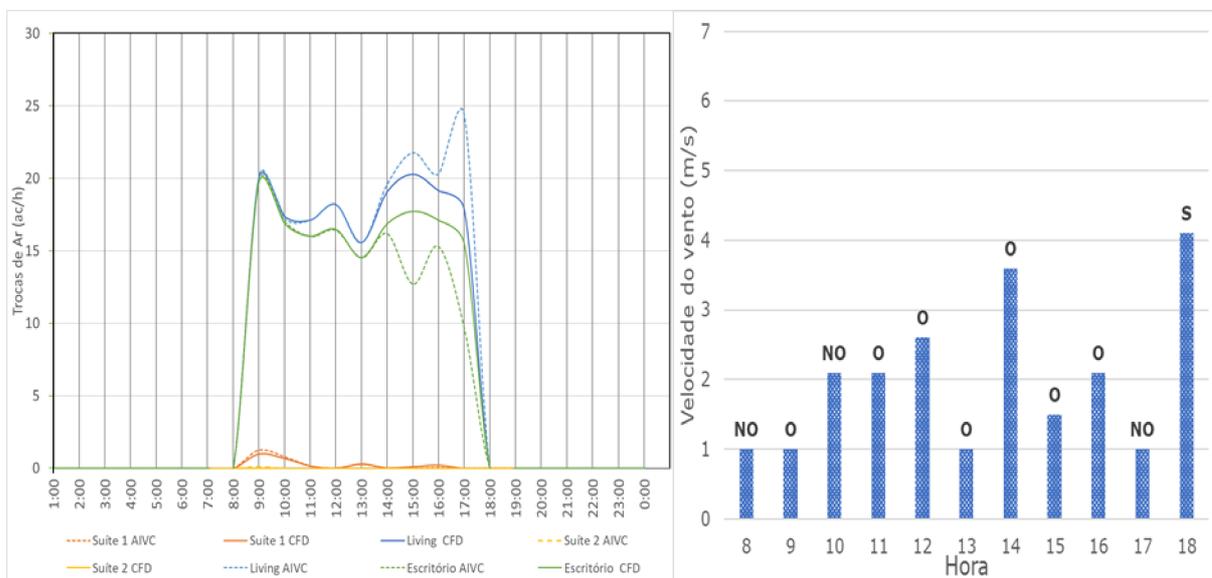
Figura 58 - Temperatura operativa no dia 15 de julho por zonas



Fonte: Elaborado pelo autor.

As taxas de renovação de ar demonstraram poucas diferenças nos resultados entre os modelos CFD e AIVC. Destaca-se, porém, a proximidade entre as renovações da zona do living e do escritório, no modelo CFD, e o maior afastamento entre zonas, no modelo AIVC. O pico de renovação de ar do modelo AIVC foi de 24,3 ac/h no living às 17h. No mesmo horário, a zona do escritório apresentou 9,63 trocas de ar por hora. No modelo CFD, o pico de renovação de ar do modelo foi de 20,27 ac/h às 15 h, na zona do Living. Na zona do escritório, a renovação foi de 17,70 ac/h.

Figura 59 - Dia 15 de julho por zona: (a) Taxas de ventilação (b) orientação e velocidade do vento



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa apresentou um método comparativo para a verificação da influência dos coeficientes de pressão na simulação computacional de uma habitação unifamiliar ventilada naturalmente. O estudo dos efeitos do contexto na ventilação levou a um método que implicou em um fluxo de trabalho bastante complexo, que inclui simulações de fluidodinâmica computacional e simulações energéticas. As simulações CFD buscaram emular os escoamentos do vento no contexto urbano criado e a influência destes nas pressões atuantes nas faces da habitação. As simulações energéticas traduziram o efeito dessas pressões em dados para a análise da ventilação interna e suas influências no conforto térmico.

Os resultados obtidos nas simulações CFD apresentaram-se coerentes com a bibliografia encontrada sobre o assunto, no que diz respeito aos efeitos aerodinâmicos do contexto e as pressões resultantes. Os obstáculos do contexto atuaram como barreiras e defletores de vento, além de produzirem escoamentos condizentes com o contexto. Todavia, algumas anomalias nos escoamentos foram identificadas e estas foram associadas aos limites de vértices permitidos pela plataforma ANSYS CFX, que impediram a criação de uma malha de maior refinamento. Destaca-se que tais anomalias, porém, não demonstraram influência nos resultados e normalmente atuaram em pontos distantes da habitação.

Os resultados de C_p do modelo CFD apresentaram mais coerência com o contexto criado do que o modelo AIVC, visto que o AIVC considera que sempre que ocorrem ventos normais à superfície os coeficientes de pressão são positivos, ou seja, 0,20. Diferentemente, no modelo CFD, na situação de vento leste, onde há uma grande barreira topográfica no caminho até a habitação, encontrou-se -0,43 como coeficiente de pressão para a mesma situação avaliada. Tal resultado é coerente para uma habitação que se encontra em uma região de esteira de uma barreira, pois nesta região, normalmente, a pressão é mais baixa do que a pressão atmosférica.

Ademais, destaca-se que, quando a orientação dos ventos era oeste, diferenças interessantes foram encontradas. No banco de dados AIVC, quando a orientação do vento é oeste, os coeficientes de pressão são positivos para ventos perpendiculares à superfície e as demais faces em sua maioria possuem coeficientes negativos. Por outro lado, estes resultados não se repetem no modelo CFD, visto que apresentam dados positivos para todas as faces demonstrando uma influência do

vórtice de pé de fachada ocasionado pela captação e deflexão vertical da barreira topográfica. Dessa forma, observa-se a importância de uma simulação que apure as influências específicas de escoamento de um contexto.

A diferença espacial entre os modelos AIVC e CFD está na barreira topográfica que corresponde a duas vezes a altura das outras edificações. Nota-se que uma pequena alteração de contexto, apresentou impactos relevantes nos resultados das simulações, principalmente quando se leva em consideração os resultados de taxas de renovação de ar. Disparidades maiores provavelmente seriam encontradas com mudanças mais bruscas de contexto, como por exemplo uma edificação de grande altura próxima a edificação. Uma edificação deste porte poderia causar maiores acelerações no entorno e maiores vórtices de pé de fachada, criando diferentes níveis de pressão, como ocorre no modelo CFD simulado para ventos originados de oeste.

A realização da análise das variações de temperatura dos resultados deu-se através da análise de graus-hora de períodos de aquecimento e resfriamento. Utilizou-se como temperatura base a temperatura operativa horária, pois a temperatura operativa é parâmetro para a análise de conforto térmico adaptativo pela ASHRAE 55. Assim, tem-se ao mesmo tempo uma análise das diferenças originadas pelos dados de coeficiente de pressão também nas temperaturas operativas dos diferentes modelos.

Na verificação das temperaturas operativas dos modelos não foram encontradas diferenças alarmantes entre o CFD e o AIVC na média dos períodos. Quando da análise da edificação como um todo, considerando a totalidade do período de aquecimento e de resfriamento, verificou-se que a maior diferença de temperatura encontrada foi de 0,08 °C entre os modelos. Contudo, quando da realização de alguns recortes temporais, apurou-se diferenças de temperatura operativa relevantes entre zonas, chegando a 1,05 °C entre os modelos. Nos recortes do dia com a hora mais quente, assim como da hora mais fria, foram apresentadas pequenas diferenças de temperatura operativa entre os modelos.

Observou-se que o modelo CFD apresentou temperaturas mais quentes em grande parte do tempo se comparado com o AIVC, podendo influenciar uma possível análise do conforto. Este resultado está relacionado com os picos de taxas de ventilação, o que indica que as maiores taxas de renovação de ar do modelo AIVC ocasionaram perdas de calor na maior parte dos ambientes.

Os resultados de renovações de ar apresentaram diferenças relevantes em todos os períodos analisados no modelo AIVC e, portanto, vai ao encontro com a bibliografia abordada. Níveis altíssimos de renovação de ar foram encontrados na zona do living do modelo AIVC, principalmente devido à grande área efetiva de ventilação das aberturas, porém tais dados são superestimados, com picos chegando à 85 ac/h em uma única zona. Ainda, esses níveis de renovação não se demonstram coerentes ao contexto no qual a habitação está inserida, em vista da grande proteção aos ventos que o contexto apresenta.

Por outro lado, os níveis de renovação de ar do modelo CFD apresentaram-se mais estáveis e coerentes com a zona de baixa pressão em que a habitação se encontra. Assim, o modelo CFD apresentou maior precisão nas predições da ventilação interna da habitação.

As velocidades do vento demonstraram uma correlação com os dias de maiores diferenças de temperatura operativa. Verifica-se, por exemplo, que no dia 13 de dezembro, no qual foram apresentadas maiores diferenças de temperatura operativa, apurou-se a velocidade do vento média durante o período de janelas abertas de 5,46 m/s, enquanto, no dia 3 de junho, apurou-se a velocidade de 3,76 m/s. Já nos dias com a hora mais quente e mais fria do ano, verificou-se a velocidade de 3,60 m/s para o dia 8 de dezembro e de 1,88 para o dia 15 de julho, ambos com pequenas diferenças de temperatura.

Da análise dos dados registrados no arquivo TRY de Porto Alegre, verificou-se que este apresenta velocidades do vento aparentemente baixas, com médias mensais de 1 a 3 m/s. Caso os modelos fossem transportados para cidades suscetíveis a ventos mais intensos, possivelmente haveria uma influência proporcional nas taxas de ventilação e, conseqüentemente, nas temperaturas.

Estimar a velocidade do ar interno é relevante para o entendimento do desempenho da ventilação natural. A ASHRAE 55 estabelece parâmetros de velocidade média do ar interno, que podem aumentar os limites superiores da zona de conforto em até 2,2 °C, se a ventilação interna ocorrer à 1,2 m/s. Da mesma forma, velocidades acima de 1,2 m/s podem causar desconforto ao usuário, como é visto na Escala de Beaufort.

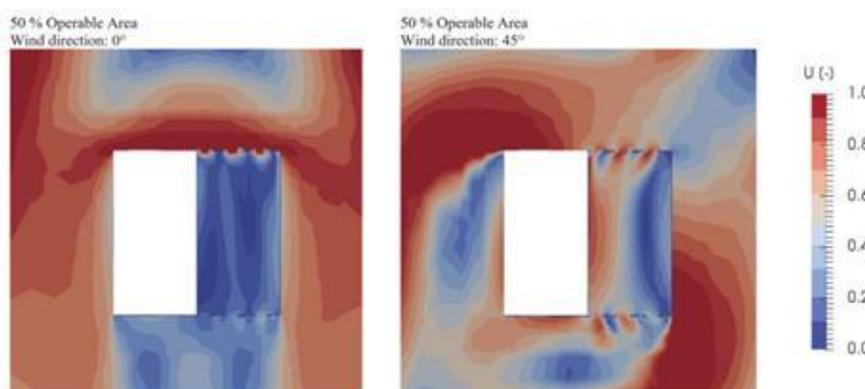
Se aplicada a Equação A presente na fundamentação deste trabalho, para estimar a velocidade do ar interno durante o pico de renovação de ar do dia 13 de dezembro, no qual as trocas chegam a 85 ac/h na zona do living, tem-se a velocidade

de ar interno de 0,26 m/s. Este dado, porém, é apenas uma média simplificada da velocidade do ar interno na secção transversal da zona. Portanto, não permite uma análise apropriada, visto que, ao longo desta secção, a velocidade irá variar e pode atingir, por exemplo, maiores velocidades próximo às aberturas. Assim, não estimam a real velocidade no ponto da zona que o usuário pode estar utilizando.

Dogan e Kastner (2020) sugerem a implementação de uma simulação CFD de geometria aberta para a análise da ventilação interna. Como pode ser visto na Figura 60, as velocidades do vento variaram em diferentes orientações e obtiveram diferentes velocidades dentro do mesmo ambiente. Contudo, os autores ressaltam que ainda existem avanços necessários para a implementação deste tipo de método.

Este trabalho buscou o melhor entendimento de uma variável que representa uma influência climática, o coeficiente de pressão, e seu impacto na ventilação natural de uma habitação unifamiliar. Não foram trabalhadas estratégias de condicionamento passivo que buscassem o conforto térmico, nem que procurassem melhorar a eficiência de um modelo para o outro, já que ambos os modelos são iguais. Buscou-se, assim, um melhor entendimento da relevância do detalhamento dos coeficientes de pressão para possibilitar resultados mais precisos. Da mesma forma, a pequena alteração de contexto, demonstrou uma grande influência na ventilação natural, que, poderia ser ainda mais relevante caso a alteração de contexto introduzida fosse maior, como uma edificação de grande altura no entorno.

Figura 60 – Simulação CFD em geometria aberta



Fonte: Dogan e Kastner, 2020

A análise da ventilação natural a partir dos ventos é uma tarefa complexa que envolve a determinação de diversos parâmetros difíceis de serem definidos. O vento

é um determinante importante na qualidade do desempenho térmico, porém a sua imprevisibilidade torna bastante complexa a predição de seus efeitos.

A complexidade apresentada pelo método, apesar dos grandes avanços obtidos nas simulações CFD e nos programas de simulação energética, assim como a possibilidade de serem desenvolvidas em computadores pessoais, sem grandes requisitos de sistema, deve ser levada em consideração. Ainda que a bibliografia apresentada destaque que este método é mais preciso e capaz de estimar o conforto e a ventilação do ambiente, sua complexidade e tempo de implementação o tornam menos atraentes para alguns tipos de empreendimentos.

6 CONCLUSÃO

A presente dissertação teve como intuito analisar a influência dos coeficientes de pressão, com os diversos elementos que os compõem, na ventilação natural de uma habitação unifamiliar. Para o estudo, foram abordados temas multidisciplinares que envolvem o comportamento do vento, as diversas barreiras que existem em um meio urbano, os efeitos aerodinâmicos atuantes nas edificações, a fluidodinâmica computacional, a ventilação natural e a simulação energética.

Para que o objetivo deste estudo fosse atingido, foi utilizado um método a partir da obtenção dos coeficientes de pressão por simulações CFD, em que foi levantada a problemática da utilização de outros métodos de obtenção que não fornecem dados específicos para um contexto. Assim, foram desenvolvidas oito simulações CFD para cada uma das direções do vento, dispostas em intervalos de 45°, dentro de um contexto urbano específico criado para a pesquisa. Dessa forma, obtidos os coeficientes de pressão específicos para o sítio, foram realizadas duas simulações energéticas, uma com coeficientes de pressão CFD e outra com coeficientes de pressão AIVC, de forma a verificar o impacto desses nos resultados de conforto e na ventilação.

Nas oito simulações do vento em CFD, foram encontradas grandes influências do contexto de escoamento dos ventos ao redor da habitação, em particular a barreira topográfica. Esse obstáculo demonstrou não só grande influência nos escoamentos do contexto, para quando os ventos eram de leste, mas também se provaram influentes nas orientações oeste. Quando esse foi o caso, a barreira topográfica atuou como um captador de vento e defletiu verticalmente, gerando um vórtice de pé de fachada que influencia nas pressões atuantes na edificação.

Os coeficientes de pressão atuantes nas faces da habitação obtidos pela simulação CFD demonstraram-se predominantemente negativos, corroborando os resultados encontrados nos bancos de dados AIVC para situações similares. Tais valores apontam para uma edificação bem protegida por um contexto. Entretanto, foram obtidos Cps menores na simulação CFD do que os verificados no banco de dados AIVC. Esses resultados influíram nas simulações energéticas.

Já os resultados obtidos nas simulações energéticas demonstraram alterações nas taxas de renovação de ar e estão de acordo com a bibliografia estudada. As renovações de ar apresentadas exibiram diferenças relevantes entre os modelos AIVC

e CFD, indicando uma melhor interpretação do contexto do modelo CFD. As baixas velocidades do escoamento e a grande proteção do contexto ao redor da habitação indicam menores trocas de ar na ventilação interna.

A avaliação temperatura operativa horária, demonstrou pouca diferença entre os modelos AIVC e CFD. As diferenças de temperatura operativas, ocasionadas por taxas de ventilação superestimadas citadas por Dogan e Kastner (2020), não se traduziram em diferenças de grande relevância, apenas em casos de que se necessite maior precisão.

O método de obtenção dos dados de coeficientes de pressão se demonstrou complexo inicialmente, porém pode ser facilmente replicado, apesar de necessitar de mais tempo para implementação do que os métodos analíticos e tabelados de bancos de dados. Apesar desses métodos serem reportados como insuficientes e imprecisos na bibliografia apresentada, para as simulações energéticas, demonstram-se adequados para situações de contextos menos complexos e edificações menos complexas como habitações unifamiliares. Espera-se que os resultados encontrados tenham alterações proporcionais à alteração de complexidade do contexto, como os contextos complexos da maioria das cidades brasileiras.

Por fim, ressalta-se a importância deste trabalho na busca por encontrar métodos mais precisos na verificação do impacto de um contexto urbano na ventilação natural de habitações e conseqüentemente do conforto térmico. A ventilação natural é uma estratégia amplamente sugerida na busca pelo desempenho térmico nas regiões climáticas do Brasil. Portanto, torna-se de vital importância que os resultados obtidos em simulações energéticas sejam coerentes e precisos de acordo com o contexto e o clima no qual a edificação está inserida, obtendo melhor avaliação sobre as possíveis estratégias a serem utilizadas em um projeto de bom desempenho térmico. Neste trabalho verificou-se, portanto, que uma pequena alteração de contexto, introduzida a partir de coeficientes de pressão mais detalhados, apresentou uma influência significativa na ventilação interna de uma habitação unifamiliar.

REFERÊNCIAS

ASHRAE - 55. **Thermal environmental conditions for human occupancy.** ANSI/ASHRAE Standard - 55, 2017.

BELTRAME, C. M.; DA CUNHA, E. G. Definição do ano climático de referência (TRY) para a cidade de Pelotas – RS. **Anais 5º Seminário internacional de construções sustentáveis**, Imed, Passo Fundo, 2016.

BEVILAQUA, C. P.; BRESSIANINI, B.; AZUMA, M.H.; LUKIANTCHUKI, M. A. Análise da ventilação natural: simulações CFD e ensaios em um modelo físico reduzido. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 10, p. e019022, 2019.

BITTENCOURT, L. S.; LÔBO, D.G.F. A influência dos captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas em climas quentes e úmidos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 57–67, 2003.

BRAGER, G. Mixed Mode Cooling. ASHRAE. Journal, 48, UC Berkeley: Center for the Built Environment. v. 48, p. 30–37, 2006. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/3bb8x7b8>. Acesso em: 4 fev. 2021.

BROWN, G. Z.; DEKAY, M. **Sun, wind and light: architectural design strategies**. 2. ed. Porto Alegre: John Wiley and Sons, 2004.

BUILD UP. **What are Test Reference Years (TRYs)?** Disponível em: <https://www.buildup.eu/en/node/55546> Acesso em: 2 fev. 2021.

BUTERA, F. M. Principles of thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Milão, v. 2, n. 1-2, p. 39–66, jun. 1998.

CÁRDENAS CELIS, A. M.; E SILVA, C. F. Protocolo de elaboração de arquivo climático de cidades brasileiras para o software ENVI-met 4.0. **Cadernos de arquitetura e urbanismo**, Brasília, n. 22, p. 32–50, 2018.

CARPEGIANNI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. 184 f. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CASAGRANDE, B. G.; ALVAREZ, C. E. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre v. 13, n. 4, p. 173–187, jul./set. 2013.

CHARISI, S.; WASZCZUK, M.; THUIS, T. K. Investigation of the pressure coefficient impact on the air infiltration in buildings with respect to microclimate. **Energy Procedia**, v. 122, n. September, p. 637–642, set. 2017.

COSTA FILHO, A. C. **Rugosidade e porosidade do tecido urbano como critérios de análise qualitativa da ventilação natural em cidades litorâneas**. 2017.189f.. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017.

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, Jan. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. **Building and Environment**, 44, 2027-2036, 2009.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P. Aplicação de CFD para cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Ambiente Construído**, Porto Alegre v. 11, n. 1, p. 145–158, 2011.

DA CUNHA, E. G.; ZECHMEISTER, D.; MELO, E. Q.; MASCARÓ, J. J.; VASCONCELLOS, L. de; FRANDOLOSO, M. A. L. **Elementos de arquitetura de climatização natural**: Método projetual buscando a eficiência nas edificações. 2ª Ed., Porto Alegre: MaisQuatro Editora, 2006.

DA CUNHA, E. G. Mitos e verdades sobre o brise-soleil: da estética à eficiência energética. **Arquitetura Revista**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 73–80, 2011. DOI: 10.4013/arq.2011.71.07. Disponível em: <http://revistas.unisinos.br/index.php/arquitetura/article/view/1279>. Acesso em: 20dez. 2021.

DA COSTA SILVA, H.; KINSEL, L. S. Região Climática de Porto Alegre: revisão para um desenho inteligente e uma arquitetura adequada. **Arqtexto**, Porto Alegre, v. 9, p. 124–133, 2006.

DAI, H.; ZHAO, B. Association of infected probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces: a Wells-Riley equation based investigation. **medRxiv**, Beijing, p. 1321–1327, 2020.

DE VECCHI, R. et al. ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: the Brazilian case. **Architectural Science Review**, v. 58, n. 1, p. 93–101, 2015. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2014.981145> Acesso em: 12 jan. 2021.

DOGAN, T.; KASTNER, P. Streamlined CFD simulation framework to generate wind-pressure coefficients on building facades for airflow network simulations. **Building Simulation**, v.14, ANO. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0727-x>. Acesso em: 28 fev. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2021.

ENGEL, P. VAN DEN; ROAF, S. **Hybrid Ventilation: a design guide**. Klimapedia, 2019.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban Microclimate: designing the spaces between buildings**. 1. ed. New York: Earthscan, 2011.

FREIXANET, V. A. F.; VIQUEIRA, M. R. **Ventilación natural: calculos basicos para arquitectura**. 1 ed. México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2004.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual do conforto térmico**. 8. ed. São Paulo: Nobel, Studio, 2003.

GANDEMER, J. **Discomfort due to wind near buildings: aerodynamic concepts**. Centre Scientifique et Technique du Batiment, National Bureau of Standards, NBS Technical: Estados Unidos, 1976.

GAO, C. F.; LEE, W. L. The influence of surrounding buildings on the natural ventilation performance of residential dwellings in hong kong. **International Journal of Ventilation**, v. 11, n. 3, p. 297–310, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683989>>. Acesso em: 12 fev. 2021.

GHIAUS, C.; ALLARD, F. Natural ventilation. Building Ventilation: the state of the art- **Natural Ventilation in the Urban Environment**. [s.n.] 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281880673_Natural_ventilation_in_Building_Ventilation_the_state_of_the_art. Acesso em: 7 jan. 2021

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11–23, 1992.

HELLWIG, R. T. et al. A framework for adopting adaptive thermal comfort principles in design and operation of buildings. **Energy and Buildings**, v. 205, p. 13, 2019.

HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F.; RAJA, I. A. Field studies of indoor thermal comfort and the progress of the adaptive approach. **Advances in Building Energy Research**, v. 1, n. 1, p. 55-88, 2007.

IEA. SHC Task 40 - Net Zero Energy Solar Buildings. **International Energy Agency Solar Heating & Cooling Programme**, v. 40, n. April 2017, p. 2-3, 2018.

ISMAIL, A.; BADAWEY, E.; ELELA, M. Calibration of "Design Builder program". **Journal of American Science**, v. 11, n. October, p. 96-102, 2015.

KEELER, MIRIAM; BURKE, B. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. 1. ed., Porto Alegre: Bookman, 2010.

KRISTINSSON, J. **Integrated Sustainable Design**. 1. ed., Delft/Deventer: Delft digital press, 2012.

LAMBERTS, R.; MELO, A.; SORGATO, M.; SCHELLER, C. Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações. CB3E, v. 1, n. **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**, p. 217, Florianópolis, abril 2015.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. São Paulo: Eletrobras/Procel, 2014.

LEDO, L.; FIORENTINI, M.; DALY, D. Potential and practical management of hybrid ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, n. December, p. 110597, 2020.

LIDDAMENT, M. **Air infiltration calculation techniques an applications guide**. 1. ed., England: AIVC Great Britain, 1986.

LIMA, R. G. DE; BITTENCOURT, L. S. A influência de diferentes arranjos construtivos no comportamento da ventilação natural. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, n. supl 1, p. 425- 441, 2017.

LIU, P.; LIN, H.; CHOU, J. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model. **Building and Environment**, v. 44, n. 9, p. 1970–1979, 2009.

LOREDO-SOUZA, A. M. ; ROCHA, M. M. ; FRANCO, M. ; PALUCH, M. J. ; NÚÑEZ, G. J. Z. ; CARPEGGIANI, E. A. Influência dos efeitos de vizinhança nas ações devidas ao vento em edifícios altos. In: **XXXI Jornadas sud-americanas de ingeniería**, Mendoza, 2004.

MASCARÓ, L. E. de; MASCARÓ, J. L. **Vegetação urbana**. 4. ed. Maisquatro: Porto Alegre, 2002.

MASCARÓ, L.; MASCARÓ, J. J. **Ambiência urbana**. 4. ed. Porto Alegre: Maisquatro Editora, 2020.

MONTERO, J. I. P. **Ventilação e iluminação naturais na obra de João Filgueiras Lima, Lelé**: estudo dos hospitais da Rede Sarah Kubitschek Foz de Iguaçu e Rio de Janeiro. 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

MORAIS, J. M. da S. C.; LABAKI, L. C. CFD como ferramenta para simular ventilação natural interna por ação dos ventos: estudos de caso em tipologias verticais do “Programa Minha Casa, Minha Vida”. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.17, n. 1, p. 223-244, 2017.

NEGREIROS, B. DE A. **Análise de métodos de predição de conforto térmico de habitação em clima quente-úmido com condicionamento passivo**. 2010. 115f. Dissertação (Mestrado em Conforto no Ambiente Construído, Forma e Habitação), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563–572, 2002.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M.; ROAF, S. Adaptive thermal comfort. **Human Thermal Comfort**. Boca Raton, FL, CRC Press/Taylor & Francis Group 2020.: CRC Press, p. 208, 2012.

LECHNER, N. **Heating, cooling and lighting**: sustainable methods for architects. 4. ed., New Jersey: John Wiley and Sons, 2015.

OKE, T. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. IOM Report, TD. Press, World Meteorological Organization: Geneva, 2004.

OLGYAY, V. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism: new and expanded edition**, New Jersey, Princenton University Press, 2015.

OPEN ENERGY INFORMATION. Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA). Disponível em: [https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_\(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA)) . Acesso em: 10 de fevereiro de 2021.

PASSOS, I. C. S.; LAMENHA, M. A.; BITTENCOURT, L. S. Análise de pressões externas em edifício residencial multifamiliar para fins de ventilação natural. **Anais Encac - Habitat Humano**: em busca de conforto ambiental, eficiência energética e sustentabilidade no século XXI, n. 1, p. 1007–1015, 2017.

PRAKASH, D.; RAVIKUMAR, P. Analysis of thermal comfort and indoor air flow characteristics for a residential building room under generalized window opening position at the adjacent walls. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 4, n. 1, p. 42–57, 2015.

QUADROS, B. M. DE; MIZGIER, M. O. Conforto térmico em ambientes de internação hospitalar naturalmente ventilados, **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.20, n. 2, p.113-134, abr. / jun. 2020.

REN, C. et al. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan: the implementation in Chinese cities. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 182, n. September, p. 170–188, 2018.

ROAF, SUE; FUENTES, M; THOMAS, S. **Ecohouse: a casa ambientalmente sustentável**. 4. ed. Porto Alegre, Bookman, 2014.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. 3. ed, Brasília: Editora UnB, 2013.

RORIZ, M. et al. Bioclimatic Zoning of Brazil : a proposal based on the Givoni and Mahoney methods. **PLEA'99 Conference**, n. 1976, p. 4-9, 1998.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Avaliação de modelos preditivos de conforto térmico em escritórios no clima subtropical brasileiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 91–107, 2019.

SAKIYAMA, N. R. M. et al. Perspectives of naturally ventilated buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, n. September, 2020.

SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Building ventilation: the state of the art**. London: Earthscan, 2006.

SAYIGH, A.; MARAFIA, A. H. Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 2, n. 1–2, p. 3–24, jun. 1998.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 289–303, 2017.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. Florianópolis, SC, 2009. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, UFSC, 2009.

SOUZA, V. M. B. de. **A influência da ocupação do solo no comportamento da ventilação natural e na eficiência energética em edificações**: estudo de caso em Goiânia: clima tropical de altitude. 2006. 260 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

TOMINAGA, Y. et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10–11, p. 1749–1761, 2008.

TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 37–58, 2010.

VERSTEEG, V. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to Computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method. 2. ed., Edinburgh: Pearson Education Limited, 2007.

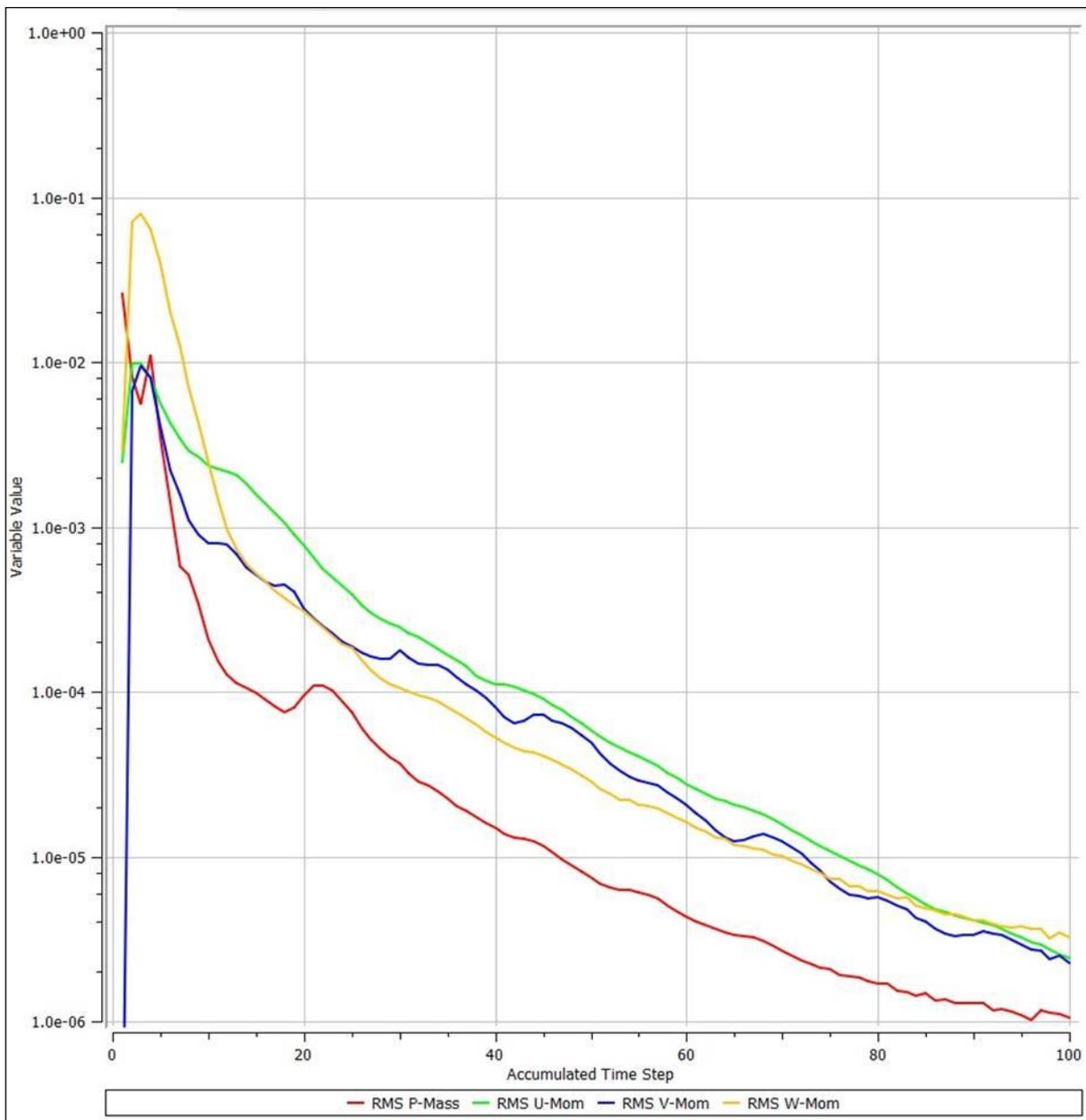
VILLAS BOAS, M.; SANTOS, R. M. dos. Urban morphology and thermal comfort conditions in the central area of Belo Horizonte. **Architecture city environment: Proceedings of PLEA 2000**, London, James & James, 2000.

WESTPHAL, F. S. Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais. (Tese de Doutorado): UFSC, 2007.

YANG, T.; CLEMENTS-CROOME, D. J. **Encyclopedia of sustainability, science and Technology**: natural ventilation in built environment, New York: Springer, 2012.

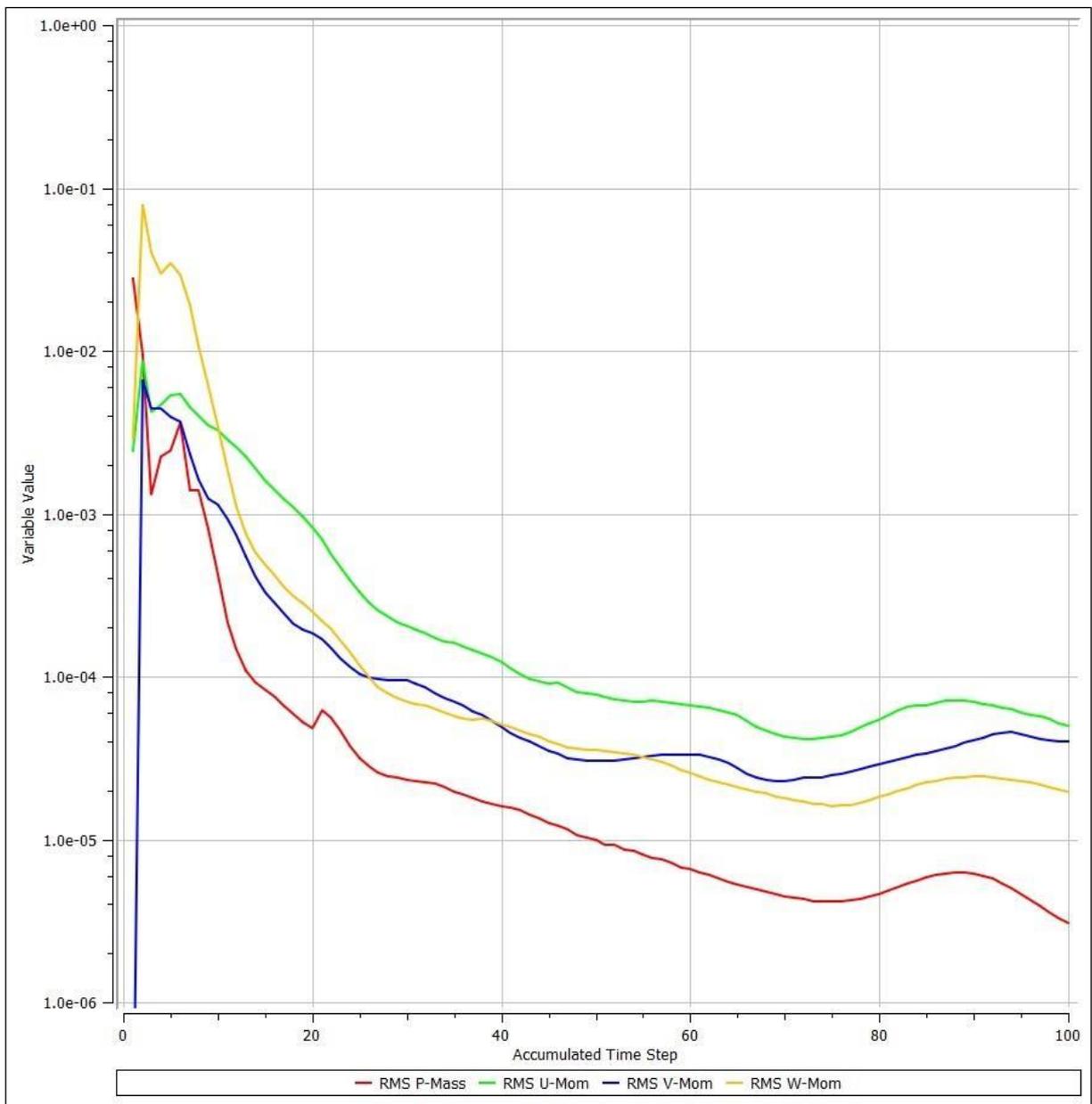
ANEXO E – CONVERGÊNCIA DOS MODELOS CFD

Figura 61 – Convergência do modelo leste



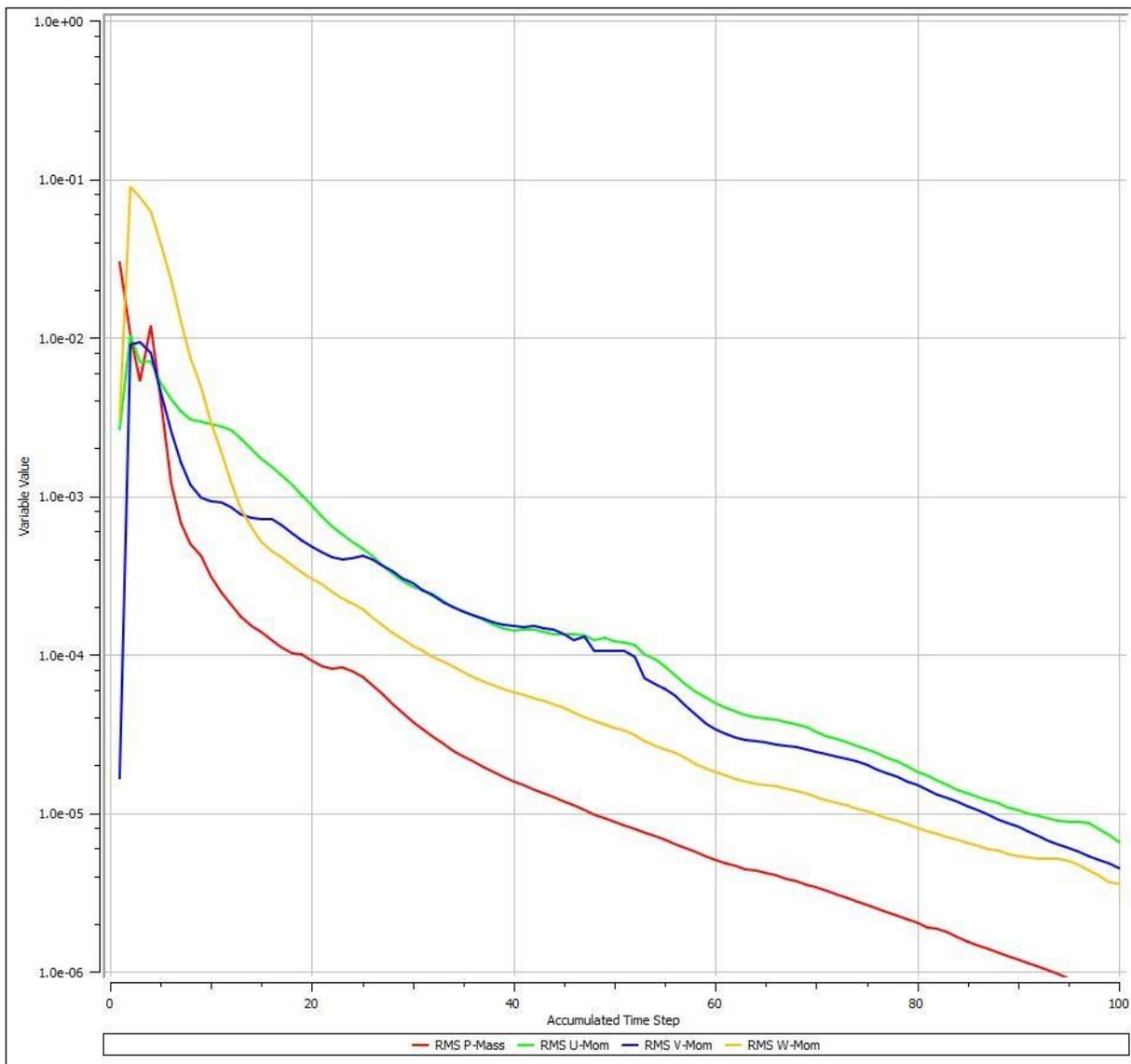
Fonte: Autor

Figura 62 – Convergência do modelo oeste



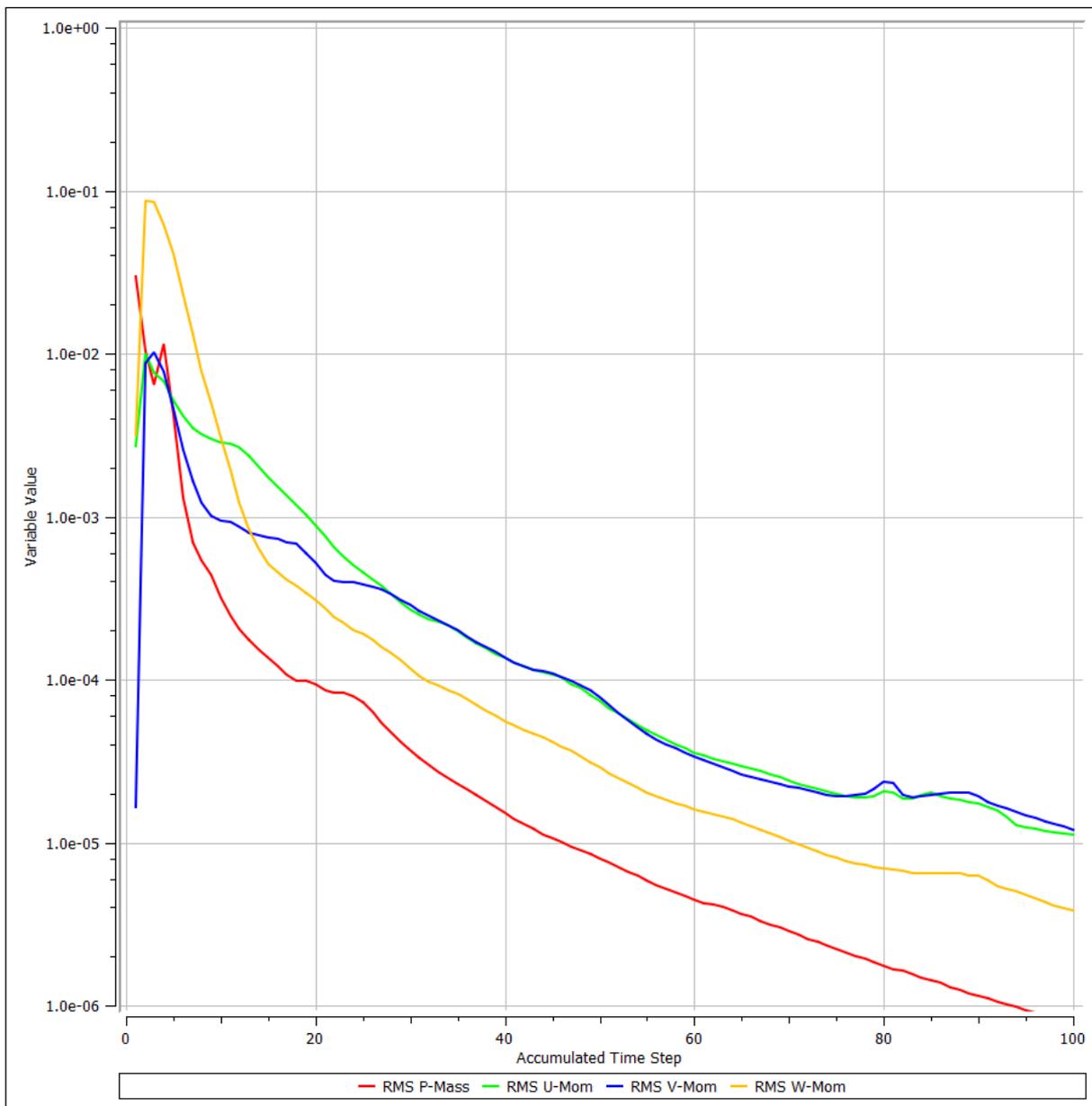
Fonte: Autor

Figura 63 – Convergência do modelo nordeste



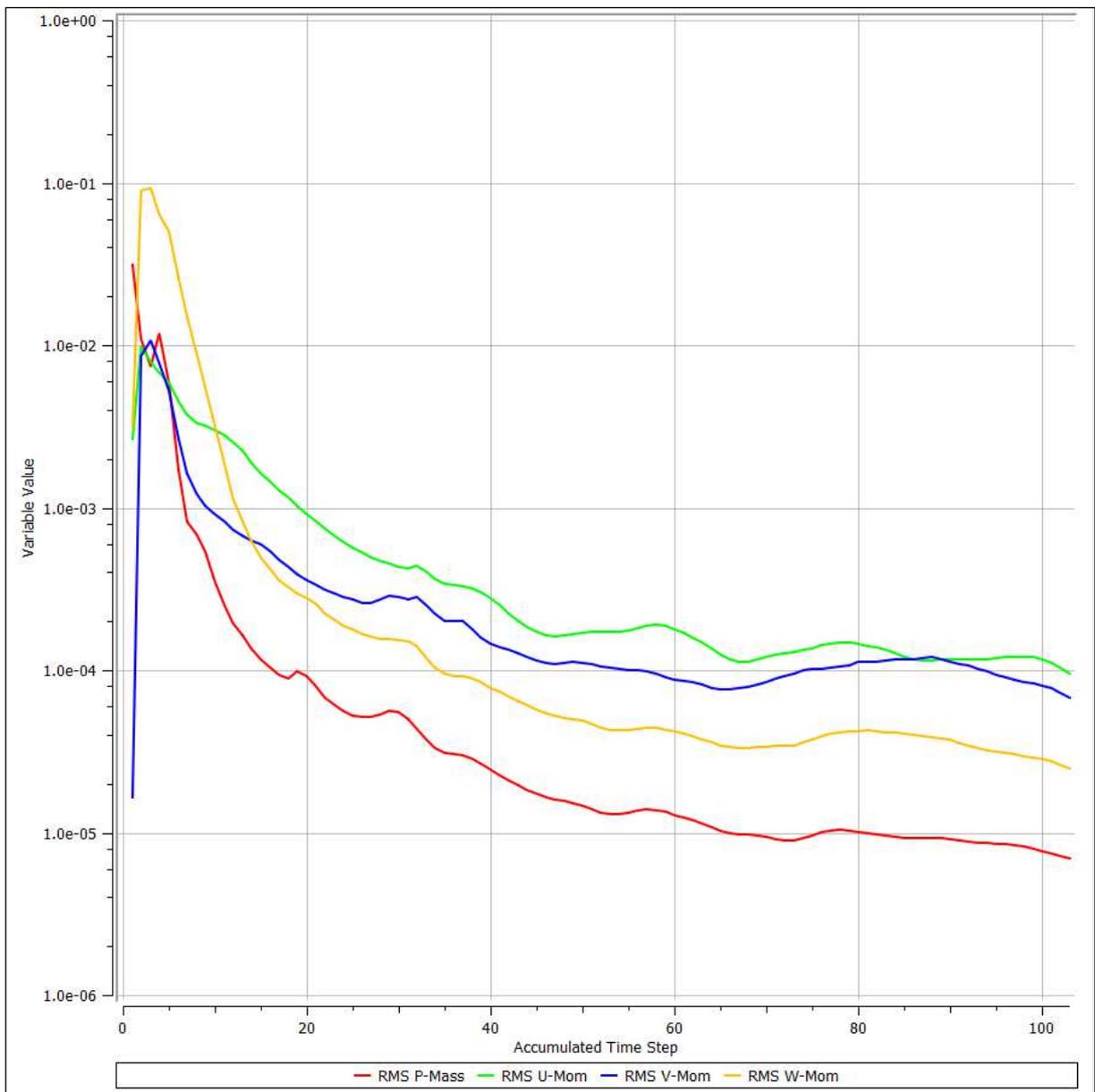
Fonte: Autor

Figura 64 – Convergência do modelo sudeste



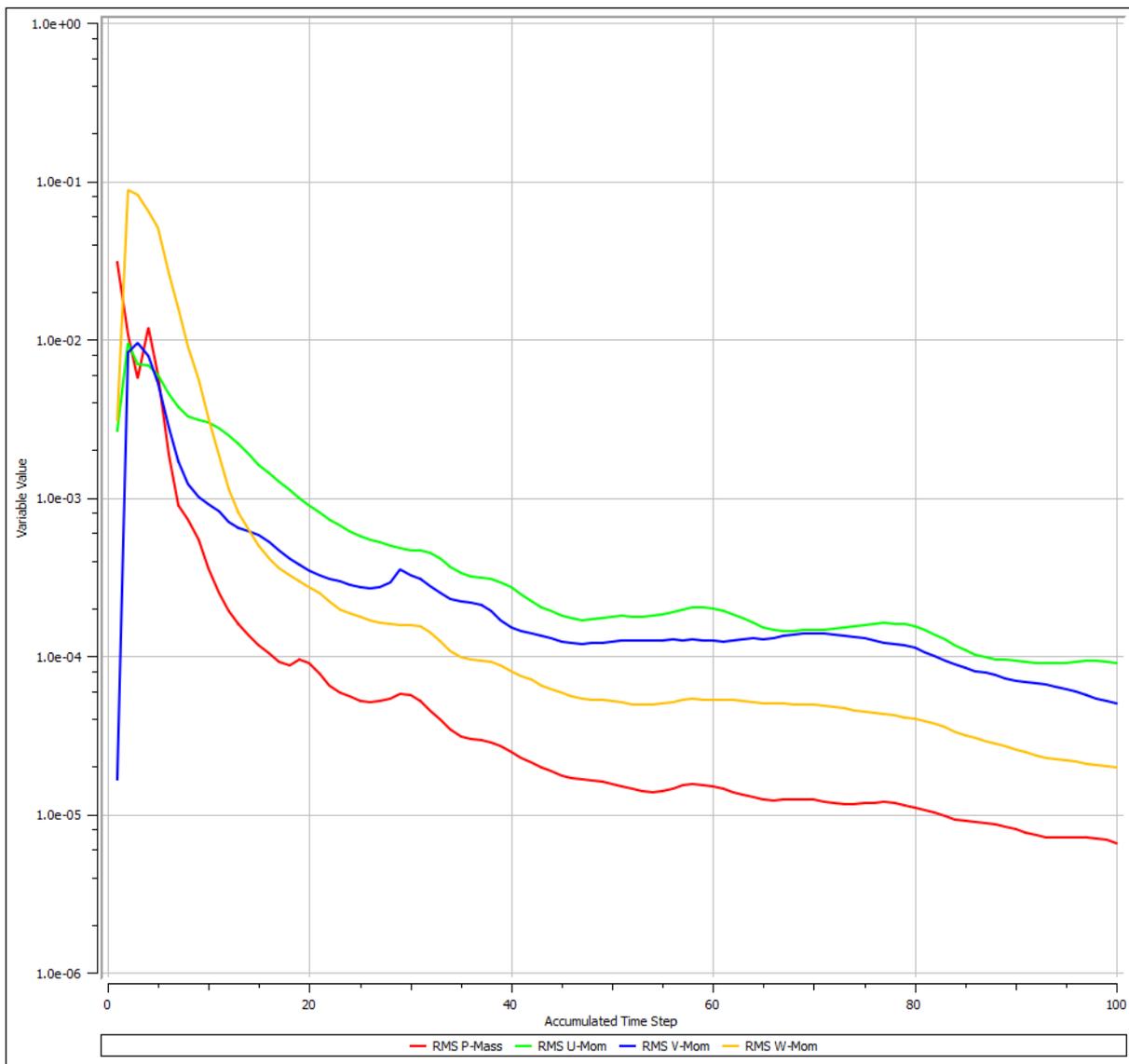
Fonte: Autor

Figura 65 – Convergência do modelo noroeste



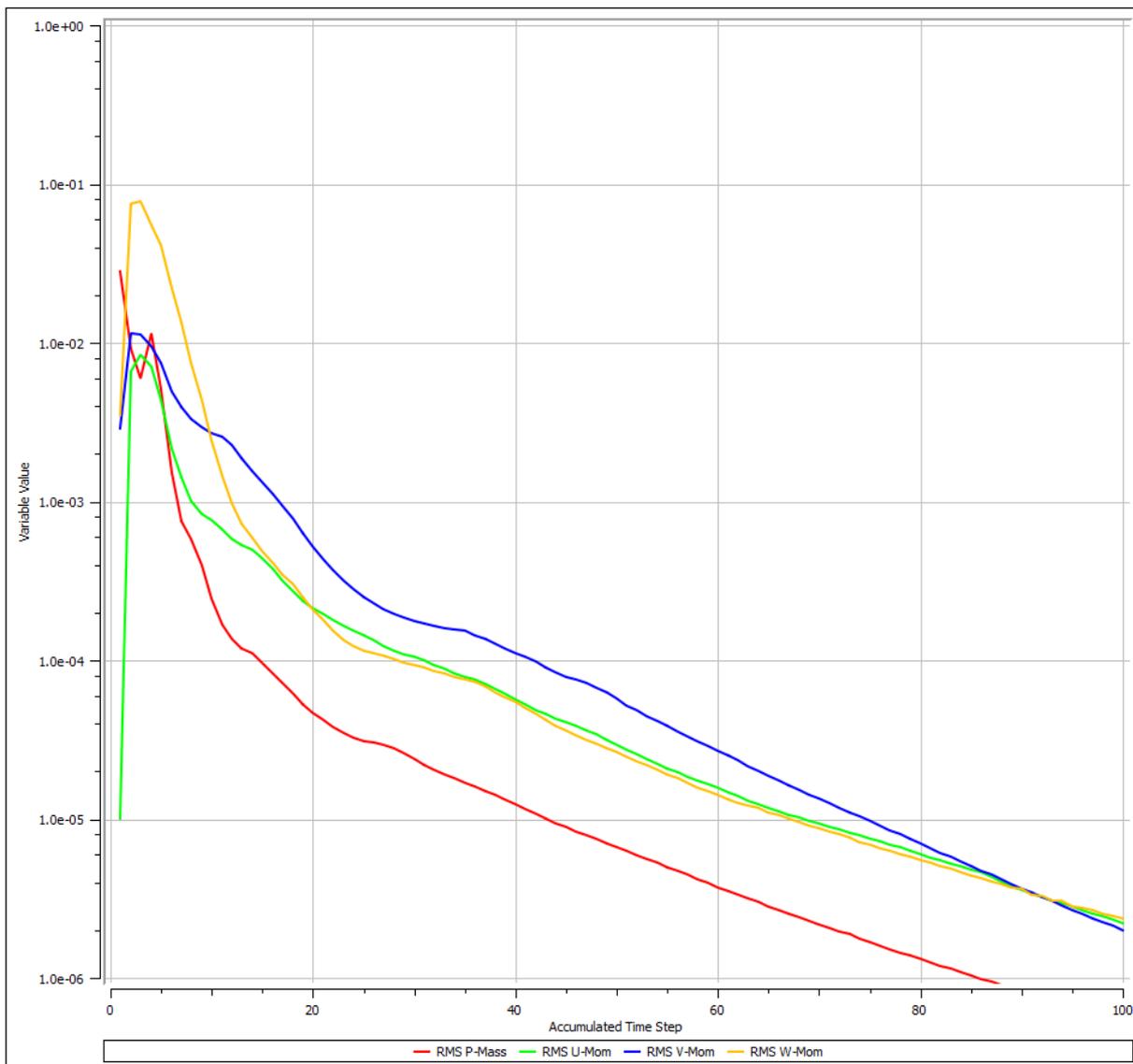
Fonte: Autor

Figura 66 – Convergência do modelo sudoeste



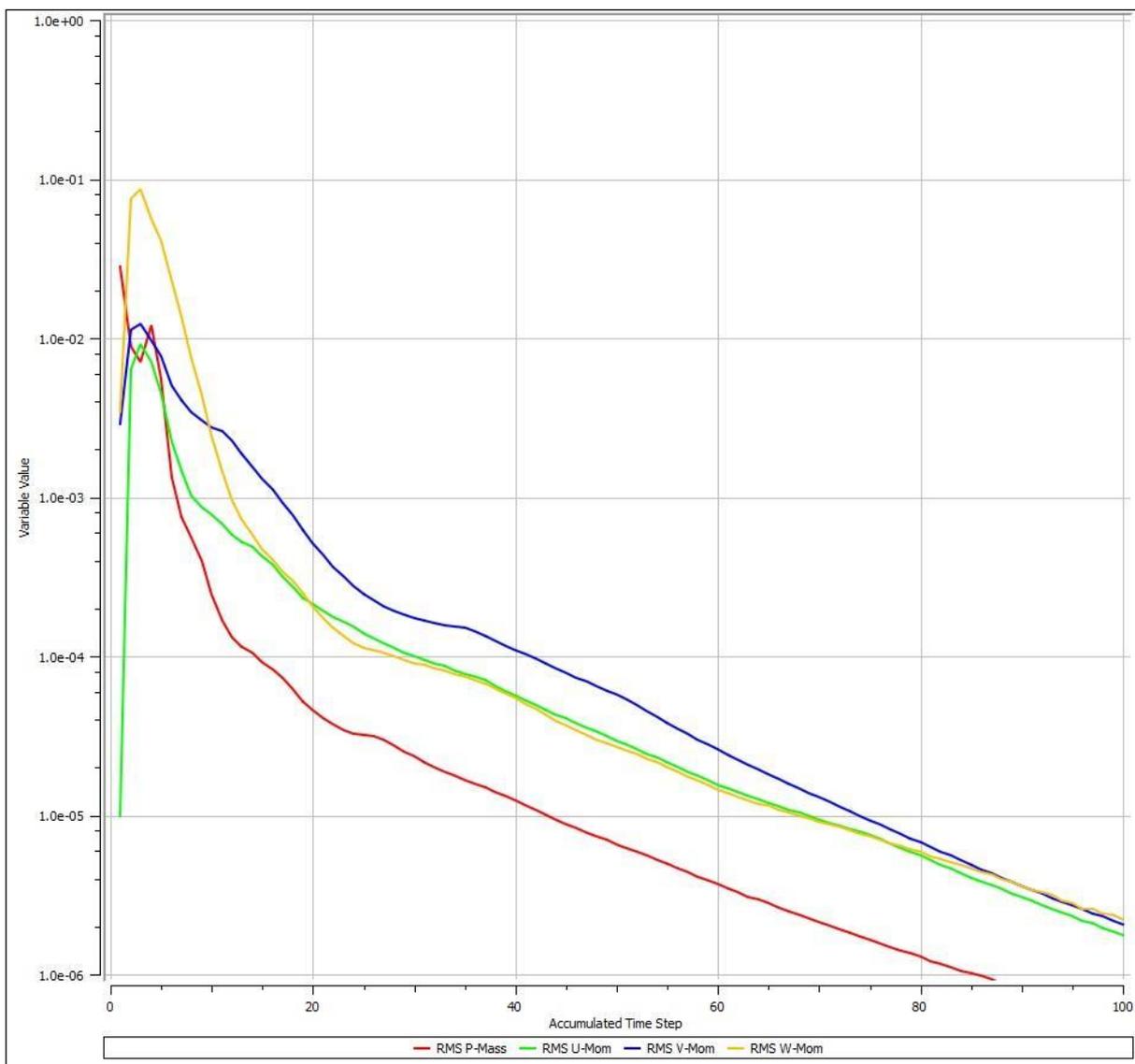
Fonte: Autor

Figura 67 – Convergência do modelo norte



Fonte: Autor

Figura 68 – Convergência do modelo sul



Fonte: Autor