

Daniel de Oliveira Amaral

**AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL DA
NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA DE DESEMPENHO TÉRMICO E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS**

Belo Horizonte
Escola de arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais
2017

Daniel de Oliveira Amaral

AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL DA
NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA DE DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Bens Culturais, Tecnologia e Território

Linha de pesquisa: Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Eleonora Sad de Assis

FICHA CATALOGRÁFICA

A485a

Amaral, Daniel de Oliveira.

Avaliação das metodologias de ventilação natural da normalização brasileira de desempenho térmico e eficiência energética de edificações habitacionais [manuscrito] / Daniel de Oliveira Amaral. - 2019.

152 f. : il.

Orientadora: Eleonora Sad de Assis.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Ventilação natural - Teses. 2. Habitações - Ventilação - Teses. 3. Edificações - Teses. 4. Conforto térmico - Teses. 5. Simulação (Computadores) - Teses. I. Assis, Eleonora Sad de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

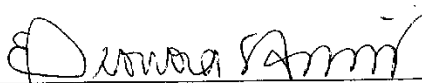
CDD 720.47

Daniel de Oliveira Amaral

"Avaliação das Metodologias de Ventilação Natural da Normalização Brasileira de Desempenho Térmico e Eficiência Energética de Edificações Habitacionais"

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais


Comissão Examinadora:



Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis - EA/UFGM (orientadora)



Prof. Dr. Rudolf Huebner - DEMEC/EE/UFGM



Prof. Dr. Rafael Silva Brandão - Dep. Arquitetura, Urbanismo e Artes Aplicadas / UFSJ

Belo Horizonte, 25 de setembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

À professora e orientadora Eleonora Sad de Assis, pela disponibilidade, incentivo e conhecimentos transmitidos sempre com muita generosidade e que me fizeram redescobrir o gosto pela pesquisa;

Às arquitetas e amigas Marina da Silva Garcia e Ana Carolina de Oliveira Veloso, pelo grande apoio em todas as etapas da pesquisa, pela convivência diária no laboratório, e por muitas reflexões sobre nossas pesquisas e sobre nossa área de atuação;

Aos professores Rafael Silva Brandão e Rudolf Huebner, pelas contribuições feitas no exame de qualificação;

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida para a realização da pesquisa;

Ao professor Rudolf Huebner e ao Matheus Silveira pelo generoso auxílio com as simulações no CFX®;

A todos os colegas do LABCON/UFMG, pela agradável convivência e pela intensa troca de conhecimentos que me ajudaram não só nessa pesquisa, mas também profissionalmente;

Aos amigos do PACPS, pela amizade, companheirismo e ajudas ao longo desse difícil caminho.

Às minhas mais novas amigas de infância Bianca, Fernanda, Marina, Thaís, e Tiza, que são maravilhosos presentes que esse mestrado me trouxe.

Aos amigos Allan Santos, Luciana Pietra, Lígia Barros, Natália Marra e todos os outros pela paciência por me acompanharem nesse processo e aguentarem as reclamações e os sumiços típicos de um mestrando.

Àqueles que são mais que amigos e família, Marcelo Amaral, Rubens Amaral, Marco Antônio, João Scomparim e Marcelle Batista, muito obrigado pelo amor e pelo suporte sempre presente.

E agradeço principalmente à minha família, pelo apoio incondicional e incentivo ao longo de toda a minha vida, especialmente aos meus pais, Darlan e Ilza.

RESUMO

Em um país como o Brasil, com clima ameno em grande parte de seu território, a ventilação natural nas edificações habitacionais possui um grande potencial para contribuir com o conforto térmico de seus usuários e com a eficiência energética dessas edificações. Para isso são essenciais a adequação da envoltória da edificação ao clima ao qual está exposta e o correto dimensionamento das aberturas para a ventilação natural. Essa dissertação tem como objetivos: identificar os parâmetros normativos de ventilação de edificações nacionais e internacionais e as metodologias de predição da ventilação natural; o desenvolvimento de um modelo teórico médio de diferentes situações de adensamento urbano; analisar por meio de simulação computacional se o atendimento à normalização brasileira garante conforto térmico; e a definição de uma diretriz de ventilação natural para conforto térmico baseada em renovações de ar por hora. Para as simulações computacionais foram gerados modelos teóricos de adensamento urbano de baixa e alta densidade, com alturas das edificações constante e variável. Utilizou-se uma edificação modelo de interesse social para as análises internas com envoltória otimizada para o clima. Simulações em CFD permitiram a análise dos modelos propostos de alta densidade e a obtenção dos coeficientes de pressão sobre as fachadas da edificação estudada. Esses dados alimentaram simulações termo energéticas realizadas para o clima de Belo Horizonte utilizando o modelo *AirFlow Network*, que tiveram como resultado dados horários de temperatura operativa interna e renovação de ar por hora. Observou-se que o modelo de alta densidade com altura variável reproduz melhor o escoamento do vento e os valores de C_p nas fachadas, comparados a resultados encontrados na literatura. A edificação estudada é bem avaliada segundo os parâmetros normativos da NBR 15.575:2013 e do RTQ-R, divergindo dos resultados de horas em conforto obtidos no estudo de caso. A baixa correlação entre as renovações de ar por hora e as temperaturas operativas internas não permitiram a definição de uma diretriz de renovação de ar para conforto térmico. Espera-se que este trabalho tenha contribuído na discussão sobre parâmetros de projeto, normativos ou não, que auxiliem o dimensionamento das aberturas para ventilação natural a fim de proporcionar conforto térmico aos usuários de edificações habitacionais.

Palavras-chave: Ventilação natural, edificações habitacionais, conforto térmico, *airflow network*, fluidodinâmica computacional.

ABSTRACT

In a country like Brazil, with mild climate in a large part of its territory, natural ventilation in dwellings has great potential to contribute to thermal comfort of its habitants, and with energy efficiency of these buildings. It is essential the correct design of building envelope to the climate to which it is exposed and the right dimensioning of natural ventilation. The aims of this dissertation are: to identify national and international building ventilation standard's parameters and natural ventilation prediction methods; an average theoretical model development of different urban densification situations; an analysis using computational simulation if the compliance with Brazilian standards assures thermal comfort; and a natural ventilation design guideline definition for thermal comfort based in air change per hour. It was generated low-rise and high-rise densification theoretical models with constant and variable building heights, and was used a social interest building model with climate optimized envelope to internal analysis. CFD simulations allowed the analysis of proposed high-rise models and obtaining pressure coefficients over studied building façade. These data fed thermal energy simulations to Belo Horizonte climate using Airflow Network model that had as outputs hourly internal operative temperatures and air change per hour. As results, it was observed that the high-rise densification model with different building heights reproduces better wind flow and coefficient pressure values over façades compared to results found in the literature review. The studied building is well evaluated according Brazilian standards NBR 15.575:2013 and RTQ-R, diverging from the results of hours in thermal comfort obtained in the case of study. A low correlation between air change per hour and internal operative temperature doesn't allowed the definition of air change per hour guidelines rate for thermal comfort. It is expected this work has contributed to the discussion about design parameters, normative or not, that aid natural ventilation dimensioning providing thermal comfort in dwellings to its users.

Keywords: natural ventilation; dwellings; thermal comfort; airflow network; computational fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Exemplos de representações de entornos teóricos na literatura.....	35
FIGURA 2: Exemplos de representações de entornos reais na literatura.....	36
FIGURA 3: Fluxograma da metodologia proposta.....	44
FIGURA 4: Obtenção dos dados da área levantada em Belo Horizonte.	47
FIGURA 5: Planta da unidade habitacional estudada.	49
FIGURA 6: Modelo do edifício de interesse utilizado na simulação para os casos base.	50
FIGURA 7: Exemplo do modelo do entorno nas simulações no EnergyPlus™	50
FIGURA 8: Modelo do pavimento tipo.....	51
FIGURA 9: Domínio definido para a alta densidade constante. Entrada de ar em 0° e 45°	52
FIGURA 10: Cortes do domínio do modelo de alta densidade com altura variável.	53
FIGURA 11: Malha original gerada e detalhes do face sizing e inflated boundary	56
FIGURA 12: Domínio do modelo de alta densidade com altura variando. Entrada do vento 0°	61
FIGURA 13: Conformação dos lotes a serem usados nos modelos de entorno.	73
FIGURA 14: Desenho das quadras dos modelos de entorno edificado.....	74
FIGURA 15: Modelos de entorno definidos.....	75
FIGURA 16: Planos de velocidade de vento, modelo com altura constante, $\theta = 0^\circ$	86
FIGURA 17: Planos de velocidade de ventos, modelo com altura variável, $\theta = 0^\circ$	86
FIGURA 18: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 0^\circ$	87
FIGURA 19: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 0^\circ$	87
FIGURA 20: Planos de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 45^\circ$	89
FIGURA 21: Planos de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 45^\circ$	89
FIGURA 22: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 45^\circ$	91
FIGURA 23: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 45^\circ$	91
FIGURA 24: Planos de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 90^\circ$	93
FIGURA 25: Planos de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 90^\circ$	93
FIGURA 26: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 90^\circ$	94
FIGURA 27: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 90^\circ$	94
FIGURA 28: Cenário 2 simulado por Leite (2015).....	97
FIGURA 29: Variação de Cp ao longo da fachada frontal, vento leste. Leite (2015). .	98
FIGURA 30: Variação de Cp ao longo da fachada frontal, altura constante, $\theta = 0^\circ$	99
FIGURA 31: Variação de Cp ao longo da fachada frontal, altura variável, $\theta = 0^\circ$	99

FIGURA 32: Variação de C_p ao longo da fachada frontal, vento sudeste. Leite (2015).	100
FIGURA 33: Variação de C_p ao longo da fachada frontal, altura constante, $\theta = 45^\circ$.	100
FIGURA 34: Variação de C_p ao longo da fachada frontal, altura variável, $\theta = 45^\circ$	101
FIGURA 35: Maquete e planta da área de Moema ensaiada em túnel de vento.....	102
FIGURA 36: Modelo no CFD com os perfis verticais e planta da área de Moema modelada.....	102
FIGURA 37: Localização dos perfis verticais na simulação de Fortaleza. Vento Leste.	103
FIGURA 38: Localização dos perfis verticais na simulação de Fortaleza. Vento Sudeste.	103
FIGURA 39: Pontos dos perfis de velocidade nas simulações com $\theta = 0^\circ$	104
FIGURA 40: Perfis de velocidade, modelo com alturas variáveis, orientação de vento de 0°	104
FIGURA 41: Comparação dos resultados de CFD e medição para o P1, Moema.....	105
FIGURA 42: Comparação dos resultados de CFD e medição para o P2, Moema.....	106
FIGURA 43: Resultados de CFD para o P2, Fortaleza.	106
FIGURA 44: Comparação dos resultados de CFD e medição para o P3, Moema.....	108
FIGURA 45: Comparação dos resultados de CFD e medição para o P4, Moema.....	110
FIGURA 46: Resultados de CFD para o P5, Fortaleza.	110
FIGURA A2.1: Perfis de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 135^\circ$	145
FIGURA A2.3: Perfis de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 135^\circ$	145
FIGURA A2.5: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 135^\circ$..	146
FIGURA A2.6: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 135^\circ$	146
FIGURA A2.7: Perfis de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 180^\circ$	148
FIGURA A2.9: Perfis de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 180^\circ$	148
FIGURA A2.11: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 180^\circ$	149
FIGURA A2.12: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 180^\circ$...	149
FIGURA A2.13: Perfis de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 225^\circ$	151
FIGURA A2.15: Perfis de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 225^\circ$	151
FIGURA A2.17: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 225^\circ$	152
FIGURA A2.18: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 225^\circ$...	152

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Quadro resumo da normalização levantada para este trabalho.	26
TABELA 2 - Cidades escolhidas para o estudo.....	46
TABELA 3 – Características da envoltória simulada	51
TABELA 4 – Cálculo de blocagem nos domínios dimensionados conforme literatura. 54	
TABELA 5 – Cálculo de blocagem nos domínios dimensionados a partir da relação entre a altura e a largura do modelo.	54
TABELA 6 – Cálculo do número de elementos das malhas	57
TABELA 7 – Valores de C_p obtidos no teste de independência de malha.	58
TABELA 8 – Dados de qualidade das malhas simuladas.....	59
TABELA 9 – Coeficientes de rugosidade do entorno	60
TABELA 10 – Requisitos de desempenho térmico segundo a NBR 15.575	62
TABELA 11 – Dias típicos de Verão e Inverno estabelecidos para Belo Horizonte	62
TABELA 12 – Parâmetros urbanísticos levantados.....	68
TABELA 13 – Densidade populacional das cidades levantadas.	68
TABELA 14 – Características do desenho urbano das cidades levantadas.	69
TABELA 15 – Número de pavimentos das edificações levantadas.	70
TABELA 16 – Frequência de ocorrência dos pavimentos e alturas finais das edificações.	72
TABELA 17 – Dimensionamento dos lotes de acordo com a altura das edificações... 72	
TABELA 18 – Valores de G_{Hr} obtidos na simulação para as 3 orientações.....	81
TABELA 19 – Valores de $E_{qNumAmbResfr}$ para cada ambiente de permanência prolongada.....	82
TABELA 20 – Valores de $E_{qNumEnvResfr}$ para cada Unidade Habitacional.....	82
TABELA 21 – Valores de CA obtidos na simulação para as 3 orientações.	83
TABELA 22 – Valores de $E_{qNumAmbA}$ para cada ambiente de permanência prolongada.....	83
TABELA 23 – Valores de $E_{qNumEnvA}$ para cada Unidade Habitacional.....	84
TABELA 24 – Valores de $E_{qNumEnv}$ para cada Unidade Habitacional	84
TABELA 25 – Classificação do nível de eficiência energética da envoltória.....	84
TABELA A1.1 – Temp. internas do ar ($^{\circ}C$) 1 $^{\circ}$ pav., orientação 0 $^{\circ}$, dia típico de inverno	133
TABELA A1.2 – Temp. internas do ar ($^{\circ}C$) 7 $^{\circ}$ pav., orientação 0 $^{\circ}$, dia típico de inverno (continua).....	133

TABELA A1.3 – Temp. internas do ar (°C) 13° pav., orientação 0°, dia típico de inverno	134
TABELA A1.4 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 45°, dia típico de inverno	135
TABELA A1.5 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 45°, dia típico de inverno (continua).....	135
TABELA A1.6 – Temperaturas internas do ar no (°C) 13° pav., orientação 45°, dia típico de inverno.....	136
TABELA A1.7 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 90°, dia típico de inverno	137
TABELA A1.8 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 90°, dia típico de inverno (continua).....	137
TABELA A1.9 – Temperaturas internas do ar (°C) 13° pav., orientação 90°, dia típico de inverno.....	138
TABELA A1.10 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 0°, dia típico de verão	139
TABELA A1.11 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 0°, dia típico de verão (continua).....	139
TABELA A1.12 – Temp. internas do ar (°C) 13° pav., orientação 0°, dia típico de verão	140
TABELA A1.13 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 45°, dia típico de verão	141
TABELA A1.14 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 45°, dia típico de verão (continua).....	141
TABELA A1.15 – Temp. internas do ar (°C) 13° pav, orientação 45°, dia típico de verão	142
TABELA A1.16 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 90°, dia típico de verão	143
TABELA A1.17 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 90°, dia típico de verão (continua).....	143
TABELA A1.18 – Temp. internas do ar (°C) 13° pav., orientação 90°, dia típico de verão	144

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: Valores médios de C_p obtidos nas aberturas.....	58
GRÁFICO 2: Frequência de ocorrência para a direção dos ventos em BH.	66
GRÁFICO 3: Resultado do levantamento do número de pavimentos.....	71
GRÁFICO 4: Dia típico de inverno do AP01 do 1ºPAV com orientação 0°	76
GRÁFICO 5: Dia típico de verão do AP01 do 1ºPAV com orientação 0°	76
GRÁFICO 6: Temperaturas internas mínimas, dia típico de inverno, orientação 0°	78
GRÁFICO 7: Temperaturas internas mínimas, dia típico de inverno, orientação 45° ..	78
GRÁFICO 8: Temperaturas internas mínimas, dia típico de inverno, orientação 90° ..	79
GRÁFICO 9: Temperaturas internas máximas, dia típico de verão, orientação 0°	79
GRÁFICO 10: Temperaturas internas máximas, dia típico de verão, orientação 45° ..	80
GRÁFICO 11: Temperaturas internas máximas, dia típico de verão, orientação 90° ..	80
GRÁFICO 12: C_p nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 0^\circ$	88
GRÁFICO 13: C_p nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 0^\circ$	88
GRÁFICO 14: C_p nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 45^\circ$..	92
GRÁFICO 15: C_p nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 45^\circ$	92
GRÁFICO 16: C_p nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 90^\circ$..	95
GRÁFICO 17: C_p nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 90^\circ$	95
GRÁFICO 18: ΔC_p de cada pavimento de acordo com a orientação de vento. Altura constante.....	96
GRÁFICO 19: ΔC_p de cada pavimento de acordo com a orientação de vento. Altura variável	96
GRÁFICO 20: Perfis de velocidades para o P1, caso de estudo.....	105
GRÁFICO 21: Perfis de velocidades para o P2, caso de estudo.....	107
GRÁFICO 22: Perfis de velocidades para o P3, caso de estudo.....	109
GRÁFICO 23: Perfis de velocidades para o P4, caso de estudo.....	111
GRÁFICO 24: Percentual de horas em conforto por tipo de modelo: Altura Constante	112
GRÁFICO 25: Percentual de horas em conforto por tipo de modelo: Altura Variável	112
GRÁFICO 26: Percentual de horas em conforto por estação do ano: Verão.....	113
GRÁFICO 27: Percentual de horas em conforto por estação do ano: Inverno	114
GRÁFICO 28: Conforto térmico com as temperaturas operativas horárias. Altura constante.....	115
GRÁFICO 29: Conforto térmico com as temperaturas operativas horárias. Altura variável	116
GRÁFICO 30: Frequência de ocorrência de renovação de ar por hora.	117

GRÁFICO 31: Médias anuais de renovações de ar por hora.	118
GRÁFICO 32: correlação do Q01 do 1° e 13° pavimentos do AP01. Altura variável.	119
GRÁFICO 33: Temperatura operativa interna X variação de modulação de abertura	119
GRÁFICO 34: Correlação do Q01 e Q02 do 13° pavimentos do AP01. Altura variável	120
GRÁFICO A2. 1: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 135^\circ$	147
GRÁFICO A2. 2: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 135^\circ$	147
GRÁFICO A2.3: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 180^\circ$	150
GRÁFICO A2.4: Gráfico de Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 180^\circ$	150
GRÁFICO A2.5: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 225^\circ$	153
GRÁFICO A2.6: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 225^\circ$	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACH – *Air Change per Hour* – Renovações de ar por hora
AFN – *Air Flow Network*
AIVC – *Air Infiltration and Ventilation Center*
ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*
AUTOCAD® – Marca registrada do programa da empresa Autodesk
BEN – Balanço Energético Nacional
CFD – *Computational Fluid Dynamics* – Fluidodinâmica Computacional
CFX® – Programa de simulação em CFD da empresa ANSYS
Cp – Coeficiente de pressão
CT – Capacidade Térmica
DNS – *Direct Numerical Simulation*
ENCAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EnergyPlus™ – Programa de simulação termo energética - DOE
ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
LABEEE UFSC – Laboratório de Eficiência Energética de Edificações
LES – *Large Eddy Simulation*
NBR – Norma Brasileira
PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem
POC – Percentual de horas em conforto
RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes*
RTQ-C – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SC – Sistema de Cobertura
SVVE – Sistema de Vedação Vertical Externa
SWERA – *Solar and Wind Energy Resource Assessment*
TMY – *Typical Meteorological Year*
TRY – *Test Reference Year*
U – Transmitância Térmica
UCL – Urban Canopy Layer – Camada Dossel Urbana
ZB – Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Justificativa.....	16
1.2. Objetivos	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.2.3 Estrutura do trabalho	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. Normalização em ventilação de edifícios habitacionais	20
2.1.1. Normalização Brasileira	21
2.1.2. Normalização internacional.....	23
2.2. Metodologias de predição de ventilação em edificações e seu entorno.....	27
2.2.1. Modelos experimentais	27
2.2.2. Modelos empíricos.....	29
2.2.3. Modelos teóricos ou analíticos	30
2.2.3.1 Modelos multizona	30
2.2.3.2 Modelos Zonais.....	31
2.2.3.3 Fluido Dinâmica Computacional (CFD)	32
2.3. Parâmetros de simulação	33
2.3.1. Arquivos Climáticos	33
2.3.2. Entorno edificado	34
2.3.3. Coeficientes de pressão.....	36
2.3.4. Domínio	37
2.3.5. Geração e qualidade de malha	38
2.3.6. Modelos de turbulência	39
2.3.7. Condições de contorno	41
3. METODOLOGIA	43
3.1. Definição do entorno edificado	45
3.2. Definição da Unidade Habitacional e das características da envoltória	48
3.3. Configuração das simulações no CFX®	52
3.3.1. Definição do domínio a ser simulado	52
3.3.2. Definição da malha	55
3.3.3 Configuração das condições de contorno	59
3.4. Configuração das simulações no EnergyPlus™	61
3.4.1. Simulação para a NBR 15.575:2013	61

3.4.2. Simulação para o RTQ-R.....	63
3.4.3. Simulação do caso de estudo	65
3.5. Aplicação da metodologia proposta à cidade de Belo Horizonte, MG	66
4. RESULTADOS	67
4.1. Definição dos modelos urbanos teóricos de entorno edificado	67
4.2. Resultados das simulações computacionais	75
4.2.1. Resultados para a NBR 15.575.....	75
4.2.2. Resultados para o RTQ-R.....	81
4.2.3. Resultados para o caso em estudo	85
4.2.3.1. Resultados da simulação em CFD	85
4.2.3.2. Comparação dos resultados da simulação em CFD com a literatura.	97
4.2.3.3. Resultados da simulação no EnergyPlus™	111
5. CONCLUSÃO	121
REFERÊNCIAS	128
APÊNDICES.....	133
A1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA A NBR 15.575	133
A2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM CFD.....	145

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

O uso da ventilação natural em edifícios, principalmente residenciais, é uma prática habitual no país, mas que, em via de regra, não é estudada de forma cuidadosa no período de projeto, sendo feita de forma empírica e se atendo apenas ao que as legislações municipais exigem, o que em sua maioria é apenas uma relação entre a área de abertura e a área de piso dos cômodos de permanência prolongada. A correta avaliação do aproveitamento da ventilação natural depende de muitos fatores inerentes ao projeto como a orientação da implantação em relação à direção dominante dos ventos, a geometria da edificação, a dimensão e tipologia das aberturas e esquadrias, altura de pé direito, e de fatores de difícil leitura como o comportamento sazonal dos ventos, diferenças de pressão nas fachadas, influência do entorno edificado na circulação do vento e o próprio comportamento do vento no interior dos ambientes.

A adoção de estratégias de ventilação natural - como efeito chaminé, ventilação cruzada e orientação do edifício segundo a direção dos ventos - adequadas à realidade de cada projeto, é extremamente importante no que diz respeito ao fornecimento de condições de conforto térmico aos usuários, segundo Cândido *et al*:

Em climas quentes e úmidos, a ventilação natural é uma estratégia passiva essencial para manter o conforto térmico no interior das edificações e também pode ser usada como uma estratégia de projeto visando a conservação de energia para reduzir as cargas de resfriamento internas necessárias, removendo o calor acumulado pela massa térmica da edificação. (CÂNDIDO *et al*, 2010.p.222)¹

Esse papel importante desempenhado pela ventilação natural se deve, pois, dependendo da velocidade com que o ar percorre o corpo humano, ele afeta as taxas de perda de calor convectivo e evaporativo e assim influencia as condições de conforto térmico.

A importância da ventilação natural no país já é reconhecida pela normalização por meio da norma brasileira de desempenho térmico de edificações, ABNT:NBR 15220-3:2005, que apresenta diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, e coloca a ventilação natural como estratégia a ser adotada em todas as zonas bioclimáticas brasileiras, apenas com ressalvas às zonas 4,6 e 7 de clima predominantemente quente e seco, onde ela deve ser feita apenas quando a

¹ Tradução do autor. Original em inglês: "In hot humid climates, natural ventilation is an essential passive strategy in order to maintain thermal comfort inside buildings and it can be also used as an energy-conserving design strategy to reduce building cooling loads by removing heat stored in the buildings thermal mass. (CÂNDIDO *et al*. 2010. p.222)

temperatura do ar externo estiver menor que a temperatura do ar interno. Entretanto essa norma é dirigida apenas a habitações de interesse social e, principalmente, não apresenta uma metodologia de avaliação do real desempenho da edificação projetada no que diz respeito ao uso da ventilação natural.

O conforto térmico dos usuários impacta a eficiência energética das edificações, uma vez que a tolerância ao desconforto é menor quando se pode utilizar tecnologias de climatização artificial de ambientes. Essa sensação térmica adequada é que em última instância vai determinar o uso ou não de estratégias ativas de condicionamento térmico e assim, conseqüentemente aumentando o consumo energético dessas unidades habitacionais. O impacto socioeconômico da ausência de conforto térmico no interior dos ambientes pode ser expressivo, principalmente para populações de baixa renda, nas quais o aumento no consumo de energia pelo uso de ventiladores ou condicionadores de ar pode comprometer parte da renda que seria usada para outros fins.

Em 2015, 50,76% da energia elétrica gerada no país foi consumida nas edificações residenciais, comerciais e públicas, superando o consumo da indústria que foi de 37,61%. Desse total, as edificações residenciais foram responsáveis por 49,48%, ou seja, 25,11% de toda energia elétrica ofertada no país. (BEN, 2016). Segundo Lamberts (2014), a maior parte do consumo residencial é para refrigeração, chuveiros e iluminação artificial, porém os sistemas de condicionamento artificial começaram a ter uma participação maior, chegando a 20% dele na média nacional. O crescimento do poder de compra da população, os incentivos fiscais do governo para a linha branca (eletrodomésticos como geladeiras, fogões e etc.), e a redução no preço dos condicionadores de ar nos últimos anos provavelmente devem ter alterado o perfil de consumo das residências, aumentando a parcela pelo uso do ar condicionado.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2016), no ano de 2015, 75,5% da energia elétrica produzida no país foi de origem renovável, que inclui a geração de base hidroelétrica somadas à produção de biomassa e energia eólica. Essa realidade deixa o Brasil em uma situação melhor que grande parte dos outros países, que dependem da produção de energia pela queima de derivados de petróleo ou fissão nuclear em usinas termoelétricas. A vantagem brasileira na verdade esconde uma vulnerabilidade do país ao regime de chuvas que abastece os reservatórios das usinas hidroelétricas, e a períodos de seca como o que ocasionou o racionamento de energia no ano de 2001, que somado à falta de investimentos na produção e distribuição de energia, obrigou o país a reduzir o seu consumo, levando à queda do PIB entre outras conseqüências.

Além de medidas para aumentar a produção e melhorar a distribuição de energia elétrica, chegou-se à conclusão de que era importante aumentar a eficiência no consumo final dessa energia. Assim, em 17 de outubro de 2001 foi aprovada a Lei 10.295 que entre outras coisas, diz ser necessária a criação de níveis máximos de consumo de energia ou mínimos de eficiência energética nos equipamentos e nas edificações construídas no País (BRASIL, 2001, p.01). Assim, pela primeira vez no país o governo federal chamou a atenção para a relevância de se investigar o consumo energético das edificações.

Apesar da viabilidade do uso da ventilação natural como forma de condicionamento passivo de edificações no Brasil, o levantamento feito por Nelson Solano Vianna em 2001 (VIANNA, 2001) sobre o estado da arte em pesquisa na área de conforto ambiental mostra que a área de ventilação natural era tema de apenas 3,3% da pesquisa nacional. Esse levantamento foi conduzido em pesquisas de Pós-graduação, artigos em eventos técnicos da área e em revistas especializadas nacionais até o ano de 2001. Em uma tentativa de atualizar esses dados apresentados por Vianna, foi feito um levantamento nos anais dos dois maiores eventos técnicos da área mais recentes, o Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, ENTAC 2016 e o Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, ENCAC 2015. É possível perceber que a situação não mudou muito. No primeiro, na área específica Conforto Ambiental e Eficiência Energética apenas 11,7% tratavam do tema ventilação natural e no ENCAC 2015 era de apenas 6,9% do total.

As pesquisas em ventilação natural são de grande importância para que seja possível, através do conhecimento gerado, a criação de parâmetros normativos mais assertivos na previsão da ventilação natural na fase de projeto e na obtenção de conforto térmico dos usuários. De forma complementar, a divulgação dessas pesquisas e uma certa tradução do conteúdo para uma linguagem mais acessível permitiria uma disseminação maior desse conhecimento e a utilização do mesmo por parte dos projetistas.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros existentes na normalização brasileira em ventilação natural de edificações habitacionais, analisando, por meio da simulação computacional de situações representativas do contexto urbano das cidades brasileiras, se os mesmos são capazes de garantir conforto térmico aos usuários. A partir daí, serão sugeridas diretrizes para projeto de ventilação natural nos casos estudados.

1.2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos destacam-se os abaixo relacionados:

- Identificar os parâmetros relativos à ventilação natural de edifícios habitacionais na normalização brasileira e estrangeira;
- Identificar os modelos de predição em ventilação natural de edifícios;
- Desenvolver um modelo médio de entorno edificado que seja representativo das diferentes situações de adensamento nas cidades estudadas;
- Verificar por meio de simulação computacional se as situações estudadas atendem à normalização vigente no país;
- Analisar se nos casos em que as normas brasileiras são atendidas também é atingido o conforto térmico dos usuários;
- Definir diretrizes de projeto de ventilação natural para os casos estudados com base em valores de troca de ar por hora com objetivo de atingir o conforto térmico dos usuários.

1.2.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução, onde são apresentadas as justificativas que levaram ao desenvolvimento dessa pesquisa e os objetivos geral e específicos que se pretende alcançar. O segundo capítulo traz um levantamento dos parâmetros normativos nacionais e internacionais em ventilação de edifícios e uma revisão da literatura sobre os métodos de predição da ventilação natural em edifícios e sobre os parâmetros mais importantes para as simulações computacionais e para as análises a serem desenvolvidas nos capítulos subsequentes.

A metodologia é apresentada no terceiro capítulo, onde são expostos os passos utilizados para a definição do estudo de caso, para a análise segundo as normas brasileiras, e para as simulações em CFD e no programa *EnergyPlus*TM. No capítulo quatro são apresentados os resultados com os modelos de entorno teórico criados e os resultados das simulações para a NBR 15.575, para o RTQ-R e para o estudo de caso, no CFD e no *EnergyPlus*TM. Em seguida, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho de acordo com os resultados alcançados, as limitações do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no estudo e os apêndices.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção do trabalho será apresentada a revisão da literatura feita com o intuito de identificar: quais os parâmetros normativos existentes no Brasil e no mundo que dizem respeito ao dimensionamento dos sistemas de ventilação natural dos edifícios habitacionais; quais os métodos de predição, seus potenciais, suas aplicabilidades nas etapas de projeto; os principais parâmetros para simulações computacionais; e os parâmetros de análise da ventilação natural e do conforto térmico dos usuários.

2.1. Normalização em ventilação de edifícios habitacionais

Nesta subseção serão apresentados os parâmetros normativos que tratam da ventilação de edificações residenciais. As normas brasileiras analisadas são: a Norma de Desempenho Térmico de Edificações ABNT:NBR 15220:2005, a Norma de Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários ABNT:NBR 16401-3:2008, o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R de 2012, e a Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais ABNT:NBR 15.575:2013. O RTQ-R não é uma norma, e sim, um regulamento para a obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do Programa Brasileiro de Etiquetagem de edificações, o PBE Edifica. Entretanto, apesar de ainda ser voluntário, o programa tem como meta tornar-se compulsório e por essa razão foi considerado neste trabalho. Um indicativo deste movimento é que, desde agosto de 2014, segundo a Instrução Normativa SLTI n.º 2/2014 do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, é obrigatória a obtenção da etiqueta nível A do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) para prédios públicos federais novos ou que sofrerem grandes reformas.

No caso das normas estrangeiras serão analisadas as seguintes: a norma norte-americana ASHRAE 62.1:2013; o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) de Portugal (PORTUGAL, 2013a); outras normas europeias existentes apresentadas por Dimitroulopoulou (2012) e por Kunkel *et. al* (2015); o *Nacional Construction Code* da Austrália (ABCB, 2016) e o guia de eficiência energética de edifícios residenciais de Hong Kong (HKBD, 2014). A escolha destes países teve como objetivo levantar, além da normalização dos países centrais (União Européia e Estados Unidos), países que possuem climas mais próximos aos encontrados no Brasil.

2.1.1. Normalização Brasileira

A Norma de Desempenho Térmico de Edificações ABNT:NBR 15220:2005 traz no seu terceiro volume o zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. No que tange à ventilação das habitações, aqui considerada como ventilação natural, ela apresenta para cada zona bioclimática (ZB) uma diretriz de dimensão das aberturas. Essa diretriz é uma relação de área de aberturas pela área de piso, com valores de 10 a 15% para aberturas consideradas pequenas, indicadas para a ZB 7, e com valores maiores que 40% para aberturas consideradas grandes, indicadas para a ZB 8. As demais zonas, 1 a 6, têm como recomendação aberturas médias, com uma área de abertura indicada de 15 a 25% da área de piso.

A Norma de Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários ABNT:NBR 16401:2008 é a revisão da ABNT:NBR 6401:1980 e trata em seus três volumes, do projeto de instalações de ar condicionado, dos parâmetros de conforto térmico e da qualidade do ar interior, aplicáveis a sistemas centrais de qualquer capacidade e sistemas unitários de capacidade igual ou superior a 10kW. Neste último volume ela traz, dentre outros parâmetros, vazões mínimas de ar exterior para ventilação, “[...] para promover a renovação do ar interior e manter a concentração dos poluentes no ar em níveis aceitáveis.” (ABNT, 2008). Esta norma utiliza a mesma metodologia da norma americana ASHRAE 62.1, onde são estipuladas vazões mínimas de ar por pessoa e por metro quadrado do ambiente, de acordo com o uso do mesmo, expressos em L/s (Litros por segundo). Não são estipulados nessa norma valores de renovação de ar para cômodos de edificações residenciais, sendo a categoria de uso mais próxima a de quartos de hotel, para a qual é exigida uma vazão de 2,5 L/s por metro quadrado e 0,3 L/s por ocupante.

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R de 2012, é o documento que norteia a classificação das edificações residenciais pelo PBE Edifica, que varia de A (mais eficiente), a E (menos eficiente). A avaliação pode ser feita para apenas a unidade habitacional autônoma, uma casa ou um apartamento, ou para toda a edificação caso ela seja multifamiliar. São avaliados o desempenho da envoltória para verão e para inverno, os sistemas de aquecimento de água e, no caso de edificações multifamiliares, podem ser avaliados também os sistemas e equipamentos presentes nas áreas comuns. A comprovação dos desempenhos pode ser feita de forma prescritiva ou por simulação computacional.

No que tange à ventilação natural, existem os pré-requisitos de área mínima de abertura em relação à área do piso do ambiente, sendo os valores para as zonas bioclimáticas 1 a 6 igual ou maior que 8%, para a ZB 7 igual ou maior que 5%, e para a ZB 8 igual ou maior que 10%. Outro pré-requisito em relação à ventilação natural presente no RTQ-R, é de ventilação cruzada para as zonas bioclimáticas 2 a 8, onde a razão entre as aberturas de entrada e de saída do ar localizadas em pelo menos duas fachadas opostas ou adjacentes deve ser maior que 25%. Em ambos os casos o não atendimento dos pré-requisitos implica em nível máximo C no equivalente numérico da envoltória do ambiente para resfriamento.

Pela metodologia de simulação computacional para edificações naturalmente ventiladas é utilizado o índice de grau-hora de resfriamento, conceito tradicionalmente adotado em sistemas artificiais, que é determinado pela temperatura operativa horária do ambiente, calculada pelo programa de simulação. Como dados de entrada na simulação são inseridos os dados da geometria do ambiente, propriedades térmicas da envoltória, dimensões das aberturas, cargas térmicas de ocupação e equipamentos internos, orientação solar real de projeto. A ventilação natural é calculada pelo modelo de multizonas (ver item 2.2.3), considerada por um algoritmo capaz de calcular o fluxo de ar devido aos coeficientes de pressão das fachadas, área de abertura e interação do escoamento de ar entre as zonas.

A ABNT: NBR 15575:2013 Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais - Desempenho, que entrou em vigor no dia 19 de julho de 2013, é uma revisão da norma aprovada inicialmente em 2008. Esta norma trata do desempenho mínimo obrigatório, intermediário e superior, para as edificações habitacionais e os sistemas que ela possui, indicando índices a serem atendidos, independentemente de forma ou composição dos mesmos. A norma abrange vários aspectos das edificações como desempenho estrutural, segurança no uso e ocupação, e outros, dentre os quais está o desempenho térmico. Neste capítulo, desempenho térmico, a NBR 15575 referenda o que já havia sido disposto na NBR 15220, fazendo com que essas diretrizes se tornassem os parâmetros mínimos para qualquer edificação habitacional, mas traz algumas atualizações em relação aos valores praticados.

A ABNT: NBR 15575/2013 permite a comprovação do desempenho térmico mínimo através de um método prescritivo, ou de simulação computacional caso não seja atingido pelo método prescritivo. Para atendimento aos níveis intermediário e superior é obrigatório o uso de simulação computacional. No método prescritivo é comprovado o desempenho térmico a partir do cálculo das propriedades termo físicas da envoltória da edificação, como a transmitância térmica (U) e a capacidade térmica (CT) dos sistemas

de vedação vertical externos (SVVE) e a transmitância térmica dos sistemas de cobertura (SC), que envolvem os cômodos de permanência prolongada. A ventilação natural neste caso é considerada apenas pela relação entre as áreas de aberturas para ventilação e área de piso dos ambientes de permanência prolongada, que devem obedecer ao disposto no código de obra do município em que a edificação será implantada, e caso não haja, deverão ser usados os índices apresentados na norma.

A comprovação do desempenho térmico pela metodologia de simulação computacional deve ser feita em um programa paramétrico capaz de permitir a determinação do comportamento térmico das edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima; ser capaz de reproduzir os efeitos da inércia térmica e ser validado pela ASHRAE Standard 140. A simulação deverá ser conduzida para um dia típico de verão e de inverno, cujos dados climáticos são fornecidos pela própria norma, e deverão ser calculadas as temperaturas máxima e mínima do ar interno, sendo que os valores encontrados deverão obedecer às condições dispostas na norma. O modelo a ser simulado é criado com os dados de geometria e orientação solar, propriedades térmicas da envoltória, sem cargas internas, e a ventilação natural deve ser considerada constante com o valor de volume de ar admitido no ambiente igual a uma renovação de ar por hora. Caso não sejam atendidos os critérios, a unidade habitacional deve ser simulada novamente considerando uma taxa de renovação de ar igual a cinco renovações de ar por hora e um sombreamento que bloqueie 50% da radiação solar direta que entraria pela janela. (ABNT, 2013).

2.1.2. Normalização internacional

A norma americana ASHRAE 62.1 – 2013 *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality* faz uma distinção entre ambientes mecanicamente e naturalmente ventilados. Para ambientes ventilados mecanicamente são fornecidos valores de vazões mínimas para cada tipo de uso do ambiente em função da sua ocupação e área, expressos em L/s. Considerando-se, por exemplo, um quarto de 12 metros quadrados com um pé direito de 2,50m e com dois ocupantes, a taxa de renovação mínima exigida seria de 30,96m³/h, o que corresponderia a aproximadamente uma troca de ar por hora², uma vez que o volume do cômodo seria igual a 30m³. Para ambientes ventilados naturalmente os parâmetros são qualitativos, como a razão entre a área da abertura e do piso e com a profundidade do ambiente em relação à altura do pé-direito.

Em Portugal, o Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação (REH), que compõe o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) que

² Os valores em L/s foram convertidos em m³/h para permitir o cálculo da troca de ar por hora (ACH)

entrou em vigor 2013 (PORTUGAL, 2013a), aplica-se a todas as edificações habitacionais, exceto as unifamiliares que possuam área útil menor que 50m². No Despacho n.º 15793/2013 (PORTUGAL, 2013b) é regulamentado a forma como deve ser calculada a ventilação natural, apresentando modelos empíricos para cálculo da ventilação por efeito chaminé e por ação dos ventos, e é referenciada a NP 1037-1 que determina o valor de renovação de ar por hora para os ambientes. A Norma Portuguesa de ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Parte 1 – Edifícios de Habitação. Ventilação Natural, NP 1037-1 de 2002 (IPQ, 2002) define que as exigências mínimas de renovação de ar devem ser de uma renovação de ar por hora para os compartimentos principais, e de quatro renovações de ar por hora para os compartimentos de serviço.

Em uma revisão das normas de ventilação europeias, Dimitroulopoulou (2012) discutiu sobre a importância da qualidade do ar interior e da prevenção à ocorrência da chamada Síndrome dos Edifícios Doentes, levantou os parâmetros normativos existentes até então e apresentou diversos estudos e medições que foram conduzidos em residências para aferição dos níveis de renovação de ar e a qualidade do ar interno que ocorriam na prática. De forma semelhante, Kunkel *et. al* (2015), fizeram uma análise da normalização de qualidade do ar interior, conforto térmico e iluminação natural de edificações residenciais em oito países membros da União Européia, relatório esse publicado pelo *Buildings Performance Institute Europe* (BPIE). Dentre as normas europeias apresentadas nestes dois estudos, os valores encontrados vão de 0,5 a 1,5 trocas de ar por hora para ambientes climatizados artificialmente. As normas da Alemanha e Itália são as únicas que apresentam valores específicos para espaços ventilados naturalmente, sendo esses valores menores que aqueles exigidos para espaços mecanicamente ventilados.

O *National Construction Code* australiano do ano de 2016 possui uma estrutura semelhante à NBR 15575, sendo composta de vários volumes tratando do desempenho das edificações, neste caso não apenas as residenciais, em diversas disciplinas como estrutura, resistência ao fogo, conforto ambiental e outras. No capítulo de conforto ambiental ela traz como requisito para espaços ventilados naturalmente que a área da abertura em relação à área de piso deve ser igual ou maior que 5% (ABCB, 2016). Para ambientes mecanicamente ventilados devem ser atendidos os critérios da Norma Australiana AS 1668.2 - 2012, que traz uma metodologia de cálculo de renovação de ar interno semelhante à ASHRAE 62.1, somando-se vazões de ar por pessoa e por intensidade de atividade metabólica, e por área de piso do ambiente.

O departamento de edificações de Hong Kong lançou em 2014 o “*Guidelines on Design and Construction Requirements for Energy Efficiency of Residential Buildings*” com o objetivo de prover orientação técnica aos atores envolvidos na concepção e construção de edificações residenciais visando o aprimoramento da eficiência energética das mesmas (HKBD, 2014). Este guia apresenta requisitos apenas para ambientes ventilados naturalmente, mas possui parâmetros diferentes para unidades habitacionais que permitem ventilação cruzada e nas que a ventilação é feita por uma única fachada. No caso de ventilação cruzada, a área operável da abertura (área útil para ventilação) não deve ser menor que 12,5% da área de piso, e o trajeto que o escoamento de ar irá percorrer entre a abertura de entrada e de saída não deverá ser maior que 12 metros.

Para unidades ventiladas naturalmente por apenas uma fachada é necessário que a área operável da abertura seja igual ou maior que 20% da área de piso, e a profundidade do ambiente medida a partir do centro da abertura não deve ser maior que 4,5 metros. Neste caso é recomendado também que o cômodo possua mais de uma janela, separadas entre si. É apresentada também uma metodologia baseada em desempenho através de simulação computacional como uma forma alternativa de comprovação do desempenho da unidade habitacional frente à ventilação natural. O modelo de simulação computacional definido no guia é o de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD, em sigla em inglês) que será apresentado no item 2.2.5 deste trabalho. Nessa metodologia é possível fazer um método simplificado, onde é simulado apenas o fluxo interno à unidade habitacional. O outro método considera o entorno edificado. Em ambos os casos os cômodos de permanência prolongada devem apresentar velocidades de vento médias acima de 0,4m/s.

Para melhor compreensão de toda a normalização em ventilação de edificações residenciais levantadas para este trabalho, nacionais e internacionais, foi confeccionado o quadro a seguir (TAB. 1) com um resumo da metodologia de cada norma e alguns de seus parâmetros.

TABELA 1 – Quadro resumo da normalização levantada para este trabalho.

NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA	
Códigos de obras	Área de abertura / Área de piso. Em Belo Horizonte: 1/6 (17%) para ambientes de permanência prolongada e 1/8 (12,5%) para ambientes de permanência transitória.
NBR 15220:2005	Área de abertura / Área de piso: ZB1 a 6 = 15 - 25%; ZB7 = 10 - 15% e ZB8 >40%.
NBR 16401:2008	Vazão de ar externo por metro quadrado somada a vazão de ar externo por habitante.
RTQ-R	Área de abertura / Área de piso: ZB1 a 6 = 8%; ZB7 = 5% e ZB8 = 10%. Área de entrada / Área de saída > 25% Simulação computacional – Graus-Hora de Resfriamento
NBR 15575:2013	Área de abertura / Área de piso – Usar os valores do código de obras do município. Simulação computacional – Temperatura interna máxima e mínima em uma simulação de dias típicos de verão e inverno.
NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL	
EUA ASHRAE 62.1	AC: Vazão de ar externo por metro quadrado somada a vazão de ar externo por habitante. VN: Área de abertura / Área de piso e profundidade do ambiente
PORTUGAL	VN: 1 REN/h
UE	AC: 0,5 a 1,5 REN/h
AUSTRÁLIA	AC: Vazão de ar externo por metro quadrado somada a vazão de ar externo por habitante. VN: Área de abertura / Área de piso
HONG KONG	Ventilação cruzada: Área de abertura / Área de piso > 12,5% e caminho percorrido internamente pelo ar < 12m. Ventilação por uma fachada: Área de abertura / Área de piso > 20%. Simulação computacional: CFD.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2. Metodologias de predição de ventilação em edificações e seu entorno

Nesta subseção serão demonstrados os métodos de predição da ventilação natural em edificações. São eles: modelos experimentais (modelos em escala reduzida e modelos em escala real); modelos teóricos (modelos empíricos e modelos analíticos); modelos de multizona; modelos zonais; e os modelos de Fluidodinâmica Computacional, ou, *Computational Fluid Dynamics* (CFD). A ventilação de edifícios, seja ela mecanicamente ou naturalmente conduzida, tem como objetivo a renovação do ar interior para que sejam dispersados os poluentes provenientes de equipamentos, materiais de construção, de acabamento, e do metabolismo humano, e em alguns climas, também para prover conforto térmico aos usuários. Os modelos que serão apresentados a seguir foram desenvolvidos com o objetivo de prover ferramentas para que o desempenho da ventilação pudesse ser previsto ainda em etapa de projeto (CHEN, 2009).

2.2.1. Modelos experimentais

As pesquisas em ventilação natural utilizando experimentos com modelos em escala em túneis de vento começaram a partir dos anos 50 e tinham como objetivo investigar os escoamentos de ar através das aberturas e seu impacto na ventilação natural de edifícios (KARAVA, 2008). Inicialmente desenvolvidos para estudos em aerodinâmica espacial e de aeronaves, os túneis de vento começaram a ser adaptados e utilizados para estudos em aerodinâmica de edifícios e contextos urbanos. A principal adaptação nos túneis de vento entre os estudos aeroespaciais e os aplicados aos edifícios e ao meio urbano, é relativa à capacidade de o mesmo representar as características do escoamento do ar dentro da camada limite atmosférica, onde ele se apresenta turbulento e com velocidades de vento variando em altura, os chamados perfis de vento.

Grande parte do conhecimento produzido sobre a ventilação natural em edifícios se deve a experimentos em túneis de vento (TOLEDO, 1999). Neles é possível estudar desde modelos de grandes áreas urbanas até a escala de escoamento interno de um ambiente. Os estudos que vão da escala urbana até a fachada dos edifícios têm como dados mais comumente obtidos os campos de pressão nas fachadas dos modelos em escala e as características do escoamento entre as edificações. Obtidos esses dados, é possível através dos modelos teóricos, calcular as vazões de ar e velocidade do ar interno. Já através dos estudos na escala interna de um ambiente ou da edificação é possível obter diretamente os dados de velocidade do ar interno, o que segundo Carey e Ethridge (1999) gera maior precisão nos resultados.

Em uma extensiva revisão das metodologias de predição da ventilação natural e sua utilização recente, Qingyan Chen (CHEN, 2009) levantou algumas particularidades

entre os modelos experimentais de escala reduzida e de escala real. Segundo o autor os experimentos em escala reduzida usam de medições para a predição ou avaliação do desempenho da ventilação em escalas reduzidas do edifício ou do ambiente, sendo possível atingir boa precisão desde que as condições do escoamento sejam mantidas próximas à realidade. Entretanto, em situações que envolvem mecanismos de troca de calor, por exemplo, é mais complicado de se conseguir reproduzir os mesmos parâmetros encontrados na situação real. Na literatura levantada pelo autor foi possível constatar que este método tem sido mais frequentemente usado como forma de validação de métodos analíticos, empíricos e numéricos (simulações computacionais). Após a validação em experimentos em escala reduzida, os modelos analisados podem ser expandidos para a aplicação em situações de escoamento mais complexas.

Os experimentos em tamanho real podem ser subdivididos em duas categorias: medições em laboratórios ou medições *in loco*. Nas medições em laboratório é construído um protótipo em tamanho real do ambiente que se deseja estudar em uma câmara ambiental que reproduz as condições de contorno às quais o cômodo estará submetido, e então as medições são realizadas. Neste caso, uma das principais limitações dos modelos em escala reduzida, a falta de similaridade entre os resultados obtidos em escalas diferentes, é minimizada. Entretanto, mesmo em experimentos em tamanho real em laboratórios, simplificações na geometria ou nas condições de contorno serão necessárias. Os modelos em tamanho real em laboratórios apresentam limitações em relação ao tamanho possível de ser representado, não sendo viável representar ambientes muito grandes, como teatros, ou edifícios de múltiplos pavimentos (CHEN, 2009). É importante lembrar que em ambos os casos, os modelos experimentais não estão livres de erros, uma vez que dependem diretamente da calibração e da precisão dos equipamentos, e da qualidade de representação das condições de contorno.

Dentre as principais características dos modelos experimentais encontradas na literatura (COOK, 1974; CAREY E ETHERIDGE, 1999; PASSE E BATTAGLIA, 2015; CHEN, 2009) as que representam limitações são: a dificuldade em representar os perfis de ventos, a rugosidade do entorno edificado e o perfil turbulento do vento dentro da camada limite atmosférica; o uso de modelos teóricos para calcular os dados de vazão e velocidades do ar interno, a necessidade de um grande controle sobre o ambiente e as condições de ensaio para que não sejam gerados dados incorretos; e o alto custo desse tipo de experimento. Entretanto é possível perceber que os modelos experimentais fornecem os resultados mais realistas na predição do desempenho da ventilação em edifícios. Atualmente eles têm sido mais utilizados como forma de

obtenção de dados para a validação e/ou calibração de modelos computacionais, como o CFD, que após serem validados/calibrados são utilizados para a predição da ventilação em situações mais complexas, por períodos de tempo mais longos e/ou em edificações por inteiro.

2.2.2. Modelos empíricos

Os modelos empíricos de predição da ventilação natural são baseados em dados extraídos de modelos experimentais realizados em túneis de vento ou medições em edificações reais e em descrições dos princípios físicos que regem a fluidodinâmica. Estes modelos se baseiam nas equações fundamentais de conservação de massa, energia e concentrações químicas, e utilizam dados obtidos através de experimentos ou simulações para o desenvolvimento dos modelos empíricos através de coeficientes que os fazem funcionarem em determinados escopos (CHEN, 2009; SREBRIC, 2011). As aplicações destes modelos mostram que eles são efetivos e de baixo custo para a aplicação na predição do desempenho da ventilação em edifícios, entretanto são muito dependentes dos casos aos quais serão aplicados e de precisão restrita a casos de baixa complexidade (CHEN, 2009).

Os modelos empíricos encontrados na literatura levantada (TOLEDO, 1999; ALLARD, 1998; BITTENCOURT E CÂNDIDO, 2008; CHEN, 2009; SREBRIC, 2011; PASSE E BATTAGLIA, 2015) determinam o fluxo de ar interno em função das seguintes variáveis: área da abertura, velocidade do vento incidente, coeficiente de perda de pressão ao passar pela abertura (coeficiente de descarga), e a diferença entre os coeficientes de pressão na entrada e saída do ar. As diferenças entre esses modelos são: a inserção de outras variáveis, como relações entre as áreas de entrada e de saída, densidade do ar, gravidade; as condições em que foram realizados os experimentos; e as condições de ventilação que se pretende avaliar, ventilação cruzada ou por uma única fachada e ventilação por efeito chaminé. Os modelos prescritivos são capazes de oferecer uma primeira e rápida estimativa do desempenho da ventilação, e podem ser aplicados nas fases iniciais de projeto, porém, os projetistas devem ter em mente suas restrições e aplicabilidades (ALLARD, 1998).

Entretanto para a solução de problemas complexos de ventilação os resultados obtidos através desse método podem não ser precisos e, portanto, não serem informativos. Dentre a revisão da literatura encontrada sobre a utilização desse método, é mais recorrente o uso do mesmo para a predição de ventilação por efeito chaminé, por ação dos ventos, efeito combinado, mecanismos de troca de calor e de transporte de

poluentes, em aplicações de complexidade muito restrita, geralmente aplicada a apenas uma zona e a uma condição de contorno estacionária.

2.2.3. Modelos teóricos ou analíticos

Os modelos analíticos são derivados das equações fundamentais da dinâmica de fluidos e transferência de calor, como as equações de conservação da massa, energia, momento e poluentes (CHEN, 2009). As equações usam simplificações na geometria e nas condições de contorno, térmicas e do fluido, tais como estabilidade e simetria no fluxo de ar, que geram equações mais fáceis de serem aplicadas prescritivamente (PASSE E BATAGLIA, 2015). Segundo Qingyan Chen (CHEN, 2009) este método provavelmente é o mais antigo dos métodos de predição, ainda usado em diversos estudos, é rico em significados físicos, e possui baixo custo computacional.

Com o desenvolvimento da capacidade computacional, os modelos analíticos deram origem a aplicações mais complexas, como os modelos multizona, os modelos zonais e a fluidodinâmica computacional.

2.2.3.1 Modelos multizona

Os modelos multizona utilizam uma abordagem chamada de modelo nodal, onde cada elemento do modelo – massa de ar de uma zona, janela externa, porta interna e etc. – é representado por um nó ou um caminho, sobre o qual são resolvidas as equações de conservação de massa, energia e de concentração de poluentes. Dadas as descrições destes nós e caminhos, as distribuições de pressão na envoltória devido a pressão de vento – os coeficientes de pressão (C_p) – e as temperaturas internas das zonas, as pressões em cada nó são calculadas e assim o escoamento de ar nesse sistema pode ser resolvido (AXLEY, 2007; PASSE e BATAGLIA, 2015). As principais simplificações deste modelo são: a consideração do ar dentro das zonas como imóvel, assim, os cálculos de conservação de momento podem ser desprezados; e a consideração da distribuição uniforme das variáveis (temperatura, pressão, e etc.) dentro do volume de ar de cada zona, de forma a facilitar a resolução dos cálculos (CHEN, 2009). O grande avanço apresentado por esse tipo de modelo foi a capacidade de representar a interação entre o meio externo com o meio interno, e entre as zonas que compõem o interior do edifício, seja eles ventilados naturalmente ou mecanicamente, inclusive em grandes períodos de tempo, como por exemplo, simulações anuais.

De acordo com conversas nossas com muitos projetistas, os modelos multizona parecem ser a única ferramenta para obter resultados significativos para a predição do desempenho da ventilação em um edifício como um todo. (CHEN, 2009. p.852)³

Os principais dados necessários para dar entrada no modelo multizona são: a direção e velocidade de vento, retirados dos arquivos climáticos; as características das aberturas, e os coeficientes de descarga das mesmas; e finalmente os coeficientes de pressão (CÓSTOLA e ALLUCI, 2007). Por ser dependente da entrada de dados dos coeficientes de pressão nas fachadas, esse parâmetro é uma das principais fontes de incertezas em relação aos resultados das simulações. (CÓSTOLA, BLOCKEN e HENSEN, 2009).

2.2.3.2 Modelos Zonais

Os modelos zonais foram desenvolvidos com base em padrões de escoamento medidos e/ou no balanço das equações de conservação de massa e energia. Eles são um meio termo entre os modelos nodais, como o modelo multizona, e os modelos de CFD. O modelo zonal divide o volume de ar da zona em um número limitado de células, geralmente menor que mil, sendo a temperatura, a velocidade e a direção do ar calculada para cada um destes volumes. Este modelo tem sido usado para suprir a deficiência de modelos multizonais que consideram as características do volume interno de uma zona como uniformes, sendo capazes de prever a distribuição interna de temperatura e poluentes, interação entre o ar interno e as superfícies que o conformam, frias ou quentes, e radiação térmica assimétrica (MEGRI e HAGHIGHAT, 2007). Entretanto uma das deficiências dos modelos multizona que permanece no modelo zonal é a dificuldade de representar escoamentos com expressiva quantidade de momento, devido também à não solução das equações de momento.

Se o momentum do escoamento for muito forte, a precisão das simulações no modelo zonal irão sofrer consideravelmente. Isso porque os modelos zonais baseados em equações de balanço de massa e energia não resolvem equação de momento com intuito de reduzir os custos computacionais. (CHEN, 2009. p. 852)⁴

Segundo Qingyan Chen (CHEN, 2009), a maior parte dos estudos encontrados na literatura sobre os modelos zonais tratam do desenvolvimento destes modelos, sendo poucos mostrando a aplicação prática dos mesmos. São apontadas também utilizações

³ Tradução do autor. Original em inglês: "According to our private communications with many designers, the multizone models seem to be the only tool to obtain meaningful results for predicting ventilation performance in an entire building." (CHEN, 2009. p. 852)

⁴ Tradução do autor. Original em inglês: "If the flow momentum were strong, the accuracy of the zonal model simulations would suffer considerably. This is because the zonal models based on mass and energy balance equations do not solve momentum equation in order to reduce computing costs." (CHEN, 2009. p. 852)

dos modelos zonais em estudos de microclima urbano analisando o impacto de ilha de calor na estratificação da temperatura, e a estratificação de sistemas de ar condicionado e ventilação natural em grandes espaços (MEGRI e HAGHIGHAT, 2007).

2.2.3.3 Fluido Dinâmica Computacional (CFD)

O modelo CFD é baseado na discretização do volume do fluido estudado onde são solucionadas um conjunto de equações diferenciais de conservação da massa e do movimento (equações de Navier-Stokes), conservação da energia, da concentração de poluentes, e turbulência. Como resultado apresenta campos de distribuição espacial da pressão do ar, velocidade do ar, temperatura do ar, concentração de poluentes, e parâmetros de turbulência de escoamentos em ambientes internos e externos (ALLARD, 1998; CHEN, 2009; SREBRIC, 2011). Entre as variáveis consideradas nessas formulas estão: densidade do fluido, velocidade, viscosidade (atrito), força exercida, tempo, espaço (x,y,z), temperatura, forças tensões normais e de cisalhamento.

[...] CFD é considerado a técnica mais complexa e demorada, mas também a mais flexível. [...] o processo é demorado e apenas algumas situações típicas de vento, ao invés de todos os casos possíveis, são considerados na prática. Isto é o porquê do CFD ser mais comumente usado para testar comportamentos térmicos de um edifício em condições extremas, como por exemplo uma tarde quente de verão. Esta prática é considerada uma visão limitada porque os projetistas precisam entender como um edifício se comporta durante o ano todo e com qual frequência os ocupantes podem estar insatisfeitos com as condições interiores". (WANG *et al*, 2012)⁵

Segundo Ramponi e Blocken (2012) as principais vantagens do CFD são: calcular os dados para todo o domínio estudado em cada ponto, diferentemente de estudos como os de modelos experimentais e de modelos multizona; não possuir problemas de similaridade ao se reduzir a escala como em modelos experimentais, pois as simulações são feitas em escala real; e permitir total controle sobre as condições de contorno do modelo, sendo essas condições facilmente trocadas para se testar novas situações. Os modelos de CFD são capazes de mostrar detalhadamente como o fluido, se comporta de acordo com as condições de contorno descritas na modelagem. Entretanto esse alto grau de detalhamento exige um custo computacional muito elevado, inviabilizando

⁵ Tradução do autor. Original em inglês: "[...] CFD is considered the most complex and time consuming but also the most flexible technique. [...]the process is time-consuming and only a few typical wind situations, out of all possible cases, can practically be considered. This is why CFD is more commonly used to test the thermal behavior of a building under extreme conditions, say a hot summer afternoon. This practice is considered suboptimal because a designer needs to understand how a building performs all year round and how often occupants might be dissatisfied with interior conditions." (WANG *et al.*, 2012)

estudos anuais, sendo mais comumente aplicado a estudos em regime estacionário, como cenários típicos ou extremos.

2.3. Parâmetros de simulação

Nesta subseção serão tratados os parâmetros necessários para a modelagem, na entrada de dados nos modelos, na condução das simulações e na análise dos resultados. Os parâmetros aqui discutidos são aqueles que foram investigados para as simulações que serão conduzidas com os modelos multizona – através do modelo *Airflow Network* do EnergyPlus™ 8.7 – e com o modelo de fluidodinâmica computacional, CFD – através do programa ANSYS CFX® 17.1 – conforme será melhor detalhado no capítulo de metodologia.

2.3.1. Arquivos Climáticos

Os arquivos climáticos são as fontes usadas pelos programas de simulação computacional termo energéticas, como o EnergyPlus™, para a definição das condições climáticas de contorno e assim ser possível a solução das equações. Geralmente nos arquivos climáticos são compilados valores horários de um ano, 8760 horas, de diversas variáveis climáticas como: temperaturas mínima, média e máxima de bulbo seco; temperaturas mínima, média e máxima de ponto de orvalho; direção e velocidade do vento; radiação total global diária e radiação solar direta (BARNABY e CRAWLEY, 2011).

Grande esforço foi empreendido nas últimas décadas para a geração de um ano representativo da condição climática local, que é uma alternativa para estimativa de desempenho de longo prazo, visando a redução dos custos computacionais que seriam significativos para estudos com dados climáticos plurianuais (BARNABY e CRAWLEY, 2011; CHAN, 2016). Duas principais metodologias de geração de arquivos climáticos foram encontradas na literatura: o *Test Reference Year* (TRY) e o *Typical Meteorological Year* (TMY). O TRY é um ano real dentro de uma série histórica, geralmente 30 anos, em que os anos que possuem temperaturas médias de bulbo seco muito altas ou muito baixas são progressivamente eliminados até que reste apenas um ano, que por definição será ameno e que não representa as condições extremas. Já o TMY é um ano montado a partir de meses típicos de anos distintos, também de uma série histórica, selecionados através de índices de peso dados a cada uma das nove variáveis climáticas listadas acima (HUANG e CRAWLEY, 1997; BARNABY e CRAWLEY, 2011; CHAN, 2016).

Na revisão da literatura feita sobre os dois modelos foi possível perceber que um arquivo climático do tipo TRY, por ser selecionado apenas com base nas temperaturas médias,

pode fazer com que as outras variáveis apresentem valores que são menos confiáveis para representar as condições médias do local e, portanto, não são recomendados para avaliações de desempenho termo energético de edificações (CHAN, 2016). Os arquivos do tipo TMY são largamente utilizados e apresentam precisão razoáveis para o uso prático em simulações de desempenho de edificações em longo prazo (HUANG e CRAWLEY, 1997; BARNABY e CRAWLEY, 2011; CHAN, 2016)

No Brasil há 27 arquivos climáticos do tipo TRY disponíveis baseados em séries de 30 anos. Com dados do INMET de 2000 a 2010, o Prof. Maurício Roriz desenvolveu arquivos climáticos, também do tipo TRY, para 411 localidades no país (LABEEE). Arquivos do tipo TMY estão disponíveis para 20 localidades na base SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), um projeto das Nações Unidas para a disponibilização de informações sobre recursos solares e de vento em alguns países em desenvolvimento.

2.3.2. Entorno edificado

O escoamento do vento no tecido urbano, e conseqüentemente as pressões exercidas pelo mesmo nas fachadas das construções, são dependentes da forma do desenho urbano, da geometria das edificações, dos parâmetros urbanísticos como os afastamentos, da altura das edificações e conseqüentemente da densidade construtiva da área.

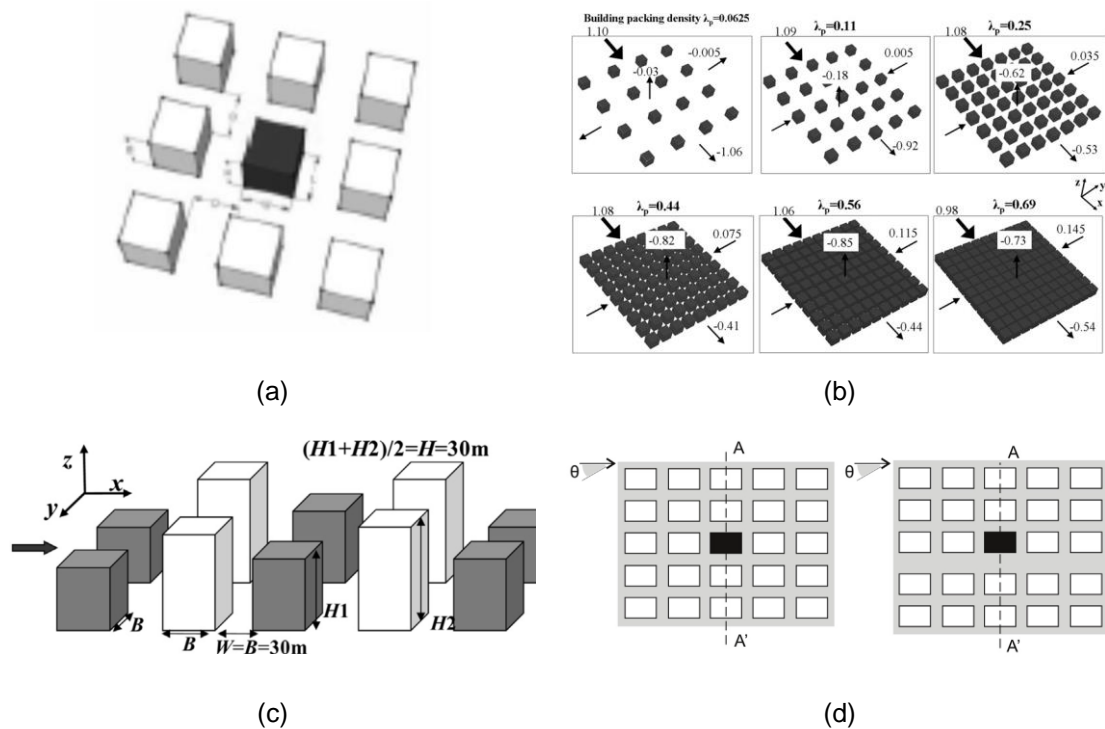
O escoamento do vento na área urbana é fortemente relacionado à morfologia urbana como uma combinação da densidade urbana, o arranjo mútuo dos edifícios e suas formas individuais e dimensões. (RAMPONI *et al.*, 2015. p.152)⁶

Nos trabalhos encontrados na literatura pesquisada em que os edifícios de entorno à área de interesse são representados, encontram-se dois tipos de abordagem. A primeira é a representação de modelos teóricos onde geralmente é variada a altura e os afastamentos entre os blocos de entorno, todos com mesma área e com mesma altura, distribuídos de forma uniforme ou intercalados e equidistantes, em uma abstração de área urbana, porém com pouca relação aparente com a realidade (WANG *et al.*, 2012; BUCCOLIERI *et al.*, 2010). Contudo alguns dos estudos encontrados já apresentam variações que tentam aproximar os modelos simulados às situações encontradas em tecidos urbanos reais (LIN *et al.*, 2014; RAMPONI *et al.*, 2015).

⁶ Tradução do autor. Original em Inglês: "Urban wind flow is strongly related to urban morphology as a combination of urban density, the mutual arrangement of buildings and their individual shape and dimensions" (RAMPONI *et al.*, 2015. p.152)

Wang *et al.* (2012) apresentam um estudo do impacto do entorno nos coeficientes de pressão sobre as fachadas variando as alturas e os afastamentos em blocos dispostos regularmente (FIG. 1a). Já Buccolieri *et al.* (2010) e Lin *et al.* (2014) estudaram os parâmetros quantitativos de qualidade do ar e dispersão de poluentes abaixo da camada dossel urbana (*urban canopy layer* - UCL), variando os indicadores de densidade de construção (*building pack density* – λ_p) e área de densidade frontal (*frontal area density* – λ_f) conforme mostrado na FIG. 1b e na FIG. 1c. Lin *et al.* (2014) variaram a altura das edificações intercalando as alturas com o intuito de representar a diversidade de alturas existente nas malhas urbanas. Ramponi *et al.* (2015) também conduziram um estudo com objetivo de avaliar a qualidade do ar abaixo da camada dossel urbana, para verificar o impacto da largura das vias na dispersão do ar viciado e de poluentes. Eles fizeram um levantamento de larguras de vias mais comuns em algumas cidades da Europa e construíram os modelos a serem analisados variando as alturas, os afastamentos entre os prédios e considerando três larguras de vias diferentes (FIG. 1d).

FIGURA 1: Exemplos de representações de entornos teóricos na literatura

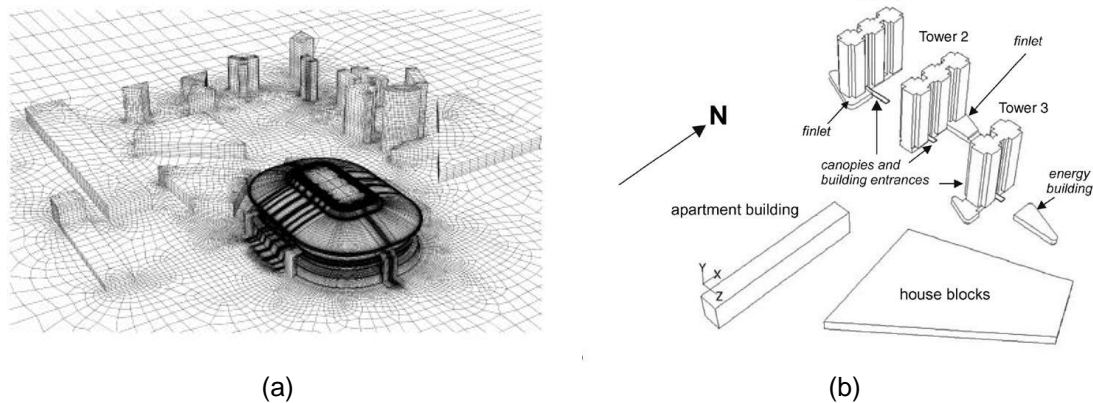


Fonte: (a) Wang *et al.* (2012); (b) Buccolieri *et al.* (2010); (c) Lin, *et al.* (2014); (d) Ramponi *et al.* (2015).

A segunda abordagem de representação do entorno edificado é a representação da situação real ao redor da região de interesse (FIG. 2). Estes estudos são mais comumente feitos com o intuito de estudar o impacto da região de interesse no entorno, e vice-versa, em situações mais aplicadas (BLOCKEN *et al.*, 2004; van HOOFF e BLOCKEN, 2010) ou em trabalhos que buscam a generalização dessas relações entre

entorno e área de interesse através de estudos de caso (BRANDÃO, 2009; LEITE, 2015).

FIGURA 2: Exemplos de representações de entornos reais na literatura



(a) van Hooff e Blocken (2010); Blocken *et al.* (2004)

Em ambas as abordagens, é necessário definir a extensão do entorno que será representado no modelo, de forma a garantir que a interferência do entorno no escoamento seja bem representada. Franke *et al.* (2007) escrevem que, baseado na experiência de simulações em túneis de vento, a distância do obstáculo em relação à região de interesse deve ser entre 6H e 10H, sendo H neste caso igual à altura do obstáculo.

2.3.3. Coeficientes de pressão

O coeficiente de pressão (C_p) é o número adimensional resultado da razão entre a pressão dinâmica medida em um ponto da superfície do modelo (P_x) e a pressão dinâmica em um ponto do fluxo de ar não perturbado (P_d), descrita pelas seguintes equações:

$$C_p = \frac{P_x}{P_d} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo P_d :

$$P_d = \frac{\rho \cdot V^2}{2} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: ρ é a densidade do fluido, no caso o ar, e V é a velocidade de escoamento em um ponto do fluxo de ar não perturbado.

Substituindo P_d na equação 1:

$$P_x = 0,5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot V^2 \quad (\text{Equação 3})$$

Os C_p padrão utilizados pelos programas são resultantes de bancos de dados, sendo os mais comuns o *Air Infiltration and Ventilation Center* e o ASHRAE Handbook (WANG *et al.* 2012). Esses bancos de dados são alimentados por compilações de C_p 's medidos em campo ou em túnel de vento – classificados através de regressões de acordo com parâmetros como a altura do edifício, relação entre altura, largura e comprimento da geometria do edifício, condições de entorno, como estar inserido em área rural ou em ambiente urbano adensado, por exemplo.

Nos modelos *Airflow Network* (AFN) os dados de C_p considerados no input são de fundamental importância para a precisão dos resultados (RAMPONI *et al.* 2011). No estudo conduzido por Ramponi *et al.* (2011) foram comparados os resultados de C_p 's obtidos e de escoamento de ar internos calculados pelo AFN em um ambiente com grandes aberturas, com base em diferentes fontes de C_p . Os C_p 's utilizados foram obtidos através do cálculo interno do EnergyPlus™ (através do modelo de Swami e Chandra, 1988); do banco de dados da AIVC, do banco de dados da Tokyo Polytechnic University (TPU); medições em túnel de vento e de simulações de CFD. Os resultados encontrados mostraram que os valores de C_p podem apresentar até 30% de diferença entre as diferentes fontes, e que essas diferenças geraram taxas de ventilação com variações de até 15%.

Esses resultados também foram encontrados no estudo conduzido por Cóstola, Blocken e Hensen (2009), onde foram comparados os valores de C_p obtidos por fontes primárias (túnel de vento, CFD e medições in loco) e fontes secundárias (bancos de dados e modelos analíticos).

2.3.4. Domínio

O domínio é a representação geométrica do fluido que será simulado pelos programas de CFD. Inicialmente representado pelas seções de testes dos túneis de vento, o domínio nos programas de CFD podem ser dimensionados e manipulados de acordo com a necessidade de cada experimento. As recomendações existentes na literatura quanto ao dimensionamento dele têm como principal objetivo a garantia de que o escoamento a ser simulado não será perturbado por um domínio mal dimensionado, como por exemplo, a aceleração do fluxo devido à uma obstrução muito grande do modelo em relação à seção deste.

Os principais guias de orientações para simulações em CFD (FRANKE *et al.*, 2007; TOMINAGA *et al.*, 2008; TAMURA, NOZAWA E KONDO, 2008) trazem as mesmas recomendações quanto ao dimensionamento dos domínios: a altura do domínio deve ser igual a $6H$, sendo H igual à altura do maior elemento do modelo; a distância entre o

modelo e a entrada de ar deve ser igual a 5H; a distância entre o modelo e as laterais também deve ser igual a 5H; e finalmente a distância entre o modelo e a face de saída do ar deve ser igual a 15H. Essa maior dimensão na saída do ar é para que o escoamento se reestabeleça depois da região de esteira que acontece atrás do obstáculo.

Outra recomendação importante é a obstrução máxima que a frente do modelo causa no perfil do domínio. Essa obstrução é chamada de blocagem (*blockage ratio*). O valor máximo recomendado dessa obstrução é de 3%. Segundo Franke (2006) se a extensão do modelo na largura for muito maior que a altura, a seção do domínio deve obedecer a mesma razão entre altura e largura do modelo, entretanto mantendo a altura afixada em 6H.

2.3.5. Geração e qualidade de malha

Em programas de CFD a malha é a representação, em 2D ou 3D, da discretização do volume a ser simulado. Ela é composta de nós e de elementos que podem ser: tetraedros; hexaedros; prismas; pirâmides e faces. A correta determinação da malha é de fundamental importância para o sucesso da simulação e para a confiabilidade dos dados obtidos na mesma.

Os guias de simulações em CFD já referidos anteriormente (FRANKE *et al.*, 2007; TOMINAGA *et al.*, 2008; TAMURA, NOZAWA E KONDO, 2008) trazem como recomendações: a malha gerada deve ser hexaédrica e estruturada, em detrimento à malha tetraédrica desestruturada que é *default* dos programas; o fator de expansão das células contíguas deve ser inferior a 1,3; áreas próximas às arestas vivas devem receber uma malha mais refinada; e no caso do uso de malhas tetraédricas desestruturadas é importante o uso da base de células prismáticas em todas fronteiras sólidas, chamada de "*inflated boundary*", cuja primeira camada deve ter altura superior ao da rugosidade especificada.

Uma vez gerada a malha, alguns valores fornecidos pelo próprio programa de CFD permitem ao usuário avaliar a sua qualidade. É o caso dos valores de qualidade ortogonal (*orthogonal quality*) e assimetria (*skewness*) que devem ter valores maiores que 0,1 e não superiores a 0,95, respectivamente (LEITE, 2015). Outro valor de referência para a qualidade da malha é o valor de *yplus*, um valor adimensional produto da simulação, e que descreve o desprendimento da camada limite nas fronteiras sólidas do modelo. Segundo o levantamento da literatura feito por Leite (2015), os valores de *yplus* admissíveis variam de 30 a 100 para simulações conduzidas com o modelo de turbulência *Standard k-ε* segundo a documentação do programa CFX®. Entretanto

outros autores apresentados por Leite (2015) consideram valores de *yp_{lus}* de 30 a 1.000 aceitáveis.

Para a determinação da malha a ser usada nas simulações, além dos parâmetros de qualidade citados acima, na literatura recomenda-se também a adoção de um teste de refinamento de malha, onde três malhas com graus progressivos de refinamento são simuladas e seus resultados são comparados. O método descrito por Celik (2008) que está presente na Norma ASME V&V 20:2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, traz a equação do tamanho representativo da malha (*h*) a seguir:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: *N* é o número de elementos e *V* é o volume do domínio.

Com o valor de *h* calculado utiliza-se a equação do fator de refinamento *R*, que deve ser maior ou igual a 1,3, valor definido pela experiência e não por uma derivação formal (CELIK, 2008).

$$R = h_{coarse} / h_{fine} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde *h_{coarse}* é o *h* da malha mais grosseira e *h_{fine}* é o *h* da malha mais refinada. Calculado o *h* da malha original, calcula-se o *h* da malha a ser gerada, multiplicando por 1,3 para obter uma malha menos refinada, ou dividindo-se por 1,3 para obter uma malha mais refinada. Com o valor de *h* da nova malha é possível calcular o número de elementos a ser usado.

Ao comparar os resultados alcançados com as diferentes malhas, é importante ressaltar que cabe ao usuário do programa a definição do parâmetro que vai determinar a validade dos resultados obtidos, seja baseado na experiência própria ou em outros estudos encontrados em literatura. Um exemplo aplicável a esse estudo é a definição que os valores de *C_p* não podem apresentar divergências maiores que 10%, parâmetro esse comumente encontrado na literatura.

2.3.6. Modelos de turbulência

Diferentemente do escoamento laminar onde a velocidade, direção e sentido das partículas se mantêm constante, abaixo da camada limite atmosférica o escoamento do ar se apresenta turbulento com essas grandezas variando em *x*, *y* e *z* ao longo do tempo. Segundo Srebric (2011) a natureza da turbulência é muito complexa e ainda não completamente compreendida, uma vez que o escoamento turbulento se dá de forma tridimensional, aleatório e cujos vórtices aumentam a mistura no campo de escoamento,

alterando as características de transporte de momentum e de energia do fluido. Essas características tornam a modelagem matemática para a predição da turbulência muito complexa, sendo essa baseada na análise estatística do padrão de escoamento (PASSE e BATTAGLIA, 2015).

Uma das formas de se caracterizar o escoamento, se laminar ou turbulento, é a utilização do chamado número de Reynolds, um indicador da razão de forças de inércia para forças viscosas. O escoamento laminar ocorre em baixos números de Reynolds, onde as forças viscosas são predominantes e sendo caracterizado por um movimento suave e constante. O escoamento turbulento apresenta altos números de Reynolds e predominam as forças de inércia apresentando vórtices, redemoinhos e outras instabilidades no fluxo (PASSE E BATTAGLIA, 2015).

As soluções numéricas das equações de conservação podem ser feitas de acordo com três métodos na fluidodinâmica computacional: *Direct Numerical Simulation* (DNS); *Large-eddy Simulation* (LES); e as equações de *Reynolds Average Navier-Stokes* (RANS) com os modelos de turbulência. O método DNS resolve as equações de Navier-Stokes sem aproximações, entretanto exige um refinamento de malha muito grande, o que o faz ainda ser muito distante da prática usual de projeto de engenharia de vento. O LES foi desenvolvido nos anos 1970 para aplicações na meteorologia. Esse método separa o movimento turbulento em pequenos e grandes turbilhões e resolve separadamente as equações que governam o movimento tridimensional e dependente do tempo. O LES possui uma aplicabilidade mais prática que o DNS, mas ainda assim se mostra muito custoso em esforço computacional. O RANS possui menor custo computacional, mas é potencialmente menos preciso. Ele resolve as equações de Navier-Stokes usando modelos de turbulência. Este método também é o mais difundido, pois ele permite resultados com precisão razoável sem grande custo computacional (SREBRIC, 2011) e é utilizado na maioria das simulações em CFD de escoamento de vento em áreas urbanas, mostrando bom desempenho tanto na simulação de modelos genéricos quanto em configurações urbanas mais complexas (RAMPONI *et al.*, 2015).

Os principais modelos de turbulência encontrados na literatura são: *Standard k- ϵ model* (Sk- ϵ); *Realizable k- ϵ model* (Rk- ϵ); *Renormalization Group k- ϵ model* (RNG k- ϵ); *Standard k- ω model* (Sk- ω); *Shear-stress-transport k- ω model* (SST k- ω); *Reynolds Stress Model* (RSM). Segundo Martins e Da Graça (2016), os modelos mais populares em análises de ventilação natural são o Sk- ϵ e o RNG k- ϵ . Em uma análise de sensibilidade dos parâmetros de simulação de ventilação cruzada interna em uma edificação isolada, Ramponi e Blocken (2012) mostram que o modelo SST k- ω apresentou a melhor performance, seguido do modelo RNG k- ϵ , em comparação com

experimentos feitos em túnel de vento. Segundo Tominaga *et al.* “ [...] *Standard k-ε model* não deve ser usado em simulações de problemas de engenharia de vento [...]” (2008, p. 1759) pois não consegue representar a separação e o escoamento reverso na cobertura do edifício devido à superestimação da energia de turbulência (k) na área de colisão com a parede. A mesma recomendação é apresentada por Tamura *et al.* (2008), onde é citado que o modelo *Standard K-ε* superestima os coeficientes de pressão na superfície frontal devido aos altos valores de energia de turbulência na região de colisão com o limite entre a parede e o teto do obstáculo, o que leva ao não destacamento do escoamento do teto do obstáculo.

Apesar dessas recomendações é possível encontrar diversos trabalhos que utilizam o modelo Sk- ϵ em suas simulações e apresentam resultados comparativos com ensaios em túnel de vento e/ou simulações com outros modelos de turbulência (MONTAZERI e BLOCKEN, 2013; LIN *et al.*, 2014; LEITE, 2015; MARTINS e DA GRAÇA, 2016). Montazeri e Blocken (2013) conduziram simulações em CFD com o intuito de prever a distribuição das pressões de vento nas fachadas de um edifício com e sem varanda. Em uma das seções do artigo eles compararam os resultados de um ensaio em túnel de vento com os resultados de simulação em CFD com cinco diferentes modelos de turbulência: Sk- ϵ ; Rk- ϵ ; RNG k- ϵ ; Sk- ω e RSM. Eles concluíram que as principais diferenças aconteceram próximas ao nível do piso do domínio, onde o RNG k- ϵ tende a superestimar as variações de pressão e o Sk- ω tende a superestimar o valor das pressões. Os demais modelos, entre os quais o Sk- ϵ , apresentaram resultados muito próximos aos do Rk- ϵ , o modelo de referência, que comparado aos resultados do experimento em túnel de vento demonstrou uma boa concordância.

Outro estudo encontrado na literatura analisa a ventilação urbana dentro da UCL variando os arranjos das construções, mas mantendo a densidade de área edificada (LIN *et al.*, 2014). Eles compararam a predição do perfil de velocidades de vento dos modelos de turbulência Sk- ϵ ; Rk- ϵ ; RNG k- ϵ ; e RSM com resultados de experimentos de túnel de vento. Segundo as conclusões apresentadas, os modelos Sk- ϵ e o RSM se saíram melhor na predição dos perfis de velocidade do vento que os outros modelos. Além disso, o Sk- ϵ simulou melhor a velocidade vertical abaixo da linha das coberturas do que o RSM.

2.3.7. Condições de contorno

As condições de contorno, ou *boundary conditions*, são a caracterização das faces do domínio de forma a fornecer aos modelos as variáveis necessárias para a resolução das equações de Navier-Stokes e dos modelos de turbulência. Segundo Passe e Battaglia

(2015, p. 47) “se o escoamento é dependente do tempo, existe uma ‘condição inicial’ que necessita ser determinada a partir da qual o escoamento será calculado”. Essa condição às quais as autoras se referem são as condições de contorno.

A condição de contorno de entrada do escoamento (*inflow*) para simulações RANS de edifícios e entornos urbanos é, por definição, aquela em que se configura a direção do vento a ser analisada. Os principais dados de entrada para o *inflow* são o perfil de vento e as informações de quantidade de turbulência (FRANKE *et al.*, 2007). As condições de contorno sobre as paredes dos obstáculos e sobre o piso do domínio, onde usualmente é introduzido o valor de rugosidade do entorno, são chamadas de *no-slip*. Essa configuração define que as partículas de um fluido viscoso mais próximas da superfície de um sólido estão em repouso e, portanto, com velocidade relativa igual a zero, e a velocidade das partículas em um perfil normal à superfície aumenta de acordo com a viscosidade do fluido e a rugosidade da superfície (PASSE E BATTAGLIA, 2015).

As condições de contorno das laterais e do topo do domínio podem ser definidas como *open boundary* ou *simmetry boundary*. Na primeira, a superfície é considerada aberta, permitindo que haja movimentação do fluxo para fora ou para dentro do domínio. Na segunda, a superfície é considerada como um eixo de simetria, onde as características do escoamento fora do domínio se dão de forma igual às características na parte interna.

Para a definição da saída do escoamento pode-se usar o *open boundary* ou o *outside boundary*. Esta última define que naquela superfície apenas haverá a saída do fluxo, não sendo possível a reentrada de partículas no domínio, por exemplo (FRANKE *et al.*, 2007).

Devido a essas características das definições de contorno, as distâncias entre os modelos e os limites do domínio apresentadas no item 2.3.4 são muito importantes para o sucesso da resolução das equações pelos programas de CFD, uma vez que ao se definir uma superfície como simétrica na lateral e no topo, por exemplo, o escoamento na superfície é forçadamente considerado paralelo à ela e caso ela não esteja longe o suficiente da região de interesse, pode provocar uma aceleração artificial do escoamento.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será discutida a metodologia adotada para atingir os objetivos que se pretende alcançar com esse trabalho, descritos anteriormente nos itens 1.2.1 e 1.2.2.

Para analisar o potencial de atendimento aos parâmetros normativos brasileiros em ventilação natural; se esses parâmetros são capazes de prover conforto térmico aos usuários; e definir diretrizes de projeto de ventilação natural com base em valores de troca de ar por hora com objetivo de atingir o conforto térmico dos usuários, foram adotados os passos metodológicos mostrados na FIG. 3.

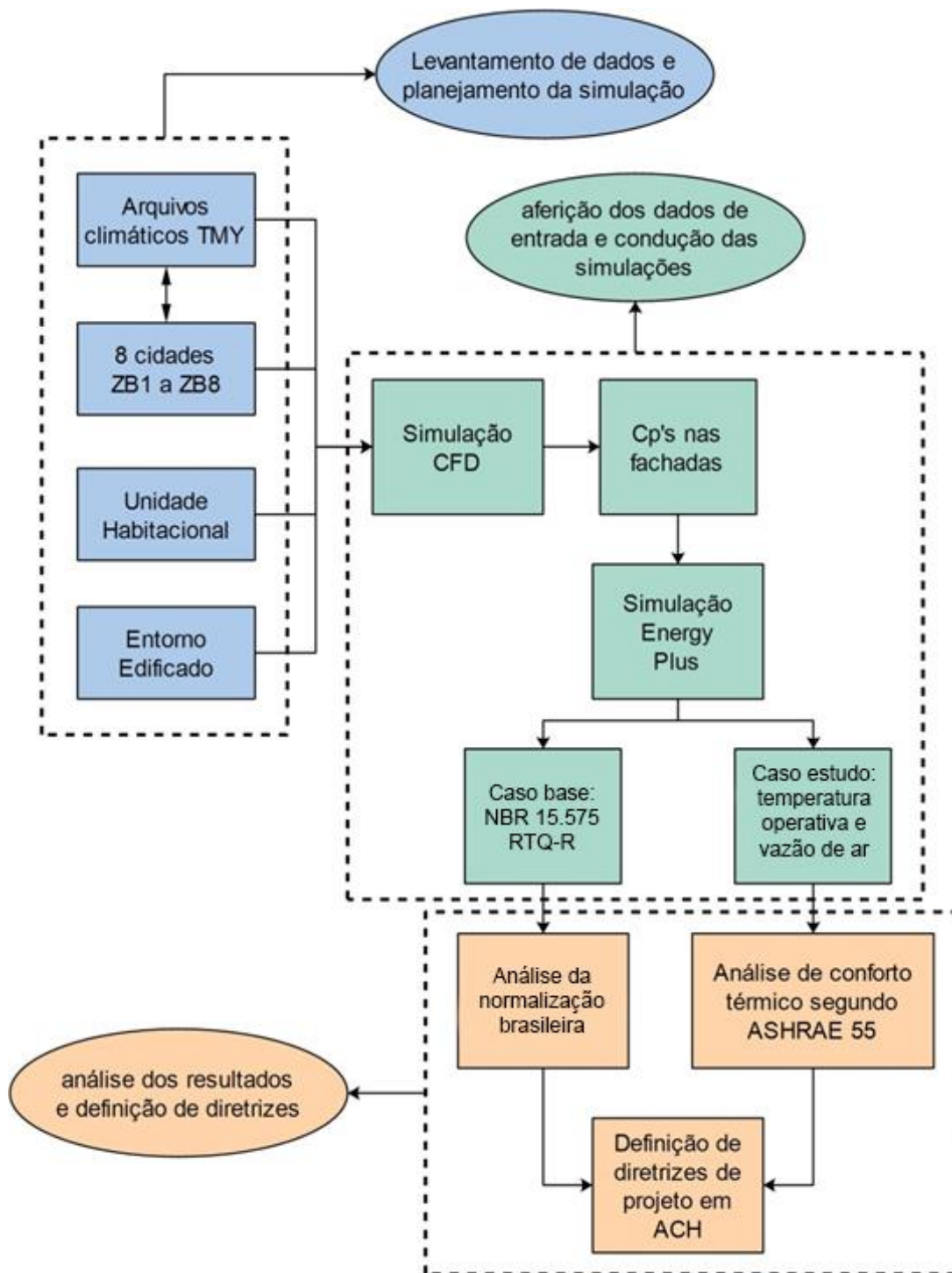
O primeiro passo foi levantar os arquivos climáticos do tipo TMY de cidades brasileiras disponíveis. As cidades analisadas neste trabalho foram definidas de acordo com a disponibilidade do TMY, com a zona bioclimática e com a presença ou não na tese de doutorado de Ferreira (2016) que servirá de base para a descrição das características das envoltórias conforme será discutido no item 3.2. Para a definição dos modelos a serem utilizados nas simulações, a unidade habitacional e o modelo de edificação foram retirados do Relatório Técnico da Base de Simulações para o RTQ-R (SORGATO, 2011). O entorno edificado foi definido através de uma média da situação encontrada em um levantamento feito na legislação, no censo 2010, e através do *Google Earth* de diferentes densidades de ocupação, conforme será mostrado no item 3.3.

Serão simulados como caso base, o modelo do edifício definido de acordo com as respectivas metodologias da NBR 15.575 e do RTQ-R, para poder definir, de acordo com cada metodologia, a situação do edifício estudado em relação à sua classificação nas normas vigentes no país.

Para o caso de estudo busca-se a compreensão de qual seria o comportamento real deste edifício inserido em um contexto urbano. Para as direções de vento que apresentam maior significância serão conduzidas simulações em CFD para a obtenção dos coeficientes de pressão nas fachadas do edifício de interesse para inseri-los como dado de entrada no *EnergyPlus*TM.

Foram então conduzidas simulações anuais no *EnergyPlus*TM variando os conjuntos de dados dos coeficientes de pressão obtidos com o CFD, e três orientações solares em relação ao norte, 0°, 45° e 90°. De cada simulação foram analisados os dados de renovação de ar por hora e de temperatura operativa interna dos quatro apartamentos de três pavimentos: térreo, intermediário e de cobertura. Nos apartamentos foram considerados os dados dos três cômodos de permanência prolongada, sala e quartos.

FIGURA 3: Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a análise do conforto térmico foi adotado o modelo de conforto adaptativo da norma norte-americana ASHRAE 55:2013. No artigo apresentado por Perreira e Assis (2010) foi feito um estudo com o objetivo de identificar qual dos modelos de conforto térmico adaptativo existentes seria o mais indicado para ser usado como referência única

nacional para efeitos de análises iniciais de projeto e de dimensionamentos. Os modelos analisados foram os de Aluciems (1981), Humphreys (1978), Nicol e Humphreys (2002) e De Dear e Brager (2002), esse último adotado pela *AHSRAE Standard 55* no ano de 2004. Como resultado concluiu-se que o modelo de De Dear e Brager (2002) para o cálculo da temperatura neutra com intervalos de $T_n \pm 2,5^\circ\text{C}$ e $T_n \pm 3,5^\circ\text{C}$ para 90% e 80% de aceitabilidade, respectivamente, apresenta melhores resultados, demonstrando sua aplicabilidade para os climas brasileiros.

Com os resultados obtidos das simulações dos casos-base será possível analisar como a normalização brasileira classifica o edifício estudado. Com os resultados obtidos com a simulação do caso de estudo será demonstrado o comportamento desta edificação em um contexto urbano, no que diz respeito à vazão de ar e às temperaturas operativas internas. Sendo assim possível comparar os resultados de cada situação e avaliar os parâmetros existentes na NBR 15.575 e no RTQ-C. Se necessário, diretrizes de projeto visando o aproveitamento do potencial da ventilação natural para conforto térmico dos usuários, em valores de trocas de ar por hora, poderão ser estabelecidas.

O método aqui proposto será aplicado somente à cidade de Belo Horizonte, inserida na zona bioclimática 3, e ao modelo de entorno com alto adensamento, com a altura constante e com as alturas variáveis das edificações.

3.1. Definição do entorno edificado

A abordagem de representação do entorno edificado construída para esse trabalho é a de um modelo teórico, porém buscou-se analisar algumas cidades brasileiras para que este modelo seja o mais representativo possível da realidade encontrada no país.

A definição das cidades a serem estudadas se deu priorizando dois fatores: a existência de arquivos climáticos do tipo TMY; e a presença no estudo conduzido por Ferreira (2016). Os arquivos do tipo TMY (*Typical Meteorological Year*) encontrados para o Brasil são disponibilizados pela base SWERA. Dentre as 20 cidades cujos arquivos são disponibilizados, foram escolhidas uma cidade para cada zona bioclimática brasileira. Além da disponibilidade do TMY, o outro fator que influenciou a escolha das cidades foi elas estarem presente no estudo conduzido por Ferreira (2016), onde são discutidas diretrizes de características térmicas de envoltória para 26 cidades brasileiras, e que ajudou a definir a composição das envoltórias usadas neste estudo, como será mostrado no item 3.2. As cidades escolhidas são apresentadas da TAB. 2.

TABELA 2 - Cidades escolhidas para o estudo.

Cidade	Zona bioclimática	Arquivo TMY	Ferreira (2016)
Curitiba, PR	1	SIM	NÃO
Santa Maria, RS	2	SIM	SIM
Belo Horizonte, MG	3	SIM	SIM
Brasília, DF	4	SIM	SIM
Garanhuns, PE	5	NÃO	SIM
Campo Grande, MS	6	SIM	NÃO
Cuiabá, MT	7	SIM	SIM
Manaus, AM	8	SIM	SIM

Fonte: Elaborado pelo autor

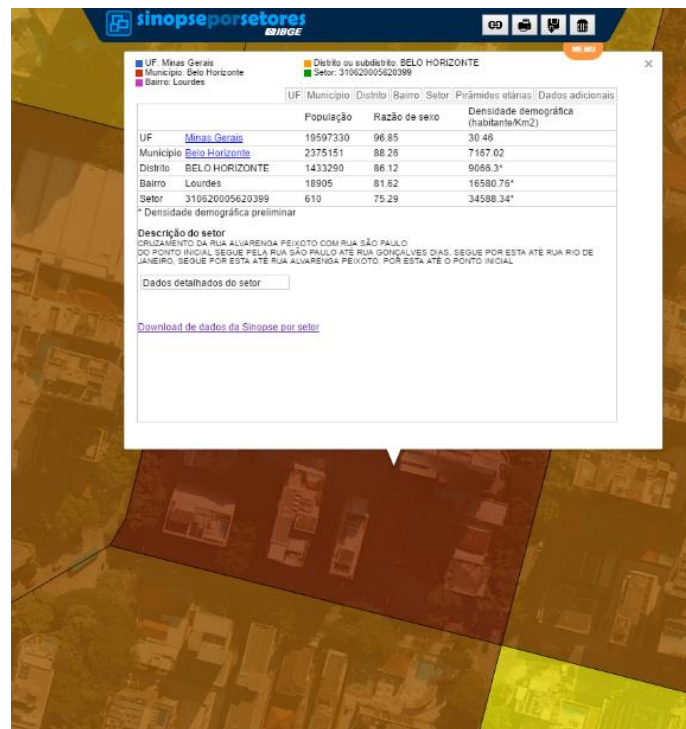
Foram levantadas as leis de uso e ocupação do solo de cada cidade, e identificados os zoneamentos que permitiam uso residencial com as características de baixa, média e alta densidade de ocupação através dos parâmetros urbanísticos, tais como os coeficientes de aproveitamento, afastamentos, altimetria, entre outros. Um zoneamento urbano de cada densidade em cada cidade foi selecionado.

Em cada zoneamento urbano foi localizado um setor censitário definido pelo IBGE e coletado o dado de densidade de ocupação (CENSO 2010). Usando o Google Earth Pro foi feito um levantamento das características de desenho urbano – largura de vias e dimensão das quadras – e do número de pavimentos de cada uma das edificações (FIGURA 4). Conforme encontrado na literatura (item 2.3.2) é sugerido que a representação do entorno edificado ao redor da área de interesse seja entre 6H e 10H, tendo H relação com a altura máxima das edificações do entorno. Neste trabalho foi utilizado a razão de 6H devido a limitação do tamanho final do domínio, visando diminuir os custos computacionais da simulação. Dado isso e com as médias dos dados levantados foram construídos os modelos de entorno com o edifício a ser estudado no centro.

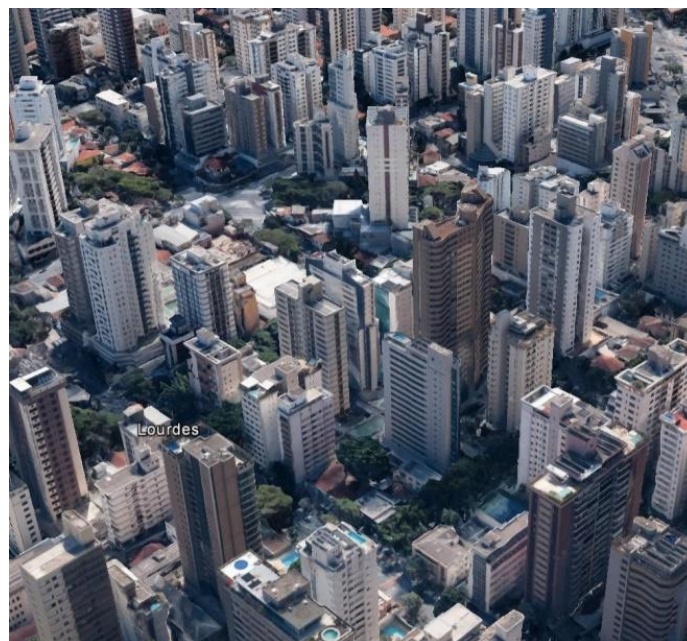
Ainda no item 2.3.2, verifica-se que a maioria dos estudos que trabalham com modelos teóricos de entorno consideram a altura das edificações constante. Porém, em áreas mais adensadas nas cidades brasileiras estudadas, essa realidade não existe, a altura das edificações se mostra bastante variada e sem nenhum padrão aparente (FIG. 4b). Portanto, foram definidas três situações de adensamento do entorno: um entorno de baixa densidade e com as alturas das edificações constantes; um entorno de alta densidade e com as alturas das edificações constantes; e finalmente, um entorno de alta densidade com a altura das edificações variando. Com isso, acredita-se ser possível

avaliar os extremos das densidades de ocupação, além de avaliar o impacto da alternância de alturas nos resultados.

FIGURA 4: Obtenção dos dados da área levantada em Belo Horizonte.



(a)



(b)

Fonte: (a) Site do Censo 2010; (b) Google Earth Pro

Para a definição das alturas nos modelos em que ela é constante foram feitas médias das alturas das edificações encontradas nas edificações levantadas. No caso da baixa

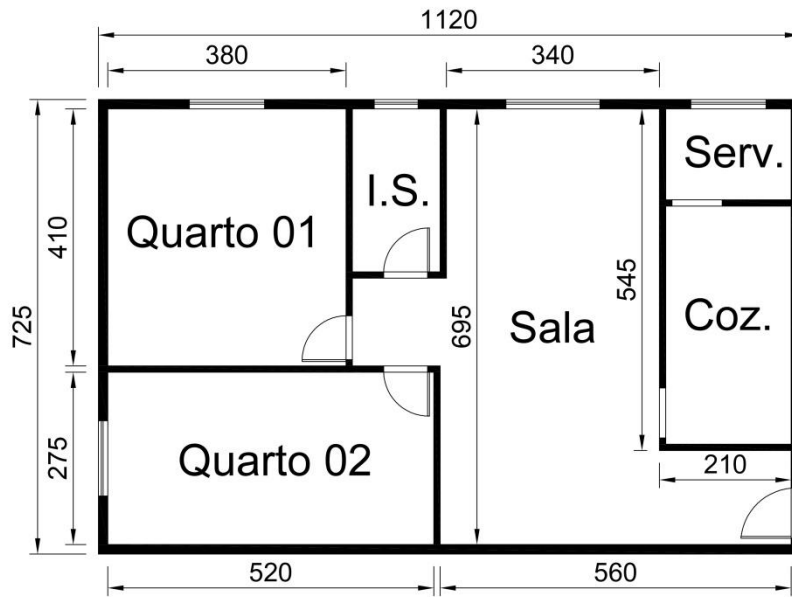
densidade essa altura foi fixada em dois pavimentos, uma vez que todos os zoneamentos permitiam essa altimetria e pretende-se analisar a situação mais densa dentre os adensamentos permitidos. Com base na média das dimensões das quadras e vias encontradas nas áreas levantadas foram definidas as quadras tipo e vias da baixa e da alta densidade. As quadras foram dispostas de forma ortogonal e a dimensão dos lotes foi determinada de acordo com a média dos afastamentos mínimos exigidos e dos coeficientes de aproveitamento.

Para a situação de entorno em que a altura dos prédios é variada, as dimensões de quadra e via usadas neste modelo foram as mesmas do modelo de alta densidade. Para determinar a altura dos prédios e sua distribuição nas quadras foi feita uma análise de frequência de ocorrência dentro da amostra levantada. Foram definidas faixas de altura dos edifícios e computadas o número de edificações em cada faixa. Assim foi possível determinar o número de prédios de cada altura em cada quadra no modelo a ser construído. Para cada altura de edificação adotada foi definida uma dimensão de lote devido às médias dos afastamentos e dos coeficientes de aproveitamento, assim como nos modelos descritos no parágrafo anterior. Cada um dos edifícios que seriam colocados na quadra foi nomeado por números aleatórios gerados através da função “aleatório” do Excel. A distribuição dos prédios em cada quadra também foi determinada através da geração de números aleatórios, fazendo com as quadras tivessem conformações diferentes entre si e que se mantivesse o caráter completamente randômico que existe nas cidades brasileiras.

3.2. Definição da Unidade Habitacional e das características da envoltória

A unidade habitacional a ser estudada foi retirada do Relatório Técnico da Base de Simulações para o RTQ-R (SORGATO, 2011). O modelo tem quatro apartamentos por andar, sendo cada um deles composto por dois quartos, sala de estar, banheiro social, cozinha e área de serviço, conforme FIG. 5. A escolha desta tipologia deveu-se ao fato de a mesma ter sido adotada na construção dos parâmetros de análise do RTQ-R e por ser representativa de uma condição média de unidade de habitação no país. De acordo com o Censo Demográfico brasileiro de 2010 (IBGE, 2011) o número de habitantes no país era de 190.755.799 pessoas morando em 57.324.167 domicílios equivalendo, portanto, a uma razão de 3,33 pessoas por domicílio. Segundo mostrado por Ferreira (2016), a tipologia de unidades habitacionais de dois quartos é a mais comum no Brasil, representando 42,66% das unidades construídas.

FIGURA 5: Planta da unidade habitacional estudada.



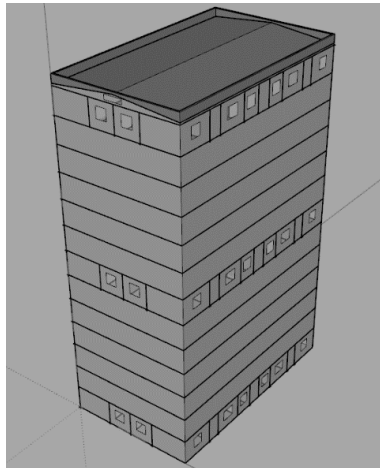
Obs: medidas em cm.

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Sorgato, 2011.

No estudo conduzido por Ferreira (2016), foram analisadas as características térmicas das envoltórias através de uma análise de sensibilidade em relação ao clima de cada uma das 26 cidades brasileiras que representam toda a diversidade climática brasileira conforme a classificação de Nimer. Como resultado dessa análise obteve-se recomendações para as paredes e coberturas de cada clima estudado. Como o objetivo do presente estudo é analisar apenas a ventilação natural e seu impacto no conforto do usuário, para cada zona bioclimática as características térmicas serão definidas de acordo com as conclusões apresentadas por Ferreira (2016), com o objetivo de isolar o efeito da envoltória fazendo com que a mesma tenha o melhor desempenho esperado em cada cidade.

O modelo do edifício foi confeccionado no SketchUp com o plugin do OpenStudio, uma interface para o EnergyPlus™. O edifício de interesse terá treze pavimentos (FIG. 6), porém apenas os pavimentos 01, 07 e 13 tiveram todas as suas zonas térmicas representadas. Os demais pavimentos foram representados como uma única grande zona térmica.

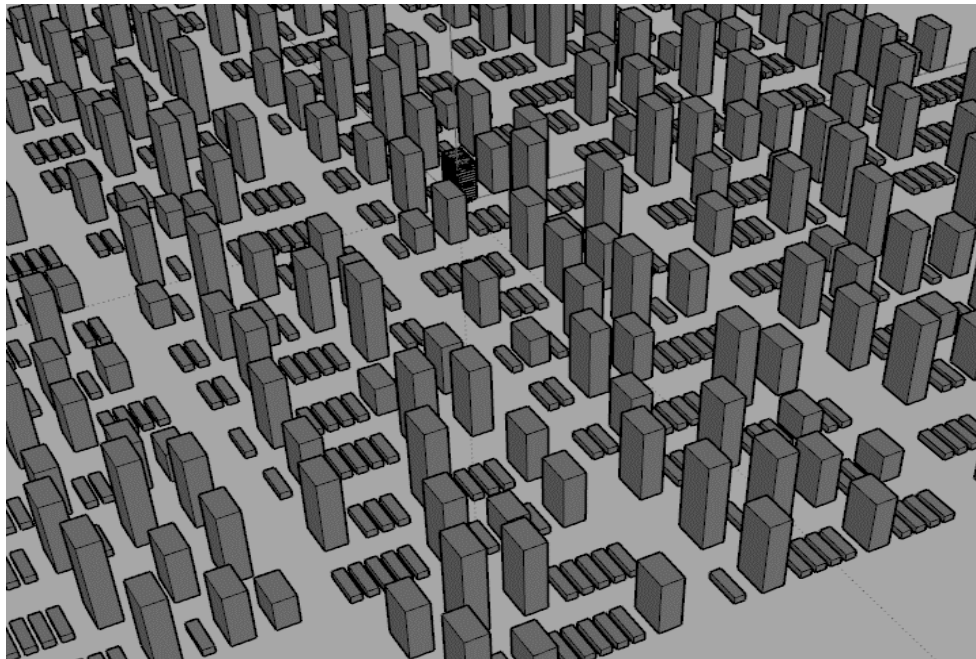
FIGURA 6: Modelo do edifício de interesse utilizado na simulação para os casos base.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a simulação do modelo de estudo foi representado também o entorno edificado, essa representação permite a obstrução da radiação solar incidente sobre o prédio estudado (FIG. 7).

FIGURA 7: Exemplo do modelo do entorno nas simulações no *EnergyPlus™*

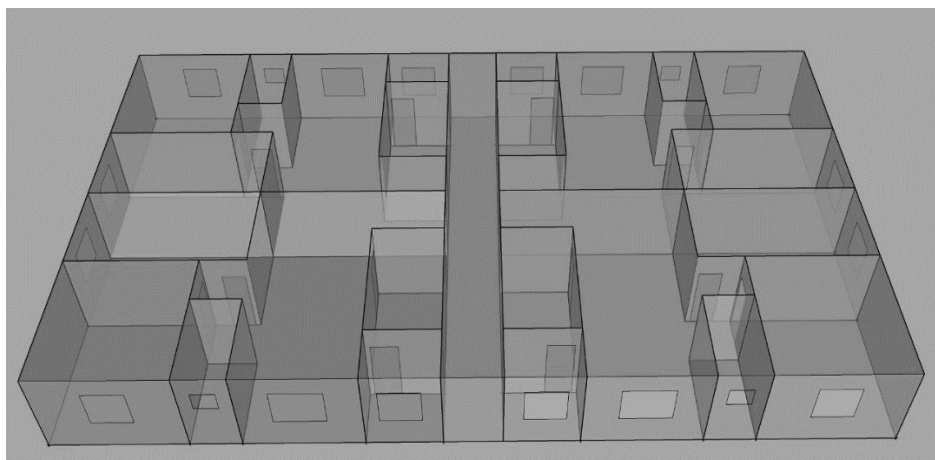


Fonte: Elaborado pelo autor

Todos os ambientes dos pavimentos representados foram modelados como zonas térmicas, incluindo aqueles que não serão considerados nas análises. Foram modeladas todas as aberturas externas e internas, exceto a janela e porta do banheiro,

e a porta de entrada no apartamento. As aberturas externas e internas serão consideradas como aberturas disponíveis para a ventilação dos cômodos (FIG. 8).

FIGURA 8: Modelo do pavimento tipo.



Fonte: Elaborado pelo autor

As características térmicas da envoltória foram definidas de acordo com as diretrizes para cada zona definida por Ferreira (2016). Para as simulações conduzidas para a cidade de Belo Horizonte as características termofísicas da envoltória das edificações foram configuradas de acordo com aquelas sugeridas por Ferreira (2016). As configurações seguem descritas na TAB. 3.

TABELA 3 – Características da envoltória simulada

Paredes pesadas	Transmitância térmica	1,85
	Capacidade térmica	331,45
	Absortância	0,3
Aberturas	Transmitância do vidro	3,2
	Ventilação	Com ventilação
	Proteção solar	Sem proteção solar
Cobertura isolante e pesada	Transmitância	0,85
	Capacidade térmica	37,0
	Absortância	0,3

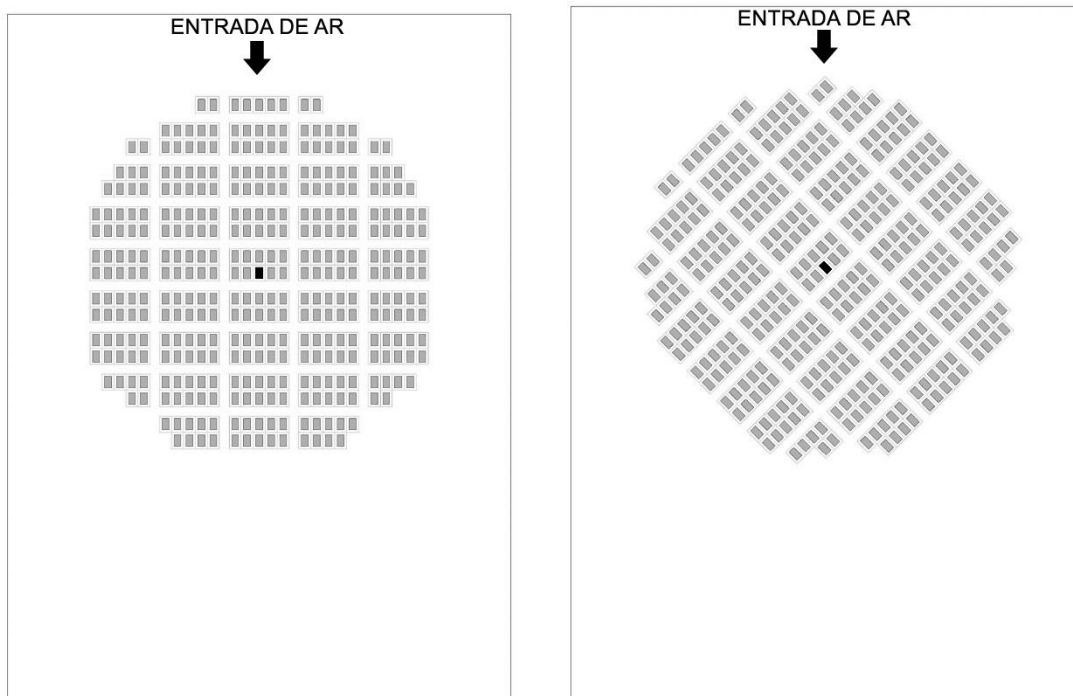
Fonte: Elaborado pelo autor

3.3. Configuração das simulações no CFX®

3.3.1. Definição do domínio a ser simulado

O domínio é o volume de fluido, neste caso o ar, que será simulado pelo programa de CFD. As principais recomendações para o dimensionamento do domínio encontradas na literatura dizem respeito às distâncias entre o modelo e os limites do domínio e a relação entre a área bloqueada pela frente do modelo – no sentido da entrada de ar – em relação à área do domínio, chamado de blocagem (*blockage ratio*). Em relação às distâncias entre o modelo e os limites do domínio as sugestões encontradas na literatura são: uma altura igual a 6H, sendo H igual à maior altura no modelo; uma distância de 5H entre o modelo e a face de entrada do fluxo e entre o modelo e as laterais do domínio; e finalmente a distância de 15H do modelo até a face de saída do fluxo. Quanto à blocagem é indicado que seja menor do que 3%.

FIGURA 9: Domínio definido para a alta densidade constante. Entrada de ar em 0° e 45°



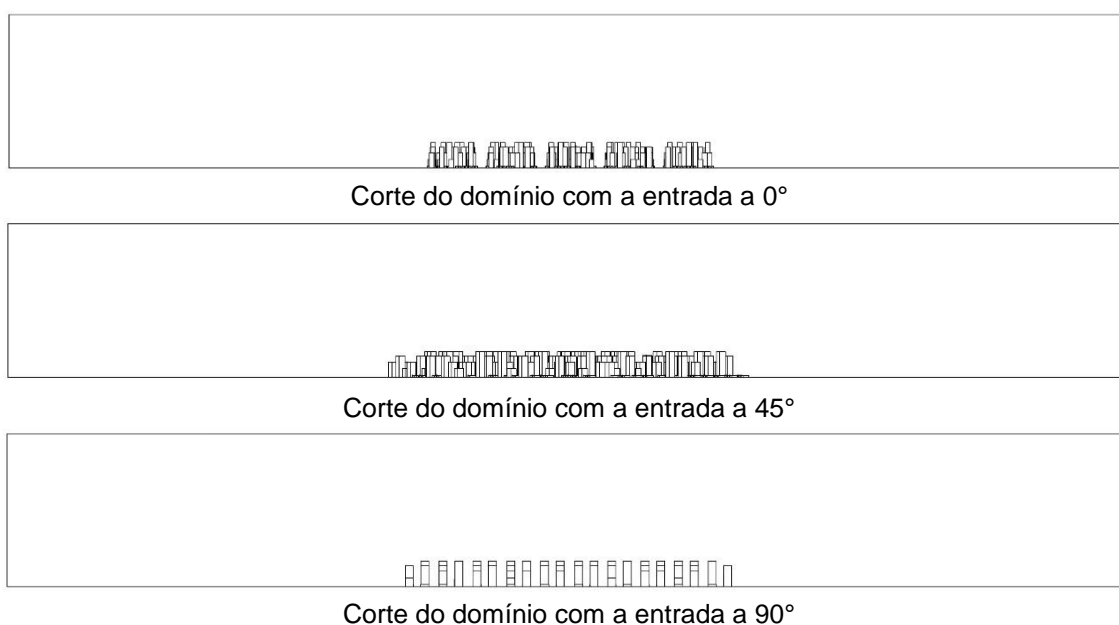
Fonte: Elaborado pelo autor

Para que o resultado fosse o menor domínio e, portanto, o menor custo computacional possível, foi escolhido um domínio de forma retangular. Com isso a distância entre o modelo e os limites do domínio em planta foi inicialmente afixada conforme presente na literatura, 5H em relação à entrada a às laterais, e 15H do modelo à face de saída do domínio. A altura H nos modelos da alta densidade com as alturas constantes foi considerada a altura do edifício de interesse na alta densidade, 37 metros. Para o modelo de alta densidade com alturas variadas, H foi considerado como a altura da

maior edificação existente no modelo que é de 77m. A altura do domínio foi considerada 6H como visto na literatura sendo, portanto, igual a 222 metros para os modelos da alta densidade com alturas constantes, e com 462 metros para o domínio da alta densidade com alturas variáveis.

Para o cálculo de bloqueio foram desenhados cortes dos domínios com a representação da frente do modelo “vista” pelo escoamento de ar (FIG. 10). Foram feitas representações de cortes nos domínios com entrada de vento a 0°, 45° e 90° para que o cálculo abrangesse os escoamentos que foram simulados. Foram então calculadas as áreas do domínio e a área obstruída pelo modelo. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 4.

FIGURA 10: Cortes do domínio do modelo de alta densidade com altura variável.



Fonte: Elaborado pelo autor

Como mostrado na tabela alguns dos domínios definidos a partir da relação de altura e distância do modelo ao limite do domínio igual a 5H e 15H, respectivamente, tiveram valores de bloqueio superior a 3%, valor máximo recomendado pela literatura levantada. As duas condições de entorno em que isso ocorreu foram as de alta densidade, com altura constante e com altura variável. Para a correção destes domínios foi usada a relação entre a altura e o comprimento do modelo como base para a definição dos novos domínios, como sugerido por Franke (2006), que defende essa relação para modelos de seção mais horizontal (TAB. 5).

TABELA 4 – Cálculo de blocagem nos domínios dimensionados conforme literatura.

Condição de entorno	Raio de representação	Ângulo de vista	Área do domínio (m ²)	Área bloqueada (m ²)	Blocagem
Baixa densidade	10H	0°	182.262,00	1.833,45	1,01%
		45°	182.262,00	2.915,65	1,60%
		90°	182.262,00	1.938,30	1,06%
Alta densidade altura constante	10H	0°	242.235,30	13.273,75	5,48%
		45°	242.235,30	30.101,78	12,43%
		90°	242.235,30	15.158,90	6,26%
Alta densidade altura variável	6H	0°	758.488,50	47.874,9	6,57%
		45°	758.488,50	74.048,81	9,76%
		90°	758.488,50	36.523,13	4,82%

Fonte: Elaborado pelo autor

TABELA 5 – Cálculo de blocagem nos domínios dimensionados a partir da relação entre a altura e a largura do modelo.

Condição de entorno	Raio de representação	Ângulo de vista	Área do domínio (m ²)	Área bloqueada (m ²)	Blocagem
Alta densidade altura constante	10H	0°	1.085.550,66	13.273,75	1,22%
		45°	1.085.550,66	29.048,72	2,77%
		90°	1.085.550,66	16.050,60	1,40%
Alta densidade altura variável	6H	0°	2.495.724,00	49.874,90	1,92%
		45°	2.495.724,00	74.048,81	2,95%
		90°	2.495.724,00	36.523,13	1,47%

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme se pode ver na tabela 5, o comprimento do domínio foi ajustado para ter a mesma proporção que o modelo. Dessa forma os novos domínios que foram definidos para as situações de alta densidade obedeceram ao valor de blocagem menor ou igual

a 3%. Os domínios da baixa densidade que não tinham apresentado blocagem maior que 3% foram mantidos com o dimensionamento inicial.

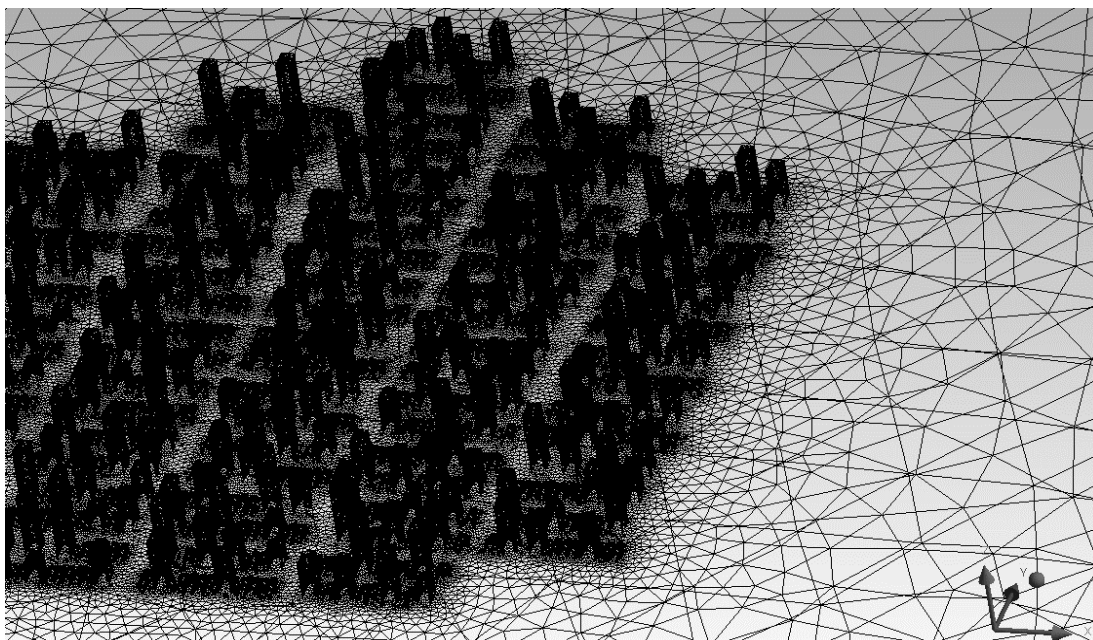
3.3.2. Definição da malha

Para a definição da malha foi utilizado o domínio da alta densidade com alturas variáveis e com o fluxo de ar incidente a 0°. A geometria que fora criada no AutoCAD® foi exportada para o CFX®, e a malha foi criada no *Meshing*, módulo do *Workbench* do CFX® para geração de malhas. Primeiramente, foram criadas as “*named selections*”, que reúnem em uma mesma seleção objetos, faces, arestas ou pontos do domínio que possuam a mesma configuração de contorno, ou que possuem os mesmos parâmetros de dimensionamento da malha, ou ainda locais de interesse para a obtenção dos resultados finais. Neste caso, foram definidas: as seleções do topo, entrada, saída, laterais e piso do domínio; as edificações de entorno; a edificação de interesse; e as janelas dos apartamentos para que posteriormente fosse possível retirar os dados de C_p apenas das regiões que de fato interessam ao trabalho.

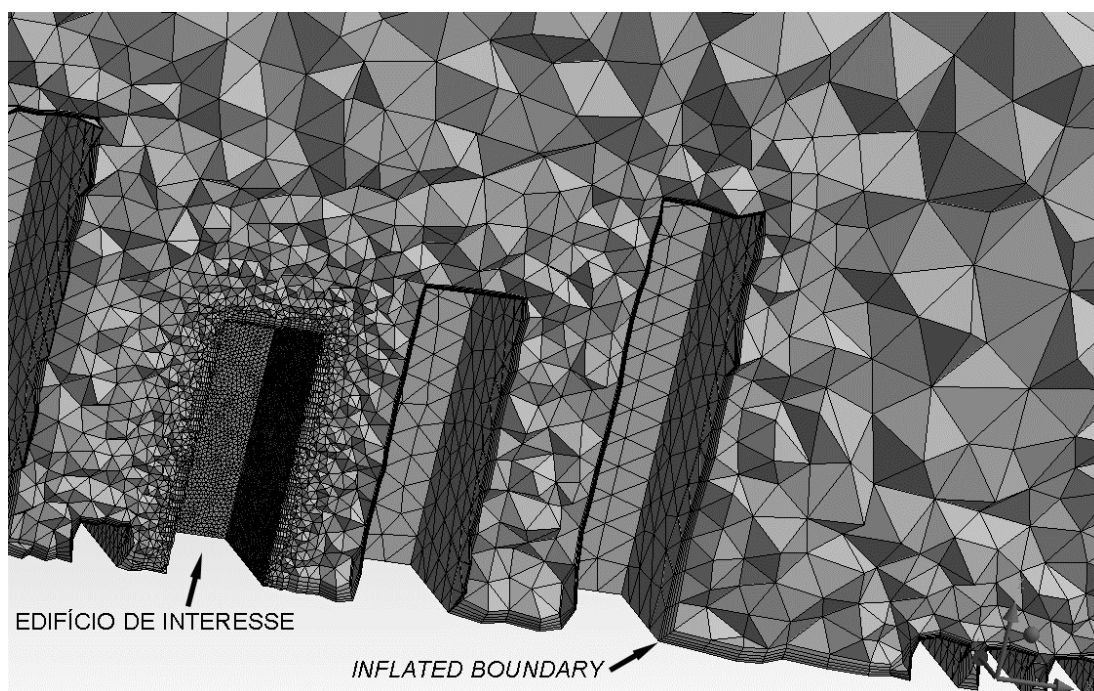
Depois de configurar as seleções, foram inseridos no programa os parâmetros de construção da malha conforme as recomendações encontradas na literatura levantadas no capítulo anterior. Foi configurada uma *face sizing* para as faces do edifício de interesse com o *element size* de 0,6m para garantir um número de elementos na área de abertura que fosse maior do que quatro e uma maior precisão nos resultados. E foram configuradas duas regiões com *inflated boundary*, a camada de elementos prismáticos discutidos no item 2.3.5, uma para o piso do domínio e uma para a superfície das edificações, com altura da primeira camada de 1,0m e de 0,3m respectivamente (FIGURA 11).

Uma vez gerada essa primeira malha, aqui chamada de original, foram criadas duas novas malhas, uma menos refinada e outra mais refinada para fazer o teste de independência de malha, conforme a metodologia de Celik (2008) e da ASME V&V 20 (2009) mostrados no item 2.3.5. O cálculo do número de elementos das malhas segue demonstrado na tabela 6.

FIGURA 11: Malha original gerada e detalhes do *face sizing* e *inflated boundary*



(a) Visão geral da malha.



(b) Perfil da malha gerada mostrando o *face sizing* aplicado no edifício de interesse, e o *inflated boundary* aplicado em todas as fronteiras sólidas do domínio.

Fonte: Elaborado pelo autor

TABELA 6 – Cálculo do número de elementos das malhas

	Malha menos refinada	Malha original	Malha mais refinada
N° de elementos	2.174.693,22	4.777.801,00	10.496.828,80
Volume	14.794.000.000 m ³		
H	18,94796	14,57536	11,21181
R	1,3	1,3	1,3

Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente, com o número de elementos e o volume da malha original foi possível calcular o tamanho representativo (H) dela. Aplicando um fator de refinamento (R) de 1,3 na equação 5 foram calculados os H das malhas mais e menos refinada. E conseqüentemente, com a aplicação da equação 4, foi possível calcular o número aproximado de elementos das duas novas malhas. Foi gerada também uma quarta malha ainda mais refinada que a terceira, com um numero de elementos superior a vinte e três milhões, entretanto a sua simulação foi interrompida pelo CFX® alegando falta de memória no computador que dispõe de 8gb de RAM.

As três malhas tiveram suas configurações de contorno feitas de acordo com os parâmetros já apresentados no item 2.3.7 deste trabalho. As laterais e topo do domínio foram consideradas como *free-slip*, o piso do domínio e as paredes das edificação foram consideradas como condição de não escorregamento (*non-slip*) com a rugosidade *smooth*, a entrada de ar foi configurada como *inlet*, e a saída do ar foi configurada como *outlet*. Nas simulações conduzidas para o teste de independência de malha foi utilizado o modelo de turbulência K-ε. As três simulações das malhas convergiram e atenderam ao critérios de RMS menor que 10⁻⁴.

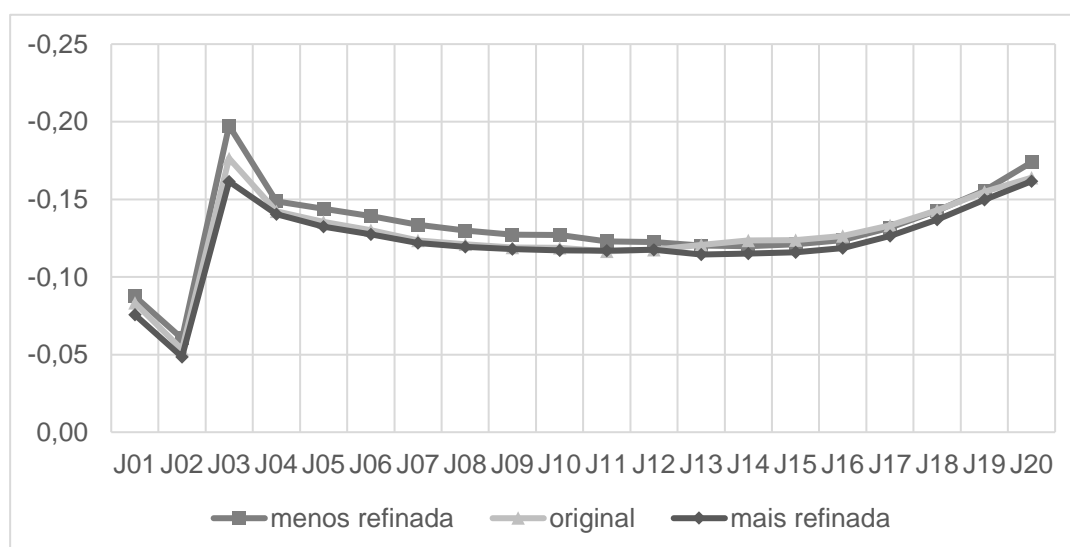
Após a conclusão das simulações foi definido um ponto no escoamento não perturbado na altura da edificação de interesse, 37m, e no meio da distância entre o plano de entrada e as edificações de entorno. Os valores de Cp foram calculados com a inserção da equação 3 onde foram considerados os valores de pressão dinâmica na fachada do modelo e no ponto definido. Os resultados de coeficientes de pressão foram exportados para um arquivo .csv. e um valor médio foi calculado para cada uma das aberturas do 13° pavimento. Eles são mostrados na tabela 7 e no gráfico 1.

TABELA 7 – Valores de Cp obtidos no teste de independência de malha.

Janela	Menos refinada (1)	Original (2)	Mais refinada (3)	Diferença (1) – (2)	Diferença (2) – (3)
J 01	-0,087362	-0,083266	-0,075698	4,69%	9,09%
J 02	-0,060393	-0,053266	-0,048526	11,80%	8,90%
J 03	-0,197429	-0,176409	-0,161523	10,65%	8,44%
J 04	-0,148764	-0,142323	-0,140342	4,33%	1,39%
J 05	-0,143963	-0,135434	-0,132380	5,92%	2,26%
J 06	-0,139218	-0,130064	-0,127500	6,58%	1,97%
J 07	-0,133655	-0,123579	-0,121779	7,54%	1,46%
J 08	-0,129937	-0,121126	-0,119465	6,78%	1,37%
J 09	-0,127190	-0,118892	-0,117958	6,52%	0,79%
J 10	-0,126984	-0,118883	-0,117077	6,38%	1,52%
J 11	-0,122995	-0,116429	-0,117018	5,34%	-0,51%
J 12	-0,122446	-0,117575	-0,117606	3,98%	-0,03%
J 13	-0,120312	-0,120692	-0,114354	-0,32%	5,25%
J 14	-0,119860	-0,123585	-0,115075	-3,11%	6,89%
J 15	-0,121114	-0,123732	-0,115965	-2,16%	6,28%
J 16	-0,123695	-0,126402	-0,118587	-2,19%	6,18%
J 17	-0,131746	-0,133176	-0,126481	-1,09%	5,03%
J 18	-0,142672	-0,143000	-0,137014	-0,23%	4,19%
J 19	-0,155780	-0,154977	-0,149720	0,52%	3,39%
J 20	-0,173913	-0,163861	-0,161644	5,78%	1,35%

Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 1: Valores médios de Cp obtidos nas aberturas



Fonte: Elaborado pelo autor

Como mostrado na tabela e no gráfico anteriores há uma diferença significativa, maior que 10%, entre os resultados dos Cp das malhas menos refinada e original. Esse resultado portanto, desqualifica a malha menos refinada. Entre os resultados das malhas original e mais refinada, as diferenças se apresentaram menores do que 10%, o que qualifica ambas as malhas. Para a escolha de qual malha usar nas demais simulações foi organizada uma tabela (TABELA 8) com os parâmetros de qualidade de malha já apresentados anteriormente.

TABELA 8 – Dados de qualidade das malhas simuladas

	Menos refinada	Original	Mais refinada
N° de elementos	2.143.014,00	4.777.801,00	10.569.709,00
H	19,04087	14,57535	11,18598
R	1,30637	-	1,30300
<i>Skewness</i> (máx)	0,92	0,97	0,90
<i>Orthogonal quality</i> (mín)	0,08	0,003	0,11
<i>Yplus</i> (maior valor)	2887,53	1233,13	1241,95

Fonte: Elaborado pelo autor

A malha mais refinada foi a única que apresentou os índices de *skewness* e *orthogonal quality* dentro dos valores recomendados, menor que 0,95 e maior que 0,1, respectivamente. Os valores de *yplus* das duas malhas mais refinadas foram próximos mas superiores ao valor de 1.000,00 indicado por Leite (2015), porém o mesmo autor demonstra que mesmo com o refinamento sucessivo de malhas, que reduziram em 670% o valor de *yplus* (de 5.143 para 667), as diferenças de valores de Cp (da ordem de 3 a 6%) não foram significativas. Com os resultados demonstrados acima, a malha mais refinada, com 10.569.709 de elementos, apresentou os melhores índices de qualidade e foi, portanto, escolhida para ser referência na geração das malhas dos outros domínios. Foram utilizados os mesmos parâmetros e buscado um número de elementos o mais próximo possível da malha definida pelo teste de independência de malha.

3.3.3 Configuração das condições de contorno

No CFX-Pré, modulo do CFX® para a entrada das condições de contorno da simulação, os doze arquivos foram configurados de acordo com as indicações encontradas em literatura. As laterais e o topo do domínio foram configurados como parede (*wall*) em condição de escorregamento, ou *free-slip*, onde não há atrito entre a superfície e o fluido que escoar. O piso e as paredes das edificações foram configurados como parede (*wall*) com condição de não escorregamento, ou *non-slip*, em que há atrito entre a superfície e o fluido. A rugosidade da parede foi considerada com o parâmetro *default* do

programa, o *smooth wall*. Com o outro parâmetro, o *rough wall*, é possível especificar a rugosidade desejada, como por exemplo, a rugosidade do entorno do edifício. Entretanto, como o entorno edificado foi modelado, e o perfil de vento foi calculado para a rugosidade onde o projeto está inserido, a definição desse parâmetro não se faz necessária também no piso do domínio (Cóstola e Alucci, 2011).

A entrada de ar do modelo foi configurada como *inlet*, com o perfil de turbulência descrito pelo modelo *Standard K-ε* e o perfil de velocidades de vento foi inserido através de um arquivo .ccl que contém a fórmula que descreve o perfil logarítmico de velocidade do ar (BRE, 1978 *apud* Bittencourt e Cândido, 2008):

$$V = V_m \cdot k \cdot z^a \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

V = velocidade média do vento na altura da abertura de entrada do ar (m/s);

V_m = velocidade média do vento, medida na estação meteorológica a uma altura padrão de 10m (m/s);

z = altura da abertura de entrada do vento;

k, a = coeficientes que variam de acordo com a rugosidade do entorno (TAB. 9).

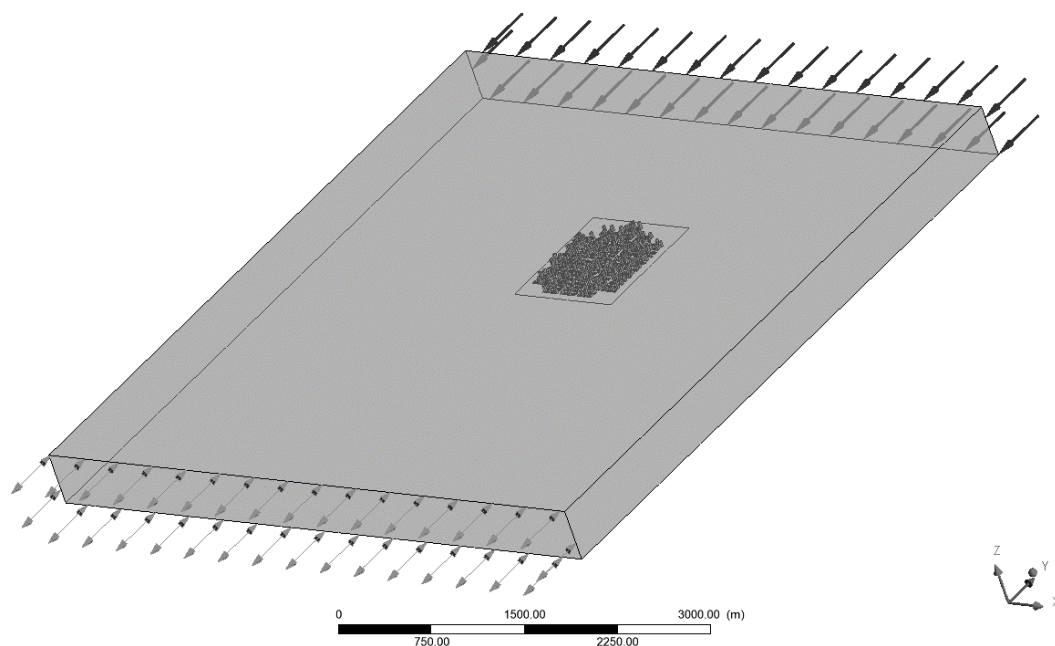
TABELA 9 – Coeficientes de rugosidade do entorno

Coeficientes do terreno	k	a
Área aberta plana	0,68	0,17
Campo com obstáculos espaçados	0,52	0,20
Área urbana	0,35	0,25
Centro de cidade	0,21	0,33

Fonte: BRE, 1978 *apud* Bittencourt e Cândido, 2008

A saída foi configurada como *opening* com uma pressão relativa de 0 atm, considerando o fluxo normal à superfície e com a turbulência descrita pelo modelo *Standard k-ε*. A configuração do domínio definiu o fluido a ser simulado como *air* à 25°C, com a pressão de referência de 1 atm, e não foi considerado nenhum tipo de troca de calor na simulação. O modelo de turbulência adotado foi o *Standard K-ε*.

FIGURA 12: Domínio do modelo de alta densidade com altura variando. Entrada do vento 0°



Fonte: Elaborado pelo autor

3.4. Configuração das simulações no EnergyPlus™

Uma vez concluídas as simulações no CFX®, foram conduzidas simulações termoenergéticas no *EnergyPlus™* segundo as metodologias da NBR 15.575 e do RTQ-R para determinar a classificação do caso de estudo segundo a normalização brasileira. Estas simulações anuais usaram os dados de C_p obtidos nas simulações do CFX®, para as condições de entorno de alta densidade com altura constante e com altura variável, nas três orientações solares, 0°, 45° e 90° para um diagnóstico do comportamento real do caso de estudo, inserido em um contexto urbano.

3.4.1. Simulação para a NBR 15.575:2013

A metodologia de comprovação do desempenho térmico por simulação computacional presente na Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais, a NBR 15.575:2013, determina que sejam analisados os desempenhos térmicos da edificação em dois dias típicos, de verão e inverno, e que a temperatura operativa interna máxima e mínima, respectivamente, sejam comparadas com as temperaturas do ar externo. A temperatura operativa interna máxima deve ser menor ou igual à temperatura máxima externa no dia típico de verão. E a temperatura operativa interna mínima deve ser maior ou igual à temperatura externa mínima acrescida de 3° no dia típico de inverno. Assim, garante-se o atendimento ao desempenho térmico mínimo necessário. Os requisitos para o

atendimento aos níveis intermediário e superior da norma são demonstrados a seguir (TABELA 10).

TABELA 10 – Requisitos de desempenho térmico segundo a NBR 15.575

Dia típico	Nível de desempenho	Critérios	
		Zonas 1 a 7	Zona 8
Verão	Mínimo	$T_{i,máx} \leq T_{e,máx}$	$T_{i,máx} \leq T_{e,máx}$
	Intermediário	$T_{i,máx} \leq (T_{e,máx} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i,máx} \leq (T_{e,máx} - 1^{\circ}\text{C})$
	Superior	$T_{i,máx} \leq (T_{e,máx} - 4^{\circ}\text{C})$	$T_{i,máx} \leq (T_{e,máx} - 2^{\circ}\text{C})$
		Zonas 1 a 5	Zonas 6, 7 e 8
Inverno	Mínimo	$T_{i,mín} \geq (T_{e,mín} + 3^{\circ}\text{C})$	Nessas zonas este critério não precisa ser verificado
	Intermediário	$T_{i,mín} \geq (T_{e,mín} + 5^{\circ}\text{C})$	
	Superior	$T_{i,mín} \geq (T_{e,mín} + 7^{\circ}\text{C})$	

Legenda:

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

$T_{i,máx}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior à edificação, em graus Celsius

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

$T_{i,mín}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior à edificação, em graus Celsius

Fonte: Tabelas E.1 e E.2 da NBR 15.575 (ABNT, 2013)

Os dias típicos de verão e inverno são estabelecidos pela própria norma para 26 cidades brasileiras, os valores definidos para a cidade de Belo Horizonte são descritos na TABELA 11.

TABELA 11 – Dias típicos de Verão e Inverno estabelecidos para Belo Horizonte

	Verão	Inverno
Temperatura máxima diária	32°C	-
Temperatura mínima diária	-	8,7°C
Amplitude diária de temperatura	10,3°C	12,6°C
Temperatura de Bulbo Úmido	21,7°C	16,0°C
Radiação Solar	4.641 Wh/m ²	3.761 Wh/m ²
Nebulosidade	6 décimos	3 décimos

Fonte: Tabelas A.2 e A.3 da NBR 15.575 (ABNT, 2013)

Para a inclusão da ventilação natural na simulação, a norma estabelece que deve ser usada a taxa de 01 (uma) renovação de ar por hora, a ser admitida constantemente nas 24 horas simuladas de cada dia. Porém, ela oferece a possibilidade de usar também a

taxa de 05 (cinco) renovações de ar por hora, caso o desempenho térmico não seja atingido.

Para esta metodologia de simulação foi adotado o campo *ZoneVentilation:DesignFlowRate* onde especifica-se uma vazão de projeto para as zonas térmicas que serão ventiladas (neste caso apenas as zonas de permanência prolongada), a taxa de renovação de ar (1 ren/h) e a natureza da ventilação, se é natural ou forçada (natural). Neste caso, o programa entra com essa vazão de ar externo nos cálculos de balanço térmico sem considerar a direção e velocidades de vento do arquivo climático, condições de entorno da edificação e coeficientes de pressão.

Outra especificidade da metodologia trazida pela NBR 15.575 é a não consideração de cargas internas, como a presença de pessoas, equipamentos eletrônicos e iluminação artificial. Portanto, a norma não considera a geração de calor interna no cálculo da temperatura interna, apenas a interação da edificação com o meio externo. Não foi considerado também nenhum tipo de obstrução externa às aberturas, seja da própria edificação ou do entorno.

3.4.2. Simulação para o RTQ-R

A metodologia de simulação computacional do RTQ-R (2012) analisa o comportamento das edificações em dois cenários, quando naturalmente ventilada ou quando condicionada artificialmente, para definir a eficiência da envoltória de edificações residenciais para resfriamento e para aquecimento. O regulamento especifica que o programa de simulação deve atender aos requisitos da ASHRAE Standard 140:2004, os arquivos climáticos a serem usados devem ser do tipo TMY ou TRY da localidade onde o edifício será construído ou da localidade mais próxima e que possui características climáticas semelhantes, a geometria do modelo deve corresponder exatamente ao projetado, assim como as propriedades térmicas da envoltória. Diferentemente da metodologia da NBR 15575, o RTQ-R considera os espaços de permanência prolongada ocupados e com cargas internas de iluminação artificial e equipamentos. Outra diferença é que o RTQ-R considera simulações anuais com dados horários de saída.

Para avaliar a eficiência da envoltória para resfriamento a edificação deve ser simulada com o sistema de ventilação natural modelado, que no caso do *EnergyPlus™* é o *AirFlow Network*. Considera-se as aberturas para ventilação de todos os cômodos da UH, portas e janelas; rugosidade do entorno igual a 0,33, equivalente a um terreno urbano adensado; os valores de C_p podem ser inseridos ou calculados pelo próprio *EnergyPlus™*; o coeficiente de descarga deve ser igual a 0,6; deve ser considerado

fluxo de ar por frestas e o controle das aberturas é determinado pela temperatura⁷. O regulamento sugere 20°C como temperatura do termostato.

O parâmetro para a análise da eficiência da envoltória para resfriamento é o indicador de graus-hora de resfriamento, cuja temperatura operativa interna base é de 26°C. Para cada ambiente de permanência prolongada individualmente, subtrai-se 26°C da temperatura operativa horária obtida na simulação e soma-se os resultados positivos das 8.760 horas anuais. O total obtido é classificado de acordo com a tabela fornecida pelo portal Procel Info, com valores de 1 a 5, determinando o equivalente numérico da envoltória do ambiente para resfriamento ($EqNumEnv_{Resfr}$). É então calculada uma média ponderada da classificação pela área dos ambientes, obtendo o equivalente numérico da envoltória da unidade habitacional autônoma para resfriamento ($EqNumEnv_{Resfr}$).

No segundo cenário, quando condicionada artificialmente, para determinar a eficiência da envoltória para aquecimento, deve ser modelado um sistema de condicionamento de ar que irá operar diariamente no período das 21 às 8 horas; no período restante do dia deve ser considerada a ventilação natural conforme o primeiro cenário. O sistema unitário deve atender a todos os ambientes de permanência prolongada, com termostato de 24°C para refrigeração e 22°C para aquecimento. As demais características do sistema, como capacidade, coeficiente de performance (COP), renovação de ar e outras são especificadas no regulamento.

Da simulação computacional é retirado o valor de consumo energético anual do sistema de condicionamento de ar utilizado para aquecimento, sendo o mesmo dividido pela área do ambiente e assim caracterizando o consumo relativo para aquecimento (C_A). O valor de C_A é classificado de 1 a 5 conforme tabela fornecida pelo portal Procel Info, obtendo-se então o equivalente numérico da envoltória do ambiente para aquecimento ($EqNumEnv_{Amb_A}$). Em seguida, é calculada a média da classificação dos ambientes ponderada pela área dos mesmos, tendo como resultado o equivalente numérico da envoltória da unidade habitacional autônoma para aquecimento ($EqNumEnv_A$).

Com os valores dos $EqNumEnv_{Resfr}$ e $EqNumEnv_A$ é determinado o equivalente numérico da envoltória da unidade habitacional autônoma ($EqNumEnv$) através de equações que ponderam esses valores de acordo com a zona bioclimática na qual o projeto está inserido. No caso de edificações multifamiliares, a eficiência da envoltória

⁷ Nessa forma de controle da ventilação o EnergyPlus™ abre as janelas quando a temperatura do ar ambientes está maior que a temperatura do termostato, e também quando é superior à temperatura externa.

total do edifício é calculada através da média dos EqNumEnv de cada unidade, ponderados pela área útil delas.

3.4.3. Simulação do caso de estudo

A simulação do caso de estudo teve como objetivo gerar dados de saída dos modelos que permitam compreender o comportamento estimado do edifício considerado, no que tange à ventilação natural e ao conforto térmico, em um meio urbano adensado.

Como mostrado no item 2.2.3.1, os modelos multizona, como o *AirFlow Network* do *EnergyPlus*TM, são largamente utilizados para simulações termo energéticas anuais de edificações, tanto em trabalhos acadêmicos como em trabalhos técnicos, porém dependem muito da qualidade dos valores de Cp utilizados nos modelos. Assim sendo, primeiro foram conduzidas simulações de CFD, configuradas de acordo com os passos mostrados no item 3.4, para a obtenção dos coeficientes de pressão na fachada do edifício. Concluídas estas simulações, foram calculadas as médias dos valores de Cp dos pontos da malha calculada em cada uma das janelas dos apartamentos, dos três andares estudados, obtendo-se finalmente um valor de Cp por janela que foi usado como dado de entrada da simulação no *EnergyPlus*TM.

A simulação do caso de estudo no *EnergyPlus*TM é anual e com base nos arquivos climáticos selecionados. A geometria do modelo reproduz fielmente a edificação, sendo cada cômodo uma zona térmica, e as características térmicas da envoltória foram retiradas do estudo de Ferreira (2016), assim como nos modelos utilizados na simulação para a NBR 15.575 e o RTQ-R. Os perfis de uso e os valores de carga térmica de ocupação, iluminação artificial e equipamentos foram considerados conforme a metodologia descrita no RTQ-R.

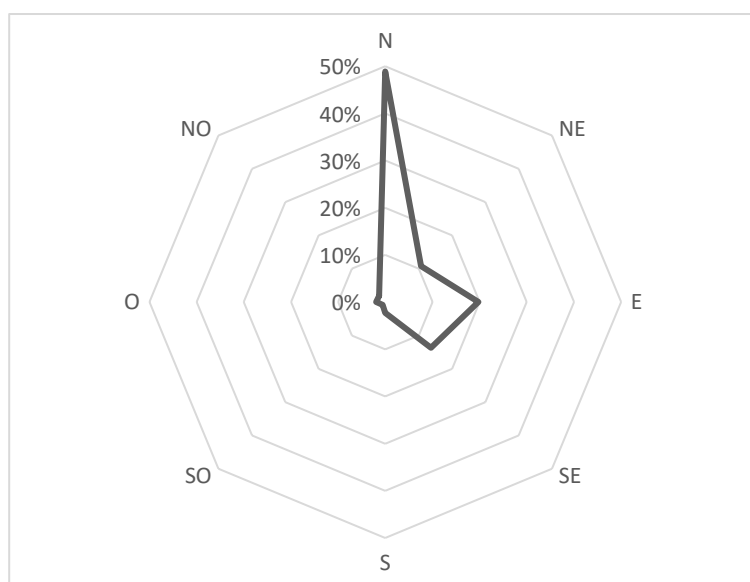
No modelo *AirFlow Network* foram inseridos os valores de Cp; foram consideradas aberturas aptas à ventilação as janelas e portas internas de todos os cômodos, exceto do banheiro; o coeficiente de descarga utilizado foi de 0,60. O controle de abertura das janelas foi feito através da temperatura interna, com o valor do termostato estipulado em 20°C, conforme metodologia do RTQ-R.

Os dados de saída da simulação analisados foram: as temperaturas externas; as temperaturas operativas internas de cada cômodo; a renovação de ar por hora. Com as temperaturas operativas foram calculados os percentuais de hora de conforto (POC) conforme metodologia do modelo de conforto adaptativo descrita na ASHRAE 55:2013.

3.5. Aplicação da metodologia proposta à cidade de Belo Horizonte, MG

Como dito anteriormente, a metodologia proposta foi aplicada à cidade de Belo Horizonte. Para a definição das direções de vento a serem simuladas foi feita uma análise de frequência de ocorrência das direções encontradas no arquivo TMY da base SWERA criado com os dados obtidos na estação da Pampulha. Para essa análise foram consideradas apenas os pontos cardiais (N, L, S, O) e colaterais (NE, SE, SO, NO). Os resultados são mostrados graficamente a seguir (GRAF. 2). A maior ocorrência foi para o vento Norte (0°) com 49%, o vento Leste (90°) com 20%, o vento Sudeste (135°) com 14%, e o vento Nordeste (45°) com 11%. As demais orientações somam 7%. As quatro orientações listadas acima serão consideradas na simulação pois representam 93% da condição de vento de Belo Horizonte.

GRÁFICO 2: Frequência de ocorrência para a direção dos ventos em BH.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do arquivo TMY de BH.

Como também foram simuladas três diferentes orientações solares, 0° , 45° e 90° , as direções totais de vento que foram simulados são acrescidas dos ângulos 180° e 225° , uma vez que a rotação do modelo para as diferentes orientações solares, faz com a orientação dos ventos, que permanece estática, atinja duas novas direções de simulação do vento. Com isso, foram simuladas por fim, seis direções de vento em relação ao modelo, 0° , 45° , 90° , 135° , 180° e 225° . Tendo sido, portanto, criados 12 domínios diferentes, seis de alta densidade com altura constante e seis de alta densidade com a altura variável, nas orientações descritas acima.

4. RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos na aplicação da metodologia proposta no capítulo anterior. Primeiro foram definidos os modelos teóricos de entorno edificado de baixa e de alta densidade com base nos dados levantados de oito cidades brasileiras. Em seguida serão apresentados os resultados obtidos com a simulação computacional dos modelos definidos segundo as metodologias da NBR 15.575, do RTQ-R, e da metodologia proposta para o caso de estudo, com o uso de simulação em CFD combinado com a simulação no EnergyPlus™.

Será discutido se os resultados obtidos com as análises conforme as normas brasileiras são condizentes com os resultados dos parâmetros de conforto térmico obtidos com o estudo de caso. Serão também discutidos os resultados das simulações em CFD do estudo de caso e será feita uma análise comparativa com resultados de experimentos similares encontrados na literatura. E finalmente serão discutidos os resultados do desempenho anual da ventilação natural e conforto térmico no caso de estudo obtidos com a simulação no EnergyPlus™ e a possibilidade de correlação entre as taxas de renovação de ar atingidas com as temperaturas operativas internas.

4.1. Definição dos modelos urbanos teóricos de entorno edificado

Conforme mostrado no item 3.1, uma vez definidas as cidades, foi feito um levantamento da legislação urbanística e foram escolhidos três zoneamentos urbanos por cidade que representariam condições de baixa, média e alta densidade de ocupação. Essa escolha foi feita pelos parâmetros urbanísticos de coeficiente de aproveitamento (CA), afastamentos e taxa de ocupação (TO). Dentre as cidades analisadas encontrou-se dificuldade de definir os zoneamentos nas cidades de Brasília e de Santa Maria. Em Brasília, a lei de uso e ocupação do solo possui um caráter bem distinto das demais cidades brasileiras. Ela apresenta um zoneamento bem pontual e setorizado, em que os parâmetros são alterados a cada setor da cidade, sendo, portanto, complicado encontrar áreas que possuíssem apenas um tipo de zoneamento e que pudessem ser compatíveis com a delimitação dos setores censitários do IBGE (o passo seguinte do procedimento como será mostrado adiante). No caso de Santa Maria, apesar de ser possível o acesso ao texto da lei pelo site da prefeitura, não foram encontrados os arquivos dos anexos da lei, onde estão descritos os valores dos parâmetros em cada zona e os mapas do zoneamento da cidade. Por essa razão, essas duas cidades não foram consideradas para a definição dos modelos de entorno a serem usados. Os parâmetros urbanísticos das demais cidades e a média utilizada para o desenho dos modelos de entorno seguem mostrados na TAB. 12.

Em seguida foi definido um setor censitário por zoneamento, por cidade, procurando selecionar o setor com maior densidade de ocupação. Esse levantamento foi feito através do site do CENSO⁸, em que as delimitações dos setores censitários são sobrepostas às imagens de satélite do *Google Maps*. Foram evitadas áreas com grandes vazios urbanos, equipamentos públicos, e grandes construções não residenciais, como praças, clubes, estádios de futebol, pois poderiam distorcer o valor da densidade habitacional. Os valores de densidade habitacional encontrados em cada setor são mostrados na TAB. 13.

TABELA 12 – Parâmetros urbanísticos levantados

Cidade	Zona / Coeficiente de aproveitamento			Afastamento frontal
	Baixo	Médio	Alto	
Curitiba, PR	ZR3 - 1,0	ZR4 - 2,0	SE- 4,0	5
Santa Maria, RS	-	-	-	-
Belo Horizonte, MG	ZAR1 - 1,3	ZAP - 2	ZCBH - 3,4	4
Brasília, DF	-	-	-	-
Garanhuns, PE	ZAD - 1,0	ZEC - 2,0	Não há CA > 2	5
Campo Grande, MS	Z2 - 1,0	Z8 - 3,0	Z10 - 6,0	5
Cuiabá, MT	ZPR - 2,0	ZCTR3 - 4,0	ZCTR1 - 6,0	-
Manaus, AM	SU6 - 1,0	SU10 - 3,0	SU12 - 4,8	5
Média	1,2	2,7	4,8	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nas legislações municipais de cada cidade.

TABELA 13 – Densidade populacional das cidades levantadas.

Cidade	Densidade populacional (hab/km ²)		
	Baixo	Médio	Alto
Curitiba, PR	10583,02	16661,23	45690,30
Santa Maria, RS	-	-	-
Belo Horizonte, MG	11154,57	65689,47	34588,34
Brasília, DF	-	-	-
Garanhuns, PE	16370,07	7846,45	-
Campo Grande, MS	13379,25	4365,31	17521,30
Cuiabá, MT	5457,10	30853,80	20098,15
Manaus, AM	25635,19	17940,38	28634,99
Média	13763,20	23892,80	29306,60

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos dados disponibilizados no site do CENSO, IBGE.

⁸ <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st>

Em cada setor censitário escolhido foram levantadas através do *Google Earth Pro* as características do desenho urbano, como largura de vias e dimensões das quadras (TABELA 14). Calculou-se as médias dos valores levantados e os valores médios foram aproximados a valores múltiplos de cinco mais próximos, utilizados para a confecção do modelo teórico.

TABELA 14 – Características do desenho urbano das cidades levantadas.

Cidade	Dimensão das quadras (m)						Dimensão da via (m)		
	Baixo		Médio		Alto		Baixo	Médio	Alto
Curitiba, PR	120	80	215	60	105	85	18	30	18
Santa Maria, RS	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Belo Horizonte, MG	150	60	150	60	120	120	10	12	20
Brasília, DF	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Garanhuns, PE	160	60	160	60	-	-	13	12	-
Campo Grande, MS	300	40	150	105	120	120	10	15	20
Cuiabá, MT	130	60	150	60	160	60	12	13	30
Manaus, AM	160	40	150	50	180	85	8	12	18
Média	170	56,7	162,5	65,8	137,0	94,0	11,8	15,7	21,2
Valores utilizados	170	55	165	65	135	95	12	16	21

Fonte: Elaborado pelo autor

Foram levantados também o número de pavimentos de cada edificação presente nessas áreas através da ferramenta *streetview* do *Google Earth Pro*. Não foi possível realizar esse levantamento na área de baixa densidade na cidade de Garanhuns, assim como parte da região de média densidade, devido à ausência do mapeamento dessas regiões na ferramenta. Neste levantamento só foram contabilizadas edificações consolidadas, estacionamentos sem construções, lotes vagos e construções em andamento que não haviam chegado ao último pavimento não foram contabilizados. Em empreendimentos com mais de uma torre, cada torre foi contabilizada individualmente com seu número de pavimentos. Os valores máximos, mínimos e médios do número de pavimentos e o total de edificações levantadas são mostrados na tabela 15.

A partir dos dados coletados foi possível definir a conformação dos modelos de entorno urbanos que serão utilizados nas simulações. Foram definidos três tipos de modelo de entorno: um de baixa densidade com altura das edificações uniforme; um modelo de alta densidade com altura das edificações uniforme; e um modelo de alta densidade com alturas das edificações variando. Não foi considerado um modelo com densidade média de ocupação por acreditar-se que os modelos de baixa e alta densidade são suficientes para demonstrar as situações extremas do impacto do entorno na ventilação

dos edifícios. A representação de dois modelos de entorno de alta densidade, um com a altura uniforme das edificações e outro variando, teve como objetivo investigar as possíveis consequências da simplificação comum na literatura de considerar as alturas das edificações de entorno constantes nos modelos teóricos. Nos países europeus e nos Estados Unidos essa conformação de altura uniforme é encontrada comumente nas cidades, entretanto na realidade brasileira, exceto na baixa densidade onde prevalecem sobrados, as alturas das edificações são muito variadas e completamente aleatórias.

TABELA 15 – Número de pavimentos das edificações levantadas.

Cidade	Baixa densidade				Média densidade				Alta densidade			
	Mn	Md	Mx	Tot	Mn	Md	Mx	Tot	Mn	Md	Mx	Tot
Curitiba, PR	1	1,4	4	207	1	4	9	26	1	17	27	18
Santa Maria, RS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Belo Horizonte, MG	1	1,9	5	107	5	5	5	15	1	9	29	20
Brasília, DF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Garanhuns, PE	-	-	-	-	1	2,2	3	29	-	-	-	-
Campo Grande, MS	1	1	2	226	1	1,9	28	243	1	3,2	28	74
Cuiabá, MT	1	1,2	3	278	4	5,3	9	12	1	6,1	30	24
Manaus, AM	1	1,4	3	186	1	1,4	4	224	1	4	13	16
Média		1,4				3,3				7,9		

Mn: mínimo; Md: média; Mx: máxima; Tot: Total de edificações

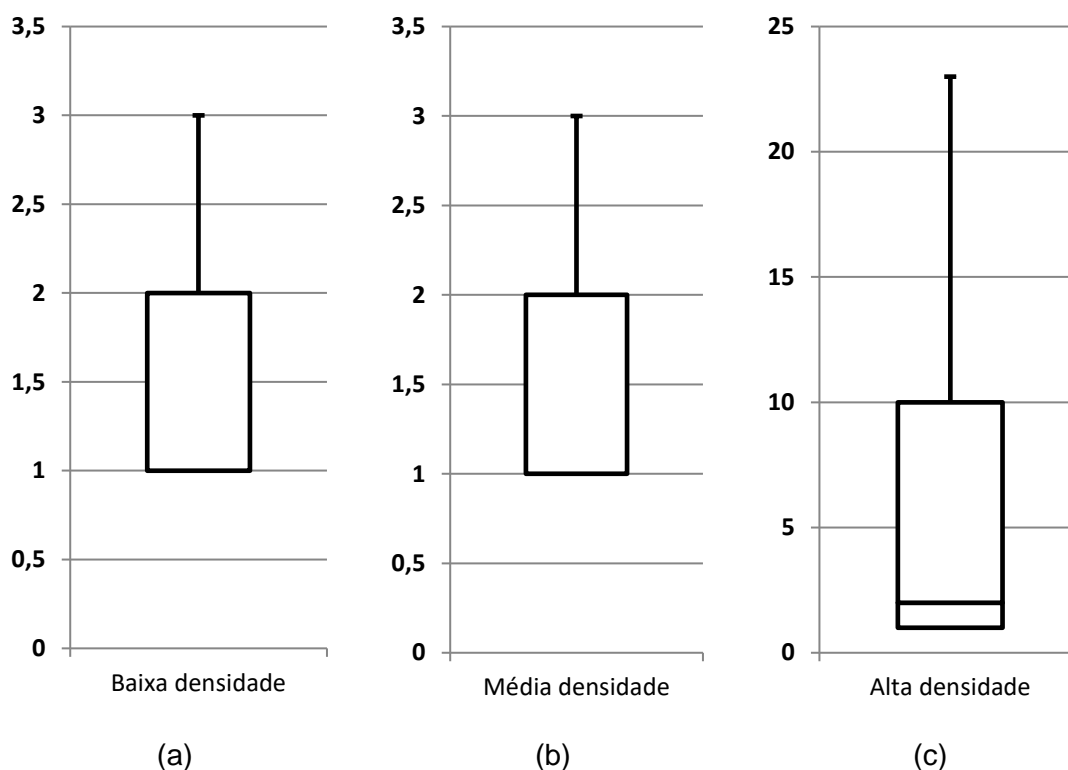
Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro passo para a construção dos modelos de entorno foi a definição das alturas das edificações em cada modelo. O gráfico com o resultado do levantamento das alturas das edificações (GRAF.) mostra os valores dos quartis, da mediana e dos limites superiores e inferiores dos valores coletados da amostra. Na baixa densidade os dados mostram uma predominância de edificações com um pavimento, porém com o 3º quartil chegando a dois pavimentos e o limite superior em três pavimentos. Apesar da média das alturas para a baixa densidade ser igual a 1,4 pavimentos (TAB. 15), pretende-se avaliar a pior situação em cada densidade, portanto no modelo de baixa densidade a altura das edificações foi fixada em dois pavimentos, pois condiz com os parâmetros urbanísticos e com alturas de edificações encontradas no levantamento.

Na alta densidade é possível perceber no gráfico (GRAF. 3) uma acentuada distorção na mediana das edificações e dos quartis em relação aos valores encontrados nas cidades com grande adensamento. Isso é devido à alta incidência de edificações de um ou dois pavimentos mesmo em zoneamentos que permitem maior altimetria das edificações. As cidades de Campo Grande, Cuiabá e Manaus possuem um caráter de

ocupação do solo mais espreado, e não tiveram ainda pressão do mercado imobiliário para verticalização, como as cidades de Belo Horizonte e Curitiba.

GRÁFICO 3: Resultado do levantamento do número de pavimentos.



Observação: Devido à diferença muito expressiva entre os valores do eixo y entre os gráficos acima, não foi possível mantê-los em uma mesma escala, portanto sugere-se atenção na leitura dos mesmos.

Fonte: Elaborado pelo autor

A média das alturas mostrada na tabela 15 (7,9 pavimentos) é bastante inferior ao valor médio de Curitiba, 17 andares, por exemplo. Como o objetivo do trabalho é avaliar a pior situação em cada tipo de adensamento, com base na caracterização dos arranjos populacionais feita pelo IBGE (IBGE, 2015), foi escolhida a faixa acima de 2.500.000 habitantes, sendo selecionadas, portanto, apenas as amostras das cidades de Curitiba e Belo Horizonte. Com isso a média dos valores encontrados nas duas cidades foi igual a 12,82, sendo arredondado para 13 pavimentos.

Para o modelo de alta densidade de ocupação com as alturas das edificações variando foi feita uma frequência de ocorrência com os valores das amostras de Belo Horizonte e Curitiba. O valor mínimo encontrado na amostra foi de um pavimento, e o valor máximo foi de 29 pavimentos, apresentando uma amplitude de 28. Foram, portanto, definidas cinco faixas de altura das edificações, com intervalos de seis andares cada faixa. Depois foram calculadas as médias do número de pavimentos das edificações de cada faixa

para definir qual seria o número representativo daquela faixa. O número de pavimentos foi multiplicado pelo valor do pé-direito, 2,82 metros, e o resultado foi arredondado para o primeiro número inteiro superior. Os resultados seguem demonstrados na tabela 16.

TABELA 16 – Frequência de ocorrência dos pavimentos e alturas finais das edificações.

Faixa de pavimentos	Número de ocorrências	Frequência de ocorrência	Média do nº de pavimentos	Altura final das edificações (m)
1 – 6	14	37%	2	6
7 – 12	4	11%	9	26
13 – 18	6	16%	16	46
19 – 24	9	24%	22	63
25 – 30	5	13%	27	77

Fonte: Elaborado pelo autor

O edifício de interesse terá no modelo de baixa densidade a altura de três pavimentos (9 metros) e nos modelos de alta densidade, com a altura constante ou variando, a altura de treze pavimentos (37 metros). Após a definição das alturas das edificações foram então definidas as dimensões dos lotes, com base na planta do pavimento tipo, no coeficiente de aproveitamento e nos afastamentos frontais médios (TAB. 16). Para os afastamentos laterais e de fundo foi aplicada a legislação de Belo Horizonte e a de Curitiba às alturas das edificações propostas, e depois foi calculada uma média destes afastamentos. Os resultados seguem demonstrados na tabela 17.

A planta do pavimento tipo da edificação tem como área total 345,84 metros. Essa área de projeção da edificação foi utilizada para a construção dos lotes. A exceção foi o lote das edificações de dois pavimentos, que teve sua testada fixada em dez metros e a projeção da edificação foi ajustada de acordo com os afastamentos. A conformação dos lotes está mostrada na figura 13 adiante.

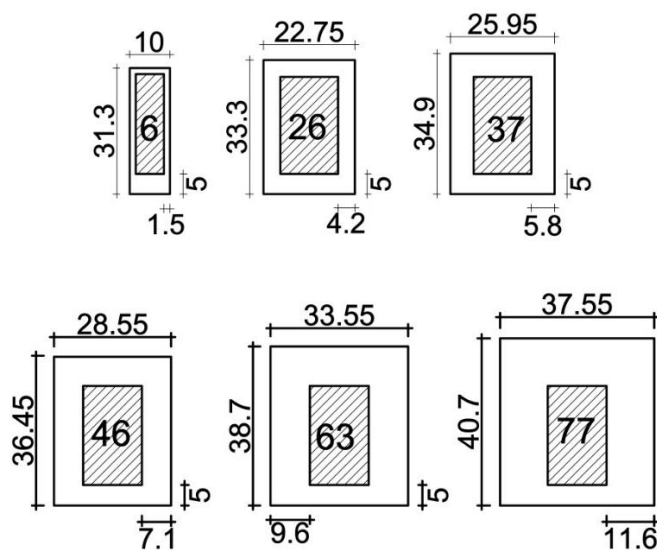
TABELA 17 – Dimensionamento dos lotes de acordo com a altura das edificações.

Altura das edificações (m)	Área Líquida (m²)	Afastamento lateral e fundo		Média dos afastamentos (m)	Área mínima dos lotes (m²)
		BH	Curitiba		
6	347,20	2,3	2	2,2	289,33
26	2.892,96	4,05	4,3	4,2	602,70
37	4.178,72	5,425	7,7	5,8	870,57
46	5.143,04	6,55	10,5	7,1	1.071,47
63	7.071,68	8,675	12,8	9,6	1.473,27
77	8.678,88	10,425	6,2	11,6	1.808,10

Fonte: Elaborado pelo autor

O passo seguinte foi a definição das dimensões das quadras que teve como base as médias dos valores levantados nas cidades (TAB. 14), porém algumas adaptações foram feitas para permitir o encaixe dos lotes nas quadras. A quadra da baixa densidade teve como dimensões 170x55 metros conforme o valor médio definido e, portanto o lote passou a ter uma profundidade de 27,5 metros, ao invés de 31,3 metros como mostrado na figura 13. A quadra da alta densidade com alturas constantes tem como valores médios de dimensão 135x95 metros, entretanto devido à profundidade do lote ser igual a 34,9 metros a quadra foi redimensionada para uma profundidade de 69,8 metros, o que permitiu um melhor aproveitamento da área da quadra no sentido do comprimento. A quadra da alta densidade foi definida através de números aleatórios, como dito anteriormente no item 3.1, portanto se fazia necessário que a largura da quadra fosse igual a duas vezes a maior profundidade possível, que é de 40,7 metros para os prédios com 77 metros de altura. Sendo assim, a largura final foi de 81,4 metros, e o comprimento de 157,55 metros, mantendo a área original da quadra definida na tabela 17. A conformação das quadras é apresentada na figura 14 a seguir.

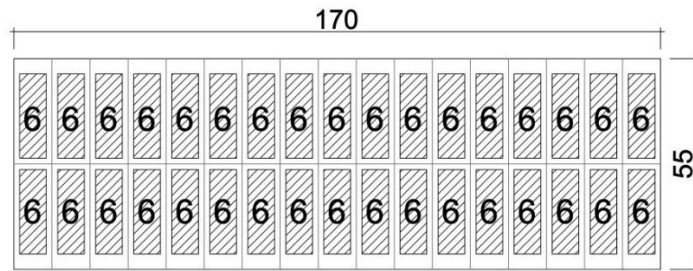
FIGURA 13: Conformação dos lotes a serem usados nos modelos de entorno.



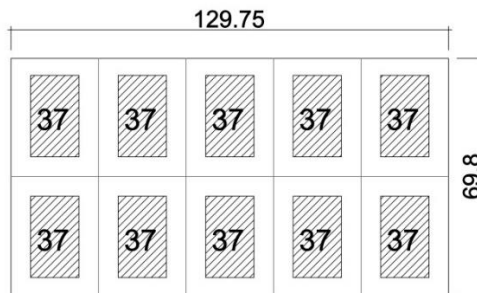
Obs: Os valores internos à projeção da edificação representam sua altura em metros.

Fonte: Elaborado pelo autor

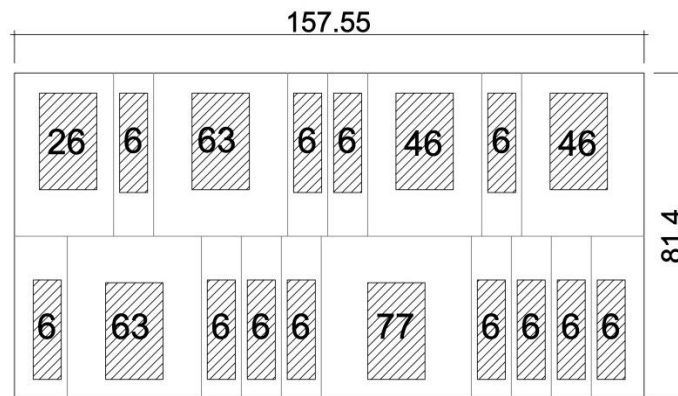
FIGURA 14: Desenho das quadras dos modelos de entorno edificado.



Baixa densidade



Alta densidade com altura das edificações constante



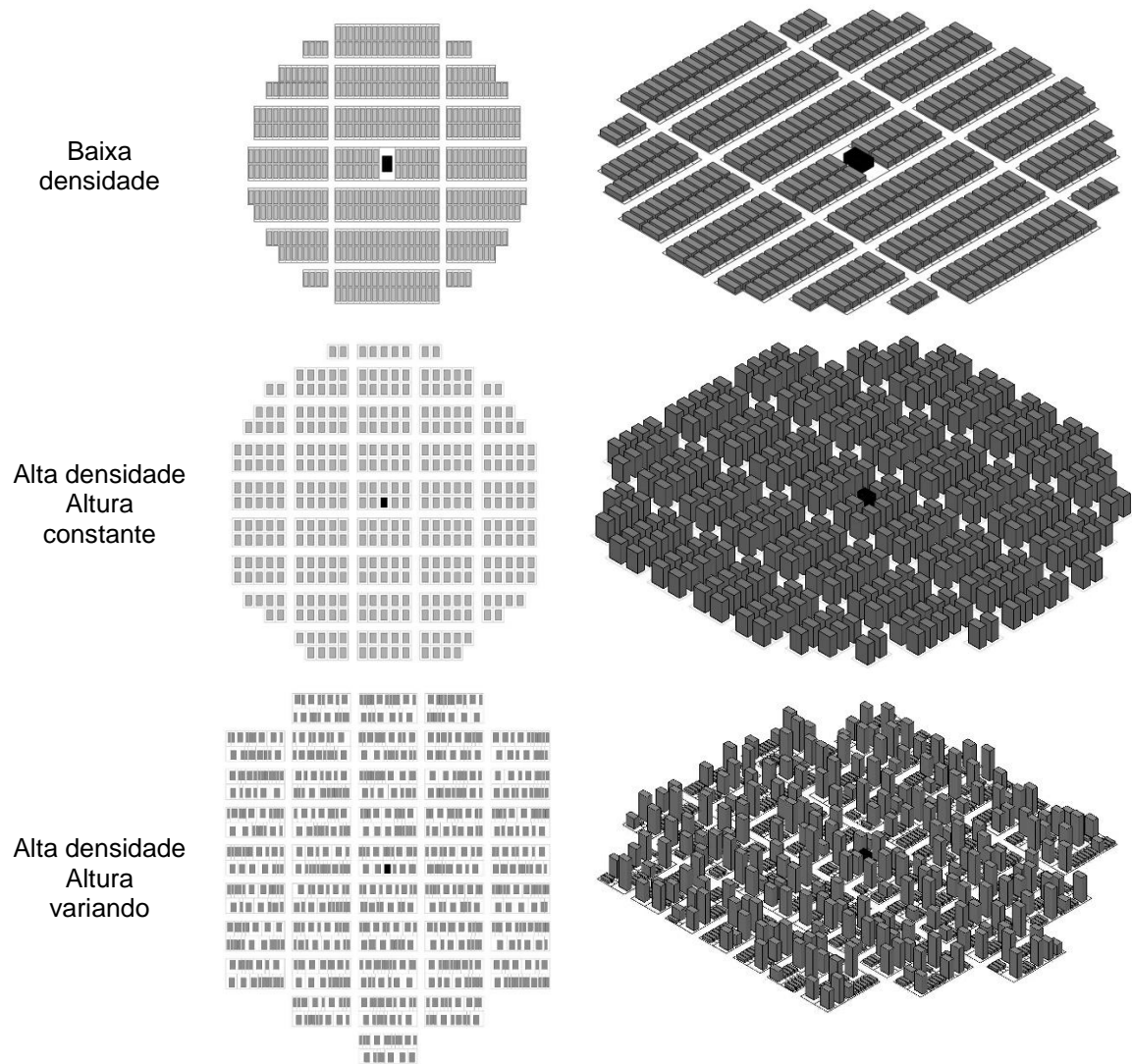
Exemplo de quadra da alta densidade com a altura das edificações variando.

Obs: os valores internos à projeção da edificação representam sua altura em metros.

Fonte: Elaborado pelo autor

Foram confeccionados dois modelos das condições de entorno, de baixa densidade e da alta densidade com altura constante, com raio de representação igual a 370 metros – o equivalente à 10H. Para o modelo de alta densidade com altura variável foi confeccionado um modelo com raio de representação equivalente a 6H, ou 462 metros. As quadras apresentadas na figura 14 foram dispostas de forma ortogonal espaçadas com as dimensões das vias, 12 e 21 metros para baixa densidade e para os dois modelos da alta densidade, respectivamente. Os três modelos de entorno resultantes são mostrados na figura 15 a seguir.

FIGURA 15: Modelos de entorno definidos



Obs: O edifício de interesse está destacado em preto no centro dos modelos urbanos definidos.

Fonte: Elaborado pelo autor

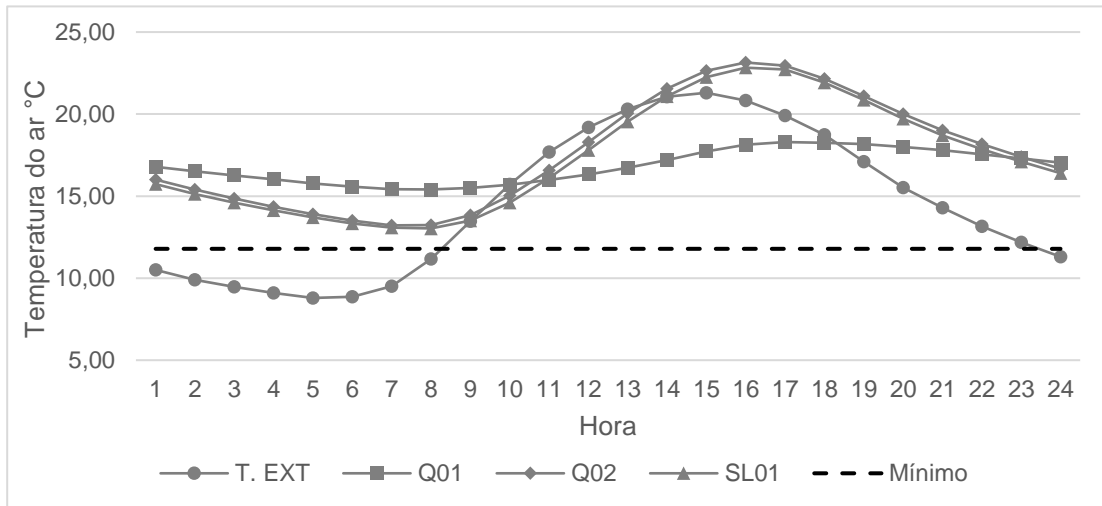
4.2. Resultados das simulações computacionais

4.2.1. Resultados para a NBR 15.575

Conforme o procedimento de simulação da análise de desempenho térmico da Norma de Desempenho, mostrada no item 3.4.1, o principal parâmetro é a temperatura operativa interna, em uma simulação de dias típicos de verão e de inverno. Devido ao grande número de dados gerados, serão mostrados no corpo do capítulo apenas aqueles relevantes para a análise. Todos os resultados obtidos na simulação para a NBR 15.575 são mostrados no Apêndice A.1.

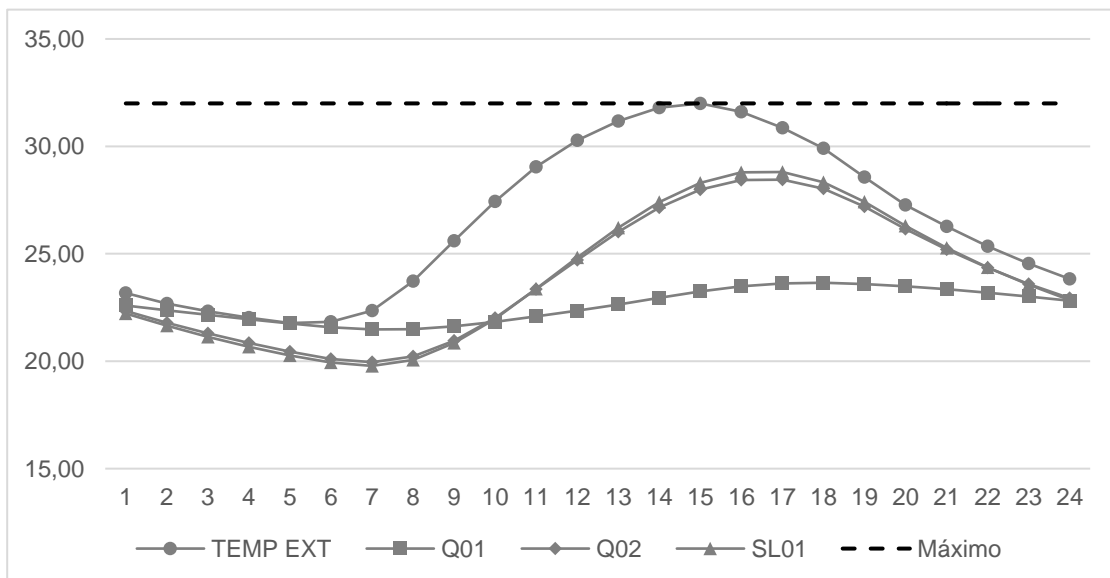
Nos gráficos a seguir são mostradas a variação horária das temperaturas externa e interna nos dias típicos de inverno e de verão, respectivamente, nos cômodos do apartamento 01 do primeiro andar, considerando a orientação solar de 0°. Na situação de inverno (GRAF. 4) é possível perceber que as temperaturas internas dos cômodos não atingem a referência de valor mínimo, representado pela linha tracejada em amarelo, que corresponde à temperatura externa mínima do ar acrescida de 3°C.

GRÁFICO 4: Dia típico de inverno do AP01 do 1ºPAV com orientação 0°



Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 5: Dia típico de verão do AP01 do 1ºPAV com orientação 0°



Fonte: Elaborado pelo autor

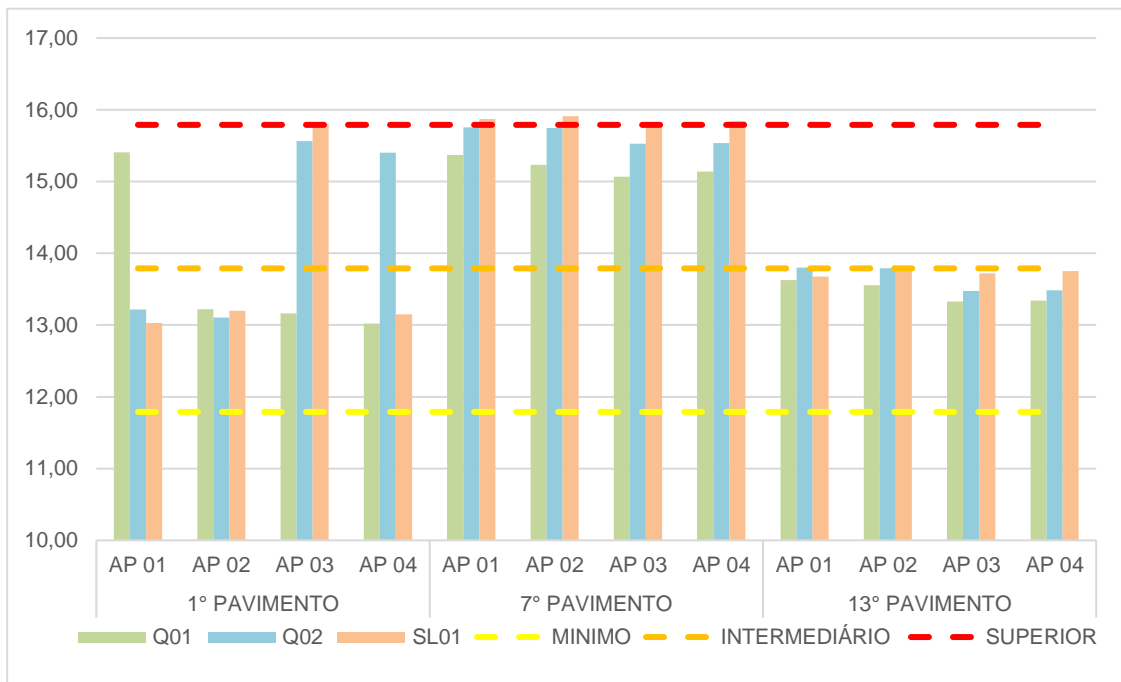
De forma semelhante, na situação de verão (GRAF. 5) é possível perceber que em nenhum horário do dia típico de verão simulado as temperaturas internas dos ambientes de permanência prolongadas são superiores à temperatura externa máxima, condição para atendimento ao desempenho térmico mínimo da NBR 15.575, representado pela linha amarela pontilhada.

Nos gráficos a seguir são mostrados os resultados de todos os cômodos de permanência prolongada (quartos e sala) de todos os quatro apartamentos por andar, dos três pavimentos e das três orientações solares. São apresentadas as temperaturas internas mínimas e máximas, para o inverno e para o verão, respectivamente, obtidas nas simulações para a NBR 15.575. Foram demarcados nos gráficos as temperaturas limites para o atendimento aos requisitos da norma, nos três níveis possíveis.

Analisando os gráficos é possível perceber que não houve diferença significativa no resultado das temperaturas operativas entre as orientações, tanto na simulação do dia típico de inverno quanto do dia típico de verão. Acredita-se que isso se deva à configuração da envoltória, já otimizada para o clima, e a metodologia da norma, uma vez que não há fontes de calor interno, e a vazão de ar externo fixa igual para todas as orientações.

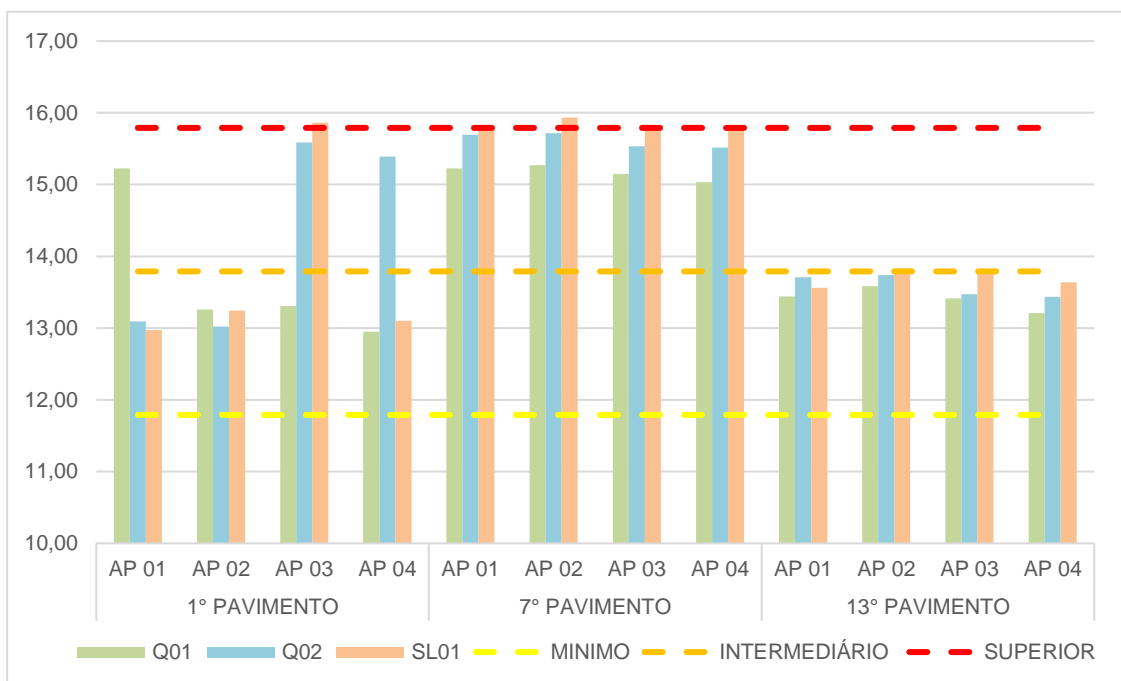
Os gráficos mostram também que todos os casos atendem aos requisitos mínimos de desempenho térmico da Norma de Desempenho, tanto para o dia típico de verão quanto para o dia típico de inverno.

GRÁFICO 6: Temperaturas internas mínimas, dia típico de inverno, orientação 0°



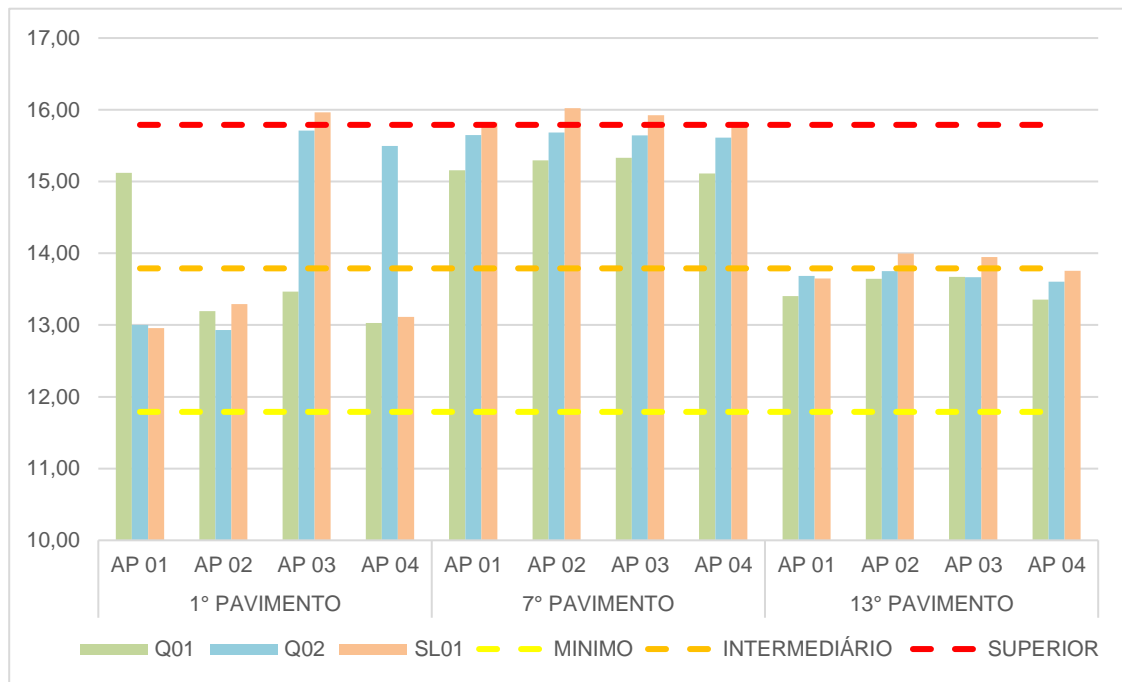
Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 7: Temperaturas internas mínimas, dia típico de inverno, orientação 45°



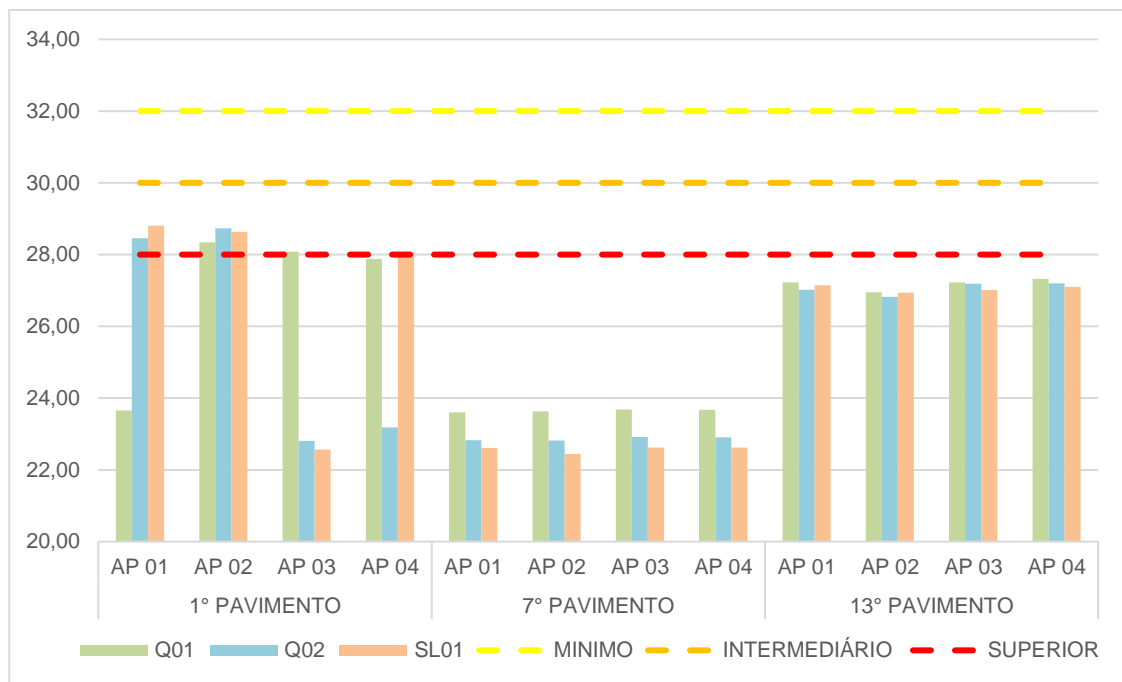
Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 8: Temperaturas internas mínimas, dia típico de inverno, orientação 90°



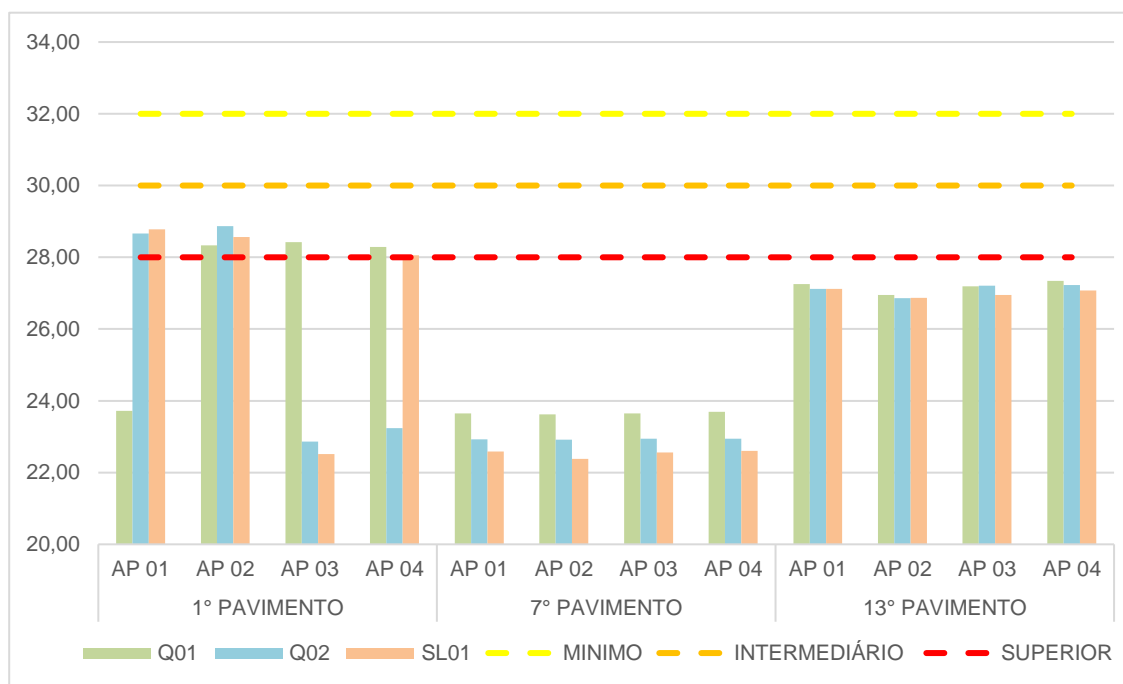
Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 9: Temperaturas internas máximas, dia típico de verão, orientação 0°



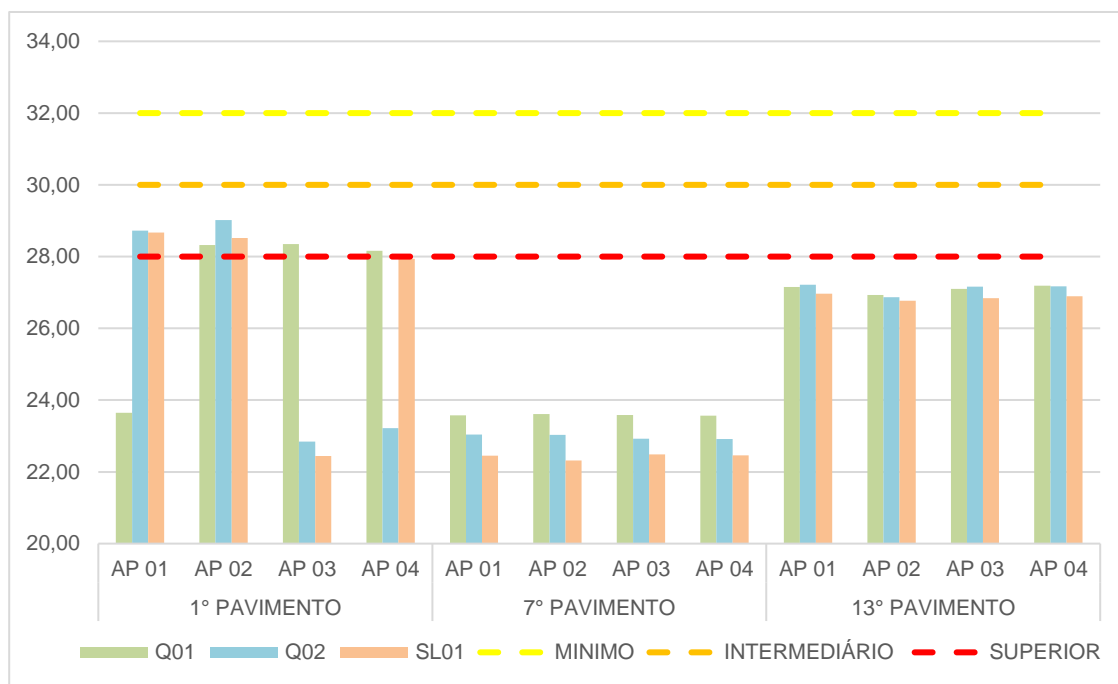
Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 10: Temperaturas internas máximas, dia típico de verão, orientação 45°



Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 11: Temperaturas internas máximas, dia típico de verão, orientação 90°



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2. Resultados para o RTQ-R

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética para Edifícios Residenciais (RTQ_R) pelo método de simulação computacional, utiliza os índices de Graus-hora de resfriamento (GHR) e de Consumo relativo para Aquecimento (C_A) para classificar a eficiência energética da envoltória das unidades habitacionais, por meio da Equivalente Numérica da Envoltória. (EqNumEnv). As simulações anuais tiveram como dados de saída a temperatura operativa interna dos ambientes de permanência prolongada, e o consumo elétrico para aquecimento. Esses dados são utilizados para o cálculo dos graus-hora de resfriamento e para o cálculo do consumo relativo para aquecimento, respectivamente.

A partir dos valores de GHR obtidos na simulação (TABELA 18), foram calculados os equivalentes numéricos de resfriamento de cada ambiente de permanência prolongada (EqNumAmb_{Resfr}, TABELA 19) segundo as tabelas fornecidas pelo portal ProcellInfo⁹, conforme texto do regulamento. A partir dos valores de EqNumAmb_{Resfr} obtidos foram calculados os valores dos equivalentes numéricos de resfriamento da unidade habitacional (EqNumEnv_{resfr}) através da média ponderada dos EqNumAmb_{Resfr} obtida pela área de cada ambiente (TABELA 20).

TABELA 18 – Valores de GHR obtidos na simulação para as 3 orientações.

1° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	185	5489	5346	5125	5796	5295	3304	0	0	4167	82	4843
45°	139	5877	5084	5253	6216	5431	3722	0	0	4408	106	4572
90°	76	5689	4853	4972	6081	5324	3796	0	0	4450	97	4407

7° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

13° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	1153	930	993	1077	902	953	1040	836	987	1122	838	1054
45°	1023	1170	888	1111	1164	929	1118	1001	868	1053	1018	855
90°	727	1089	607	814	1095	658	926	1017	624	837	1039	590

Fonte: Elaborado pelo autor

⁹ <http://www.procellinfo.com.br/main.asp?View={02A05065-372B-4133-B054-4369D8F37B3F}#2>

TABELA 19 – Valores de EqNumAmb_{Resfr} para cada ambiente de permanência prolongada.

1° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	5	2	2	2	2	2	3	5	5	3	5	2
45°	5	2	2	2	1	2	3	5	5	2	5	2
90°	5	2	2	2	2	2	3	5	5	2	5	2

7° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
45°	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
90°	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

13° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
45°	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
90°	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Fonte: Elaborado pelo autor

TABELA 20 – Valores de EqNumEnv_{Resfr} para cada Unidade Habitacional.

	1° PAV				7° PAV				13° PAV			
	AP 01	AP 02	AP03	AP04	AP 01	AP 02	AP03	AP04	AP01	AP02	AP03	AP04
0°	2,79	2,00	4,47	2,99	5	5	5	5	5	5	5	5
45°	2,79	1,76	4,47	2,73	5	5	5	5	5	5	5	5
90°	2,79	2,00	4,47	2,73	5	5	5	5	5	5	5	5

Fonte: Elaborado pelo autor

O próximo passo foi a obtenção do consumo relativo para aquecimento (C_A , TABELA 21) com base nos valores de consumo de energia para aquecimento retirados da simulação computacional para cada um dos ambientes de permanência prolongada, e a definição do equivalente numérico da envoltória do ambiente para aquecimento (EqNumAmb_A, TABELA 22).

Os EqNumAmb_A foram ponderados pela área de cada ambiente e foi determinada a média para cada unidade habitacional, ou seja, o equivalente numérico da envoltória da unidade habitacional autônoma para aquecimento (EqNumEnv_A), como mostra a TAB. 23.

TABELA 21 – Valores de C_A obtidos na simulação para as 3 orientações.

1° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	8,3	26,2	50,1	25,1	26,6	50,6	30,6	11,5	31,5	28,7	10,9	52,1
45°	10,3	26,5	51,9	22,0	27,5	49,1	25,5	20,3	29,0	29,4	18,5	53,6
90°	12,4	27,8	53,3	22,9	28,6	49,6	23,4	17,5	28,9	28,6	16,2	54,5

7° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	8,7	5,5	26,8	12,1	5,5	28,9	15,8	9,1	28,6	12,3	9,6	27,0
45°	9,9	7,6	28,9	6,9	8,0	26,5	9,4	28,4	24,7	13,1	28,0	28,1
90°	11,8	8,5	30,4	7,3	9,3	26,5	7,3	26,9	24,6	12,0	26,7	29,3

13° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	2,1	0,90	5,03	2,81	0,94	5,60	4,57	1,85	5,94	3,62	1,93	5,41
45°	3,1	0,98	6,3	1,96	0,97	4,95	3,10	8,79	5,04	4,70	8,55	6,45
90°	3,7	1,1	6,1	1,92	1,09	4,33	2,15	7,34	4,25	3,97	7,20	6,06

Fonte: Elaborado pelo autor

TABELA 22 – Valores de $EqNumAmb_A$ para cada ambiente de permanência prolongada.

1° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	4	2	1	2	2	1	2	4	2	2	4	1
45°	4	2	1	2	2	1	2	3	2	2	3	1
90°	4	2	1	2	2	1	2	3	2	2	3	1

7° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	4	5	2	4	5	2	3	4	2	4	4	2
45°	4	4	2	4	4	2	4	2	2	3	2	2
90°	4	4	2	4	4	2	4	2	2	4	2	2

13° PAVIMENTO												
	AP 01			AP 02			AP 03			AP 04		
	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0°	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
45°	5	5	4	5	5	5	5	4	5	5	4	4
90°	5	5	4	5	5	5	5	4	5	5	4	4

Fonte: Elaborado pelo autor

TABELA 23 – Valores de EqNumEnv_A para cada Unidade Habitacional

	1° PAV				7° PAV				13° PAV			
	AP 01	AP 02	AP03	AP04	AP 01	AP 02	AP03	AP04	AP01	AP02	AP03	AP04
0°	2,03	1,51	2,48	1,99	3,25	3,25	2,75	3,01	5,00	5,00	5,00	5,00
45°	2,03	1,51	2,24	1,75	3,01	3,01	2,53	2,26	4,51	5,00	4,76	4,26
90°	2,03	1,51	2,24	1,75	3,01	3,01	2,53	2,53	4,51	5,00	4,76	4,26

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalmente, foi calculado o equivalente numérico da envoltória da unidade habitacional autônoma (EqNumEnv), através da equação 3.33 do RTQ-R:

$$\text{EqNumEnv} = 0,64 \times \text{EqNumEnv}_{\text{Resfr}} + 0,36 \times \text{EqNumEnv}_A \quad (\text{Equação 07})$$

Os resultados obtidos (TABELA 24) foram classificados conforme a Tabela 2.2 de classificação do nível de eficiência de acordo com a pontuação obtida (INMETRO, 2012) e são mostrados na TABELA 25.

TABELA 24 – Valores de EqNumEnv para cada Unidade Habitacional

	1° PAV				7° PAV				13° PAV			
	AP 01	AP 02	AP03	AP04	AP 01	AP 02	AP03	AP04	AP01	AP02	AP03	AP04
0°	2,52	1,82	3,76	2,63	4,37	4,37	4,19	4,28	5,00	5,00	5,00	5,00
45°	2,52	1,67	3,67	2,37	4,28	4,28	4,11	4,02	4,82	5,00	4,91	4,74
90°	2,52	1,82	3,67	2,37	4,28	4,28	4,11	4,11	4,82	5,00	4,91	4,74

Fonte: Elaborado pelo autor

TABELA 25 – Classificação do nível de eficiência energética da envoltória

	1° PAV				7° PAV				13° PAV			
	AP 01	AP 02	AP03	AP04	AP 01	AP 02	AP03	AP04	AP01	AP02	AP03	AP04
0°	C	D	B	C	B	B	B	B	A	A	A	A
45°	C	D	B	D	B	B	B	B	A	A	A	A
90°	C	D	B	D	B	B	B	B	A	A	A	A

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os resultados da TABELA 25, a média ponderada obtida pela área de cada unidade das classificações atingidas fornece a classificação final do nível de eficiência energética da envoltória de toda a edificação multifamiliar, que foi B em todas as três orientações solares estudadas¹⁰.

¹⁰ Apesar da classificação do edifício que, portanto, constaria da sua etiqueta ENCE, observa-se na TAB. 28 a variabilidade das condições de desempenho, sendo os andares inferiores, a exemplo do 1° andar simulado, os mais prejudicados.

4.2.3. Resultados para o caso em estudo

4.2.3.1. Resultados da simulação em CFD

Os resultados das simulações no CFX® permitem avaliar o comportamento dos modelos teóricos de entorno de alta densidade propostos, as diferenças em função da altura das edificações constante ou variáveis, e a obtenção dos valores de C_p para as simulações termo-energéticas. O objetivo do início e do final do modelo urbano é introduzir uma rugosidade típica que visa gerar as condições no entorno do caso de estudo uma representatividade adequada da situação urbana desejada, portanto, não há sentido em se discutir o escoamento do ar nessas áreas. Serão mostradas apenas a região mais próxima do edifício de interesse. A entrada de ar nos planos horizontais é pelo lado superior da figura, e nos planos verticais pelo lado direito da figura.

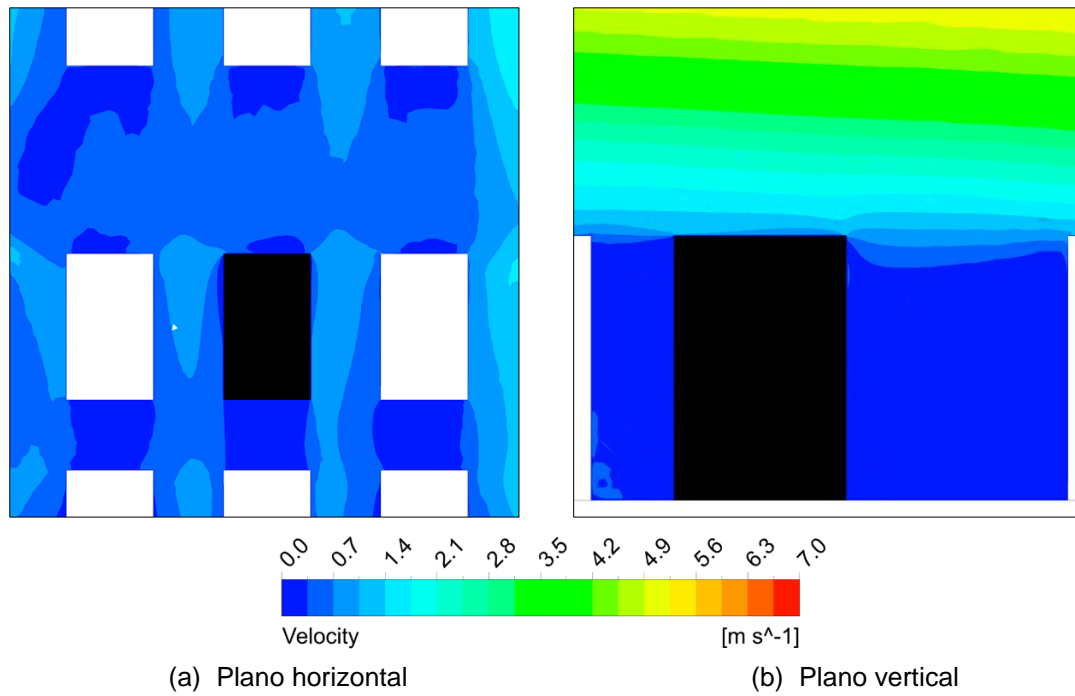
Os resultados analisados a seguir foram extraídos da seguinte forma: o plano horizontal de velocidades foi definido a uma altura de 34m, condizente com a altura do 13° pavimento; o plano vertical de velocidades foi colocado no meio do modelo passando pelo edifício de interesse; os mapas de C_p foram retirados das fachadas frontal, laterais direita e esquerda e cobertura; os perfis de velocidade de vento foram retirados em quatro pontos. Os valores de C_p são uma média dos valores calculados pelo CFX® nos pontos da malha que constam em cada uma das aberturas, ou seja, obteve-se um valor de C_p para cada abertura. As janelas 01 e 02 correspondem às janelas da fachada frontal, as janelas 03 a 10 da fachada lateral esquerda, as janelas 11 e 12 da fachada de fundos, e as janelas 13 a 20 da fachada lateral esquerda.

No modelo de entorno com alturas constantes e orientação de vento de 0°, no plano horizontal de velocidades de vento (FIG. 16a) é possível perceber uma maior velocidade nas laterais da edificação provocado por uma canalização gerada pela implantação ortogonal das edificações. Já no plano vertical de velocidades de vento (FIG. 16b) percebemos que essa variação de velocidades acontece principalmente na altura do plano horizontal, o 13° andar, pois em quase toda a altura da edificação a velocidade do vento é menor que 0,35m/s. Percebemos também uma elevação do perfil de velocidades para acima do nível da cobertura das edificações, devido ao tipo de implantação considerado no modelo e à pequena distância entre as edificações que não permitem que o escoamento de ar retorne para os níveis mais baixos.

No modelo de entorno com alturas variáveis e orientação de vento de 0°, no plano horizontal (FIG. 17a) percebemos um campo de velocidades mais heterogêneo com uma forte velocidade na fachada esquerda devido à irregularidade das alturas das edificações e ao não alinhamento das mesmas no modelo urbano teórico de entorno.

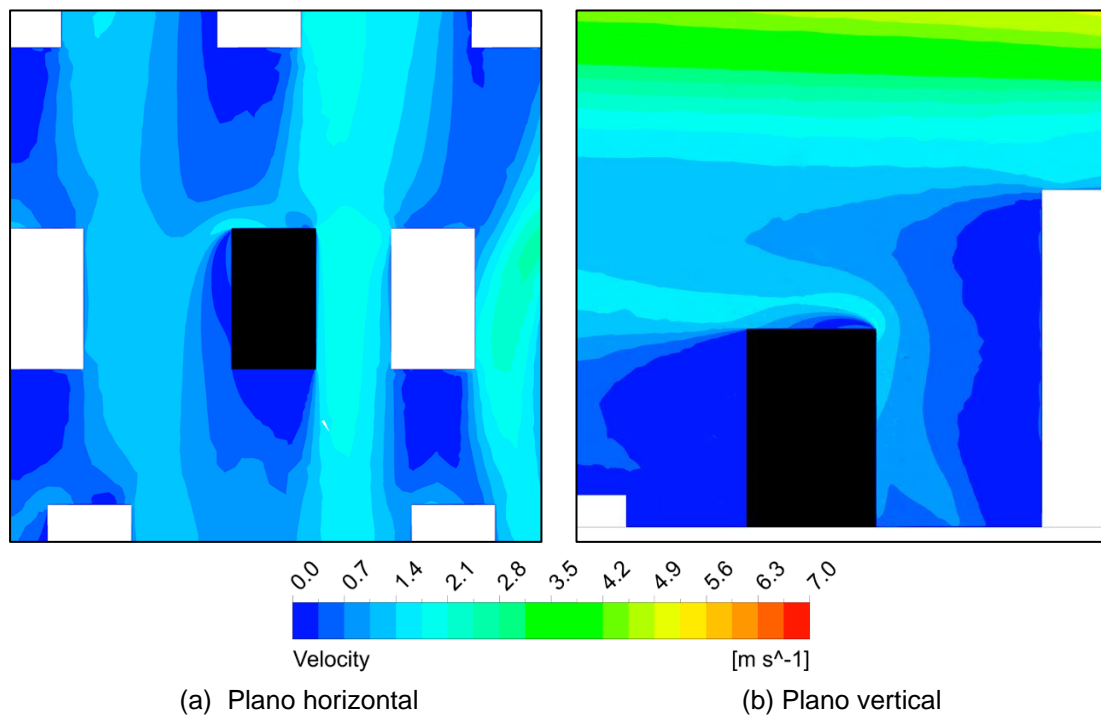
No perfil vertical de velocidades de vento (FIG. 17b) vemos que velocidades maiores conseguem atingir até os andares mais baixos da fachada frontal da edificação. Neste caso não ocorre de forma tão significativa a elevação do perfil vertical de velocidades de vento como vimos no modelo de altura constante.

FIGURA 16: Planos de velocidade de vento, modelo com altura constante, $\theta = 0^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

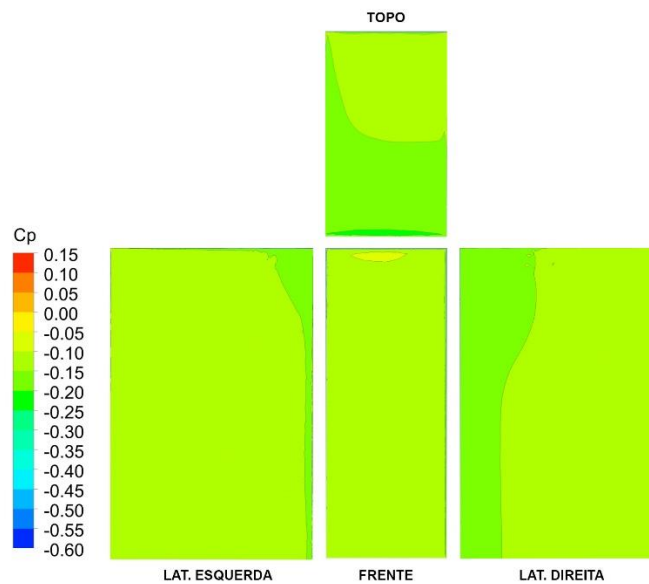
FIGURA 17: Planos de velocidade de ventos, modelo com altura variável, $\theta = 0^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

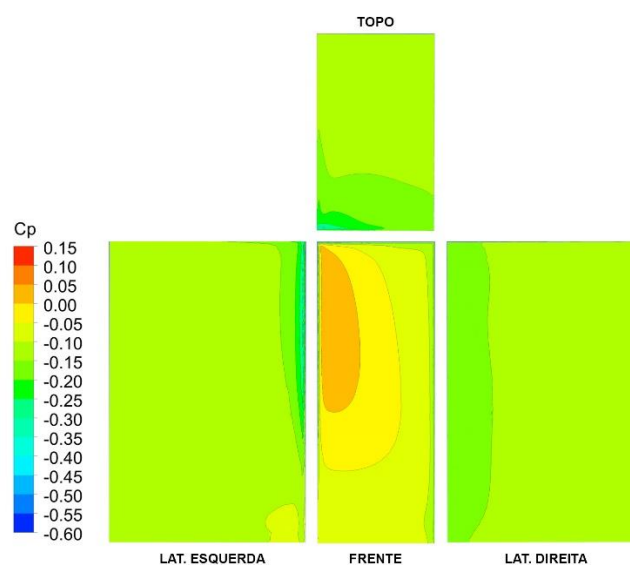
A distribuição dos C_p nas fachadas apresentados nas figuras 18 e 19 mostram o impacto que os dois arranjos espaciais diferentes do entorno edificado causam no escoamento e conseqüentemente nas pressões de vento exercidas sobre a edificação. No modelo com alturas constantes (FIG. 18) a distribuição das pressões é mais homogênea, apresentando pouca variação de valores de pressão nas diferentes fachadas, que são concentradas nas quinas do volume.

FIGURA 18: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 0^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

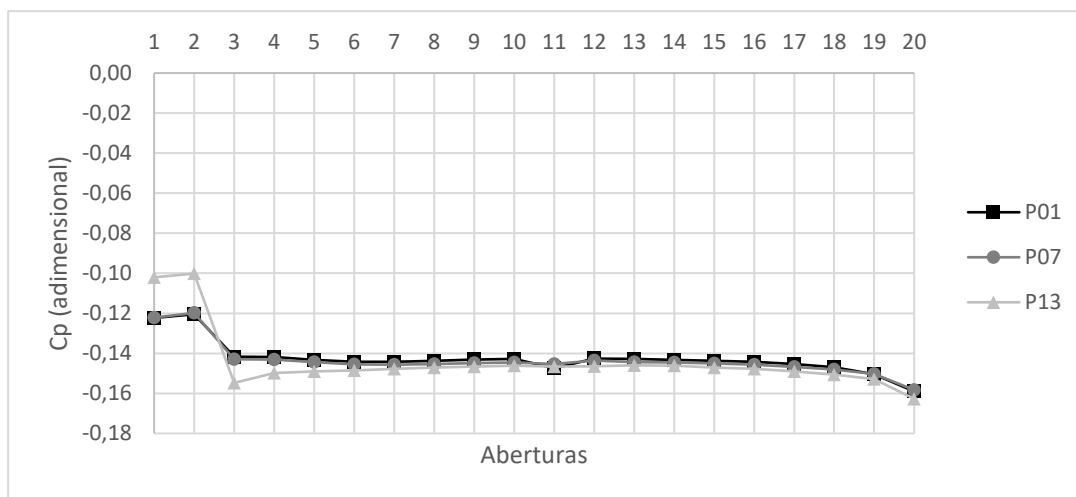
FIGURA 19: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 0^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

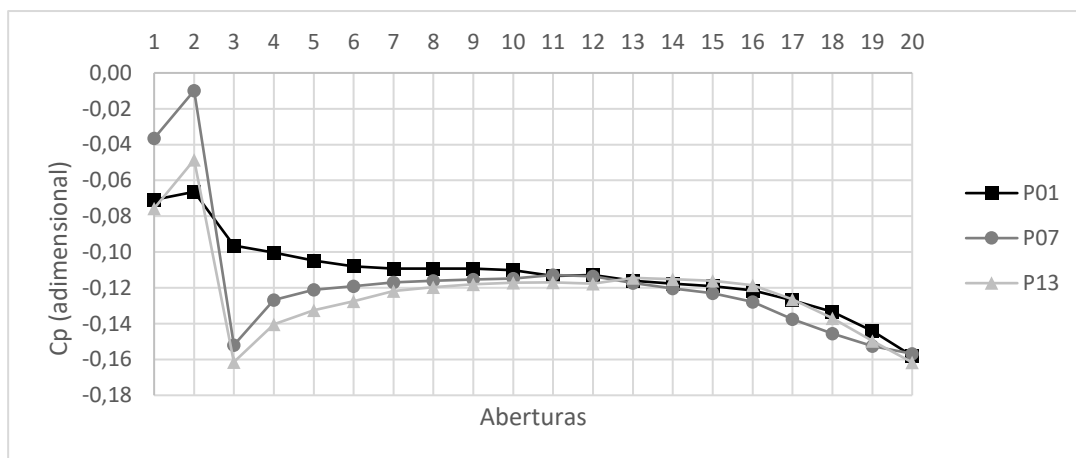
No modelo de alturas variáveis (FIG. 19) a distribuição das pressões é mais heterogênea, principalmente na fachada frontal, onde as pressões mais altas no canto superior esquerdo refletem o desvio no escoamento causado pelas duas edificações mais altas à sua frente.

GRÁFICO 12: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 0^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 13: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 0^\circ$

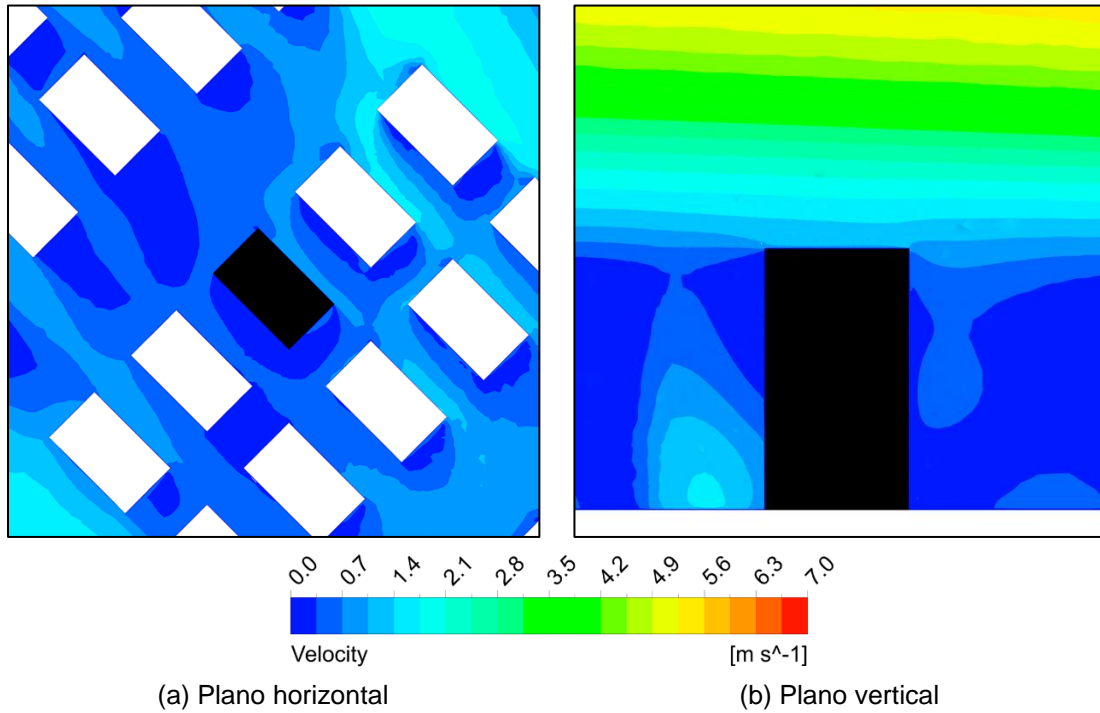


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos 12 e 13 mostram os valores médios de Cp em cada uma das aberturas de acordo com o pavimento em que estão. Os valores mostrados pelo gráfico de altura constante (GRAF. 12) reforçam a uniformidade da distribuição dos Cp ao longo das fachadas, com as linhas dos pavimentos se sobrepondo na maior parte das aberturas. É notável também a pouca diferença de pressão entre as aberturas de cada pavimento, com o ΔC_p máximo registrado de 0,0626. No gráfico de altura variável (GRAF. 13) é

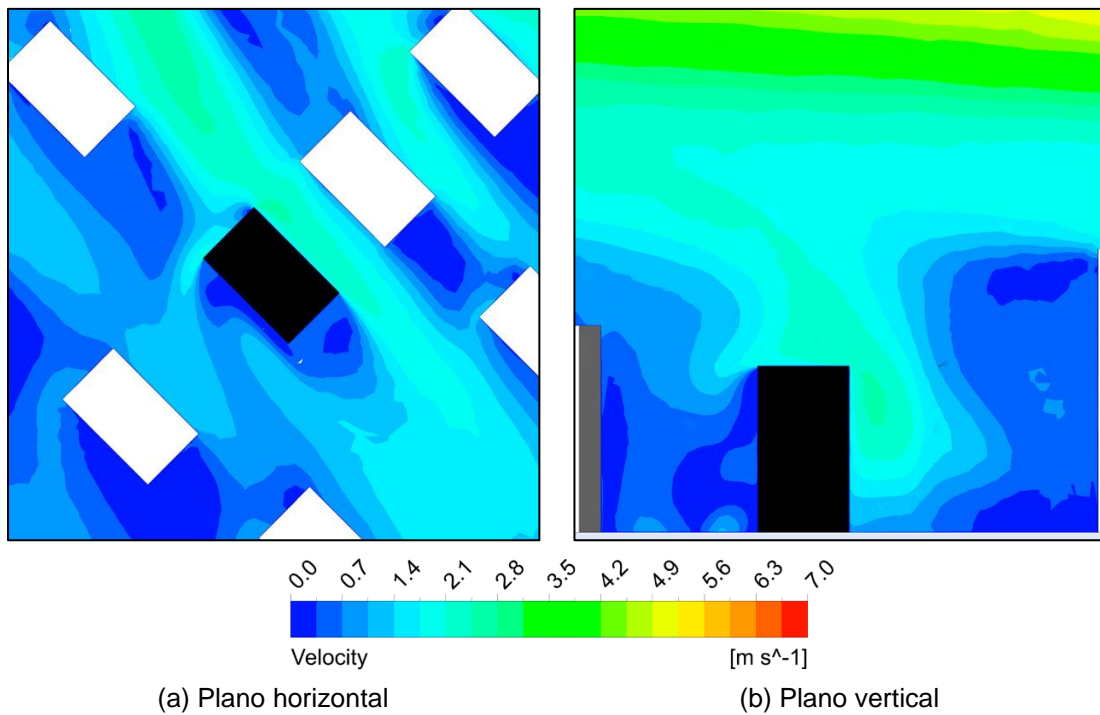
possível perceber uma certa a heterogeneidade dos valores de C_p registrados nas fachadas, assim como uma distribuição mais distinta entre os pavimentos, sendo o maior ΔC_p de 0,1469 na linha do 7° pavimento.

FIGURA 20: Planos de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 45^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA 21: Planos de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 45^\circ$



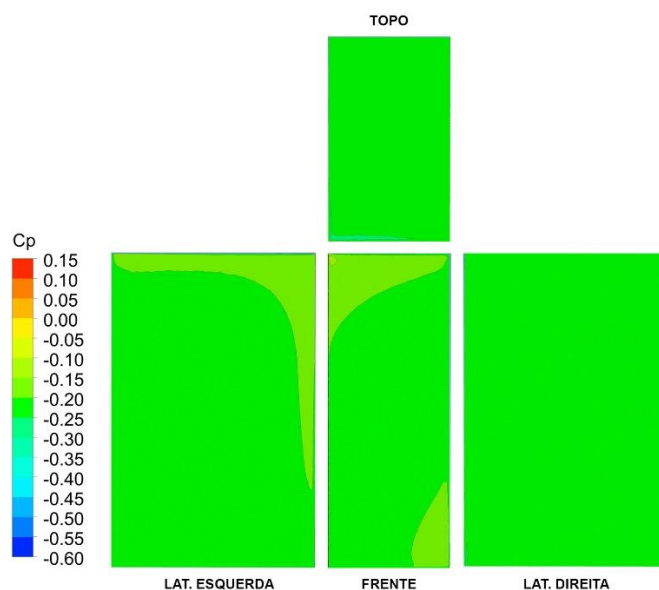
Fonte: Elaborado pelo autor

Na simulação do modelo de altura constante com a direção de vento a 45° , o perfil horizontal (FIG. 20a) apresenta uma permeabilidade ao vento um pouco maior que a observada naquela com $\theta = 0^\circ$. Há uma maior diferença entre os valores de velocidade entre as fachadas, principalmente na fachada lateral direita. O perfil vertical de velocidades (FIG. 20b) mostra que essa permeabilidade maior também acontece no sentido da altura da edificação, neste caso principalmente na fachada de fundos. Mas ainda assim, a elevação do perfil de velocidades de vento para o nível acima da cobertura das edificações acontece de forma mais pronunciada em comparação com o modelo de alturas variáveis.

O plano horizontal de velocidade do modelo com altura variável e direção de vento a 45° (FIG. 21a) mostra velocidades maiores que no modelo com direção de vento a 0° (FIG. 17a), principalmente nas fachadas frontal e lateral direita, devido a um espaço maior entre as edificações que estão à barlavento na altura do 13º pavimento. No perfil vertical de velocidades (FIG. 21b) é mostrado que em toda a altura da edificação as velocidades são maiores, e com uma melhor condição de ventilação na fachada de fundos em relação ao modelo de alturas variáveis e direção de vento a 0° (FIG. 17b).

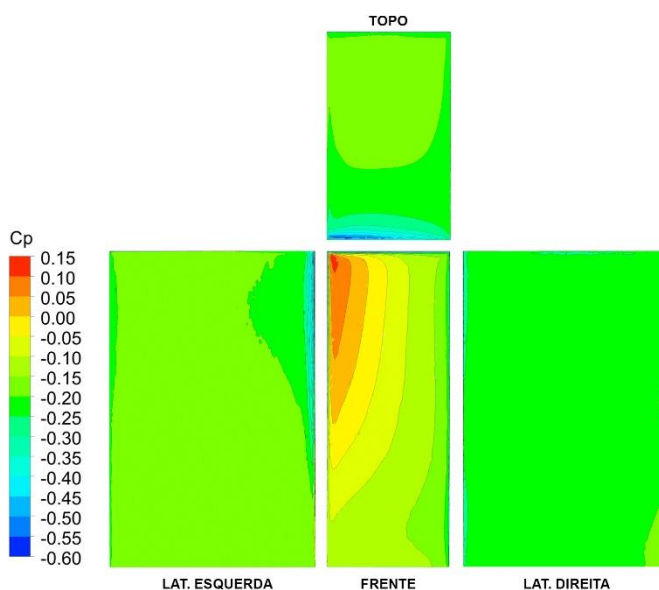
Conforme mostraram os perfis horizontal e vertical de velocidades do modelo de altura constante com vento a 45° (FIG. 20), há uma variação um pouco maior de velocidades ao redor da edificação de interesse comparado com o modelo com vento a 0° (FIG. 16), porém ainda assim há uma distribuição uniforme dos C_p nas fachadas, com apenas uma pequena variação no vértice entre a fachada frontal e a fachada lateral esquerda (FIG. 22). Já no modelo de alturas variáveis (FIG. 23) a fachada frontal apresenta coeficientes de pressão bem distintos ao longo de sua superfície, e as outras fachadas possuem uma distribuição bem uniforme, exceto nos vértices com a fachada frontal devido à baixa pressão causada pelo descolamento do escoamento típico em volumes com quinas vivas.

FIGURA 22: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 45^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA 23: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 45^\circ$

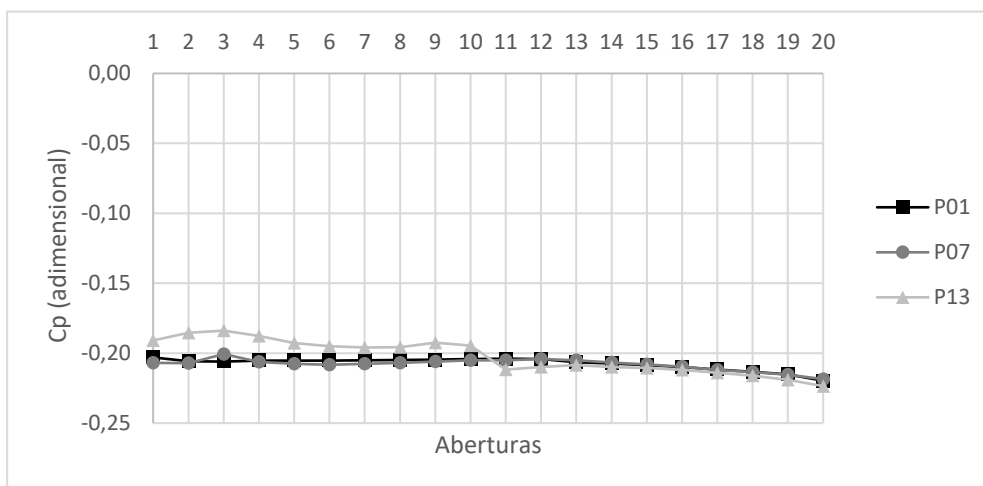


Fonte: Elaborado pelo autor

Nos gráficos 14 e 15 é bem nítida a diferença de comportamento dos Cp na fachada entre os modelos urbanos testados. No modelo com alturas constantes (GRAF. 14) os valores pouco variam, $\Delta C_p = 0,0396$, e as curvas dos diferentes pavimentos coincidem em toda extensão da fachada, exceto as janelas da fachada frontal e lateral esquerda do 13º pavimento que possuem valores um pouco mais altos.

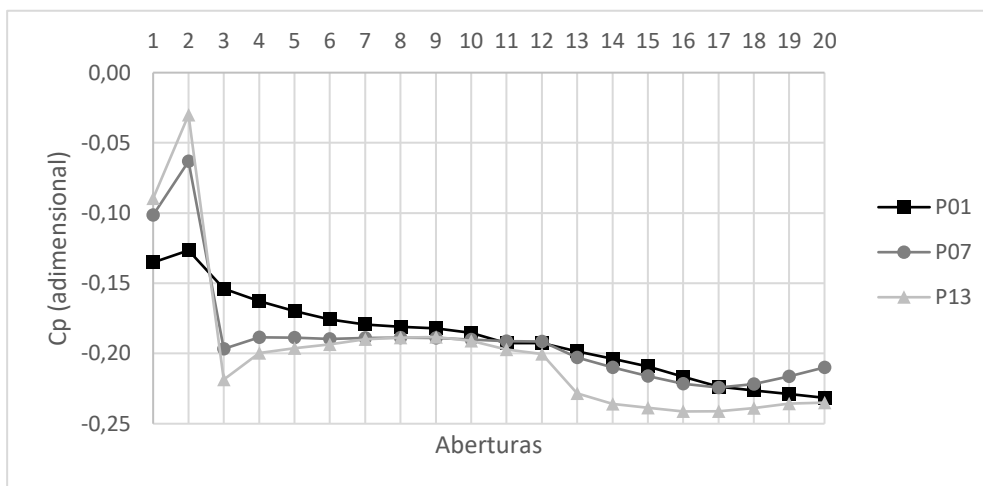
No modelo com alturas variáveis (GRAF. 15) todos os pavimentos apresentam boa diversidade de valores de C_p , sendo que o 7° e o 13° pavimento apresentaram comportamentos parecidos. O ΔC_p máximo observado foi de 0,2093.

GRÁFICO 14: C_p nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 45^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 15: C_p nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 45^\circ$

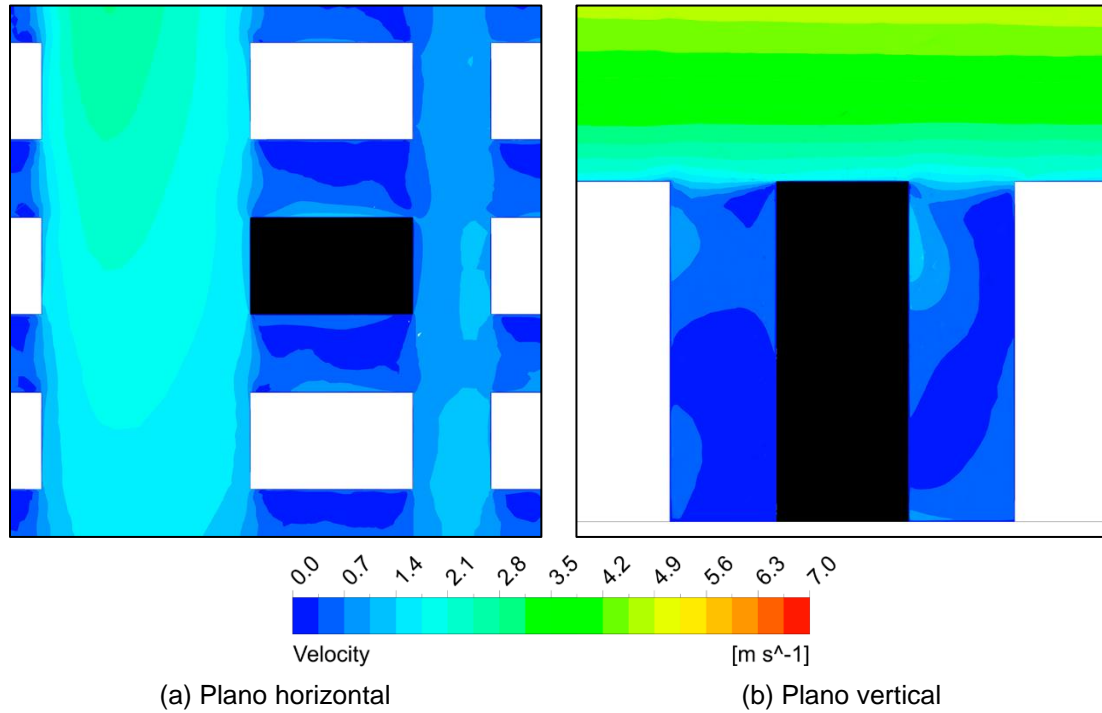


Fonte: Elaborado pelo autor

O plano horizontal do modelo com altura constante e direção de vento a 90° (FIG. 24a) mostra uma canalização do escoamento do ar nas ruas paralelas à direção de vento mais pronunciada que nos resultados do modelo com $\theta = 0$. Há também a canalização do vento entre os edifícios no meio das quadras, mas com velocidades mais baixas. O plano vertical (FIG. 24b) possui um comportamento similar ao do encontrado na simulação com direção de vento de 0° , com a elevação geral do perfil de velocidade

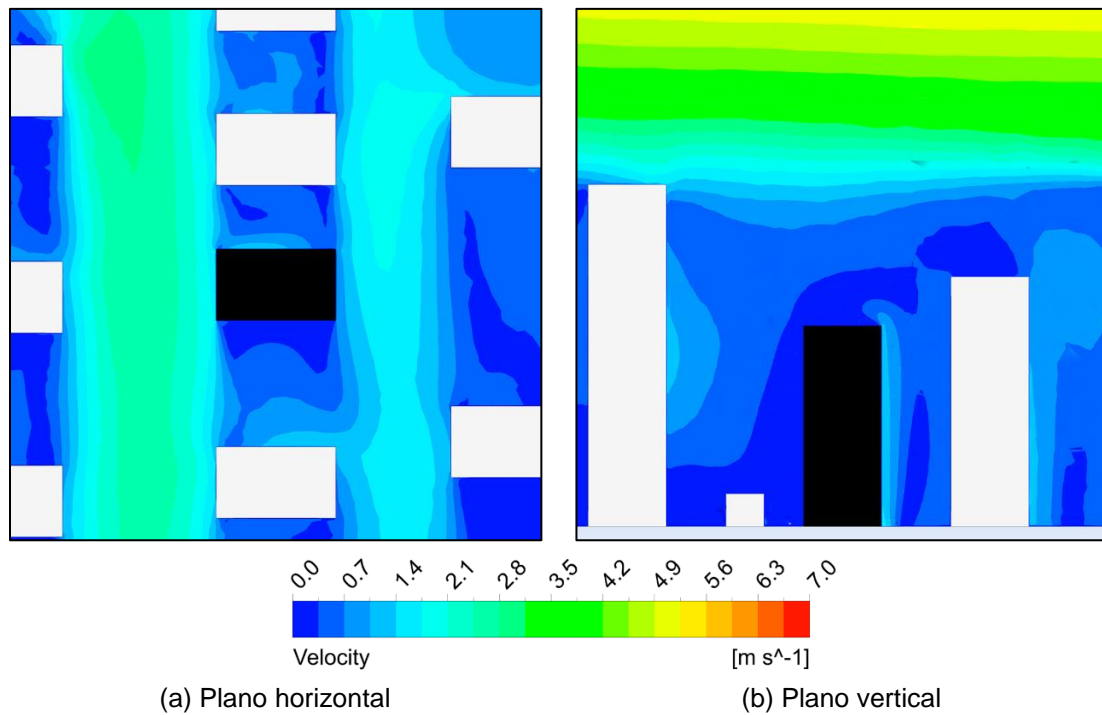
para o nível acima da linha da cobertura das edificações de forma mais marcada, apesar de apresentar uma variação um pouco maior de velocidades no sentido da altura da edificação.

FIGURA 24: Planos de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 90^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

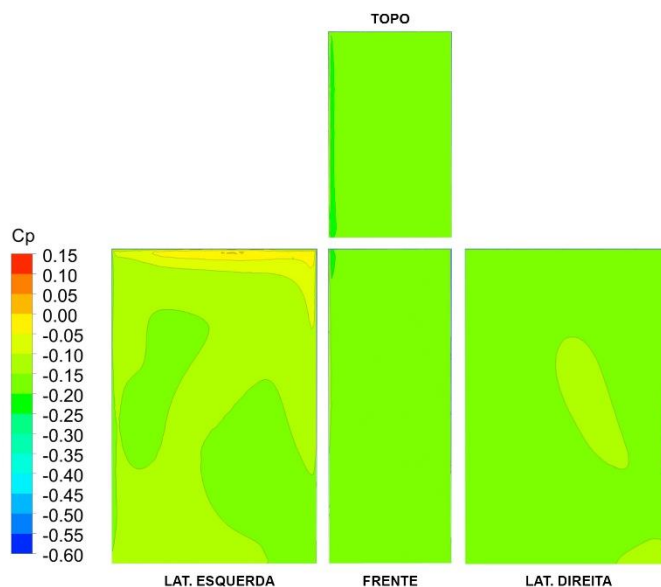
FIGURA 25: Planos de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 90^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

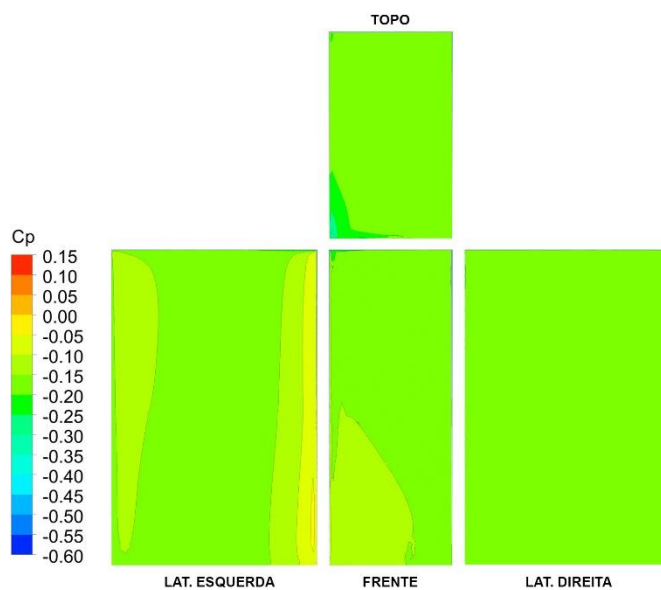
O comportamento do escoamento nos dois modelos de entorno mostrado pelos planos horizontal e vertical analisados acima evidencia os resultados mostrados nos mapas de C_p nas fachadas (FIG. 26 e FIG. 27). Se apresentam de forma similar, uniforme, à exceção da fachada lateral esquerda que apresenta uma pequena variação, com uma maior diversidade no modelo de alturas constantes, diferentemente do que foi sendo observado nos outros modelos.

FIGURA 26: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 90^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA 27: Mapa de C_p nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 90^\circ$

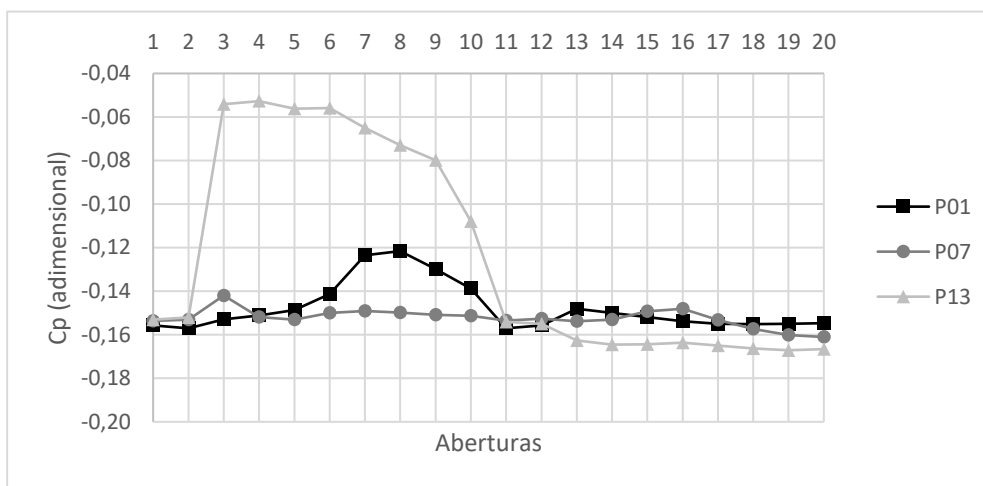


Fonte: Elaborado pelo autor

Esse comportamento próximo é perceptível também na análise dos valores de C_p das aberturas de cada pavimento (GRAF. 16 e GRAF. 17). Os dois modelos apresentaram

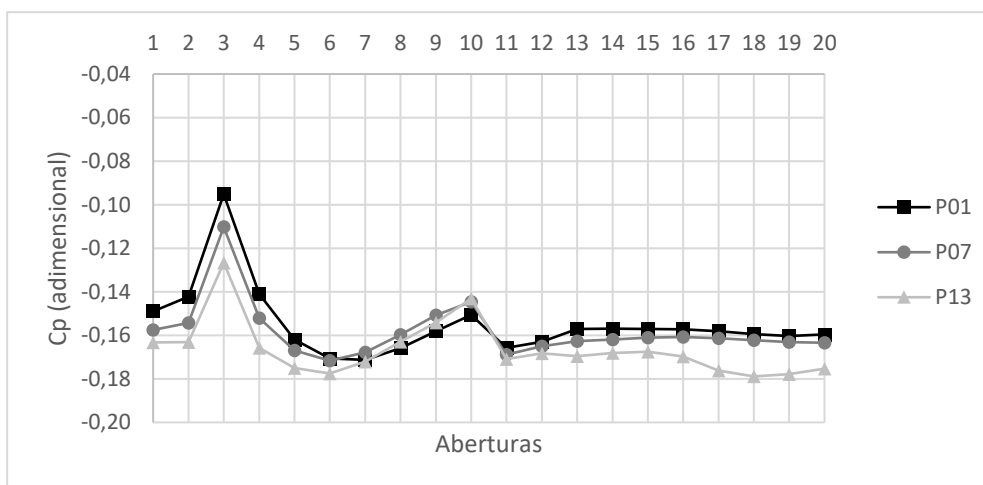
valores próximos entre si e entre os diferentes pavimentos. As diferenças e alterações nos valores estão justamente nas aberturas localizadas na fachada lateral esquerda como já fora percebido nos mapas de Cp nas fachadas.

GRÁFICO 16: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 90^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 17: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 90^\circ$



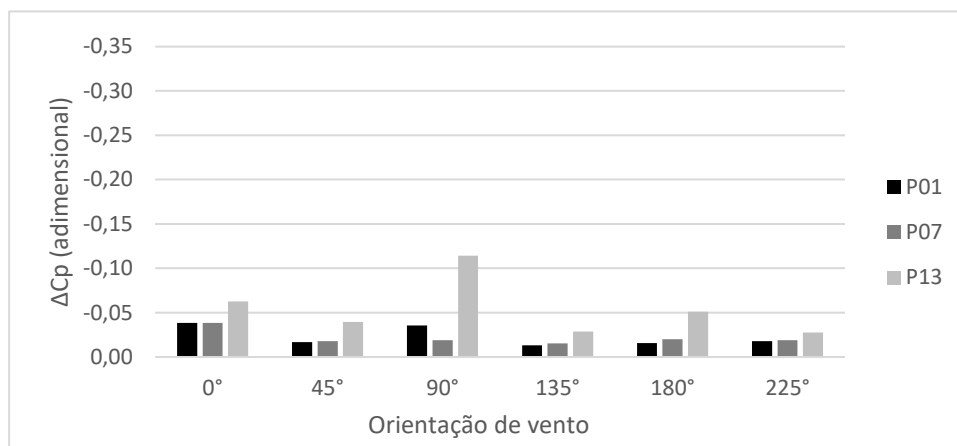
Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos para as simulações dos dois modelos de entorno para as orientações de 135° , 180° e 225° são similares àqueles das orientações de 0° , 45° e 90° , e por isso não são mostrados no corpo do texto para não comprometer sua fluidez, porém são considerados nas análises a seguir e na entrada de dados no modelo do *EnergyPlus*TM. Os resultados são apresentados no Apêndices A.2.

Os valores de Cp em cada uma das aberturas segundo os pavimentos, mostrados nos gráficos anteriores, indicam uma diferença marcante entre o comportamento dos dois modelos, com altura constante e com altura variável. No primeiro, os valores

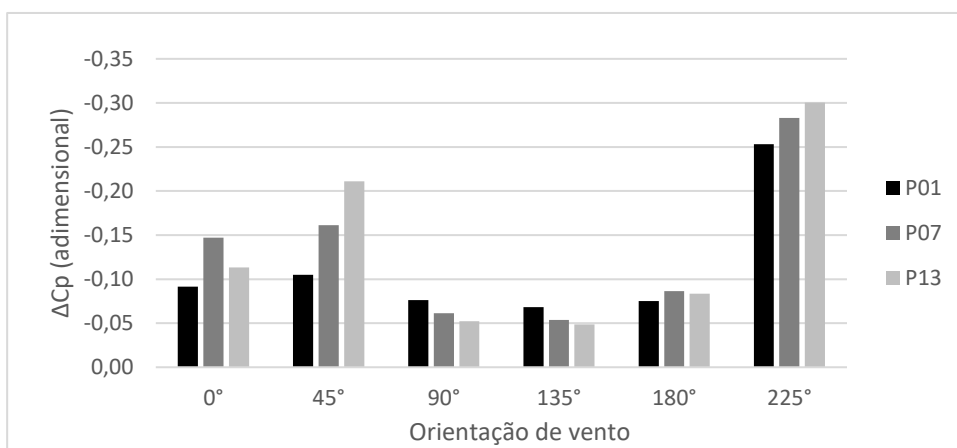
apresentam pouca variação, em relação à fachada em que se encontra, ao pavimento à qual pertence, e até mesmo à orientação do vento, resultando em curvas com um ΔC_p muito baixo conforme mostrado no gráfico 18. Esse comportamento, percebido também nos perfis verticais, se deve à tendência de elevação do perfil de velocidades de vento e à ocorrência do deslocamento do nível zero (d) do perfil para acima da altura da cobertura das edificações, com velocidades muito baixas abaixo dele.

GRÁFICO 18: ΔC_p de cada pavimento de acordo com a orientação de vento. Altura constante



Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 19: ΔC_p de cada pavimento de acordo com a orientação de vento. Altura variável



Fonte: Elaborado pelo autor

No modelo com altura variável é possível ver uma variação mais significativa entre os valores máximos e mínimos de C_p nas aberturas da edificação de interesse. Essa variação ocorre em relação à fachada em que a abertura está, em relação ao pavimento ao qual pertence a abertura e também conforme a orientação do modelo ao vento (GRAF. 19). A maior permeabilidade aos ventos causada pela irregularidade na altura das edificações permite uma maior penetração do escoamento ao longo do modelo,

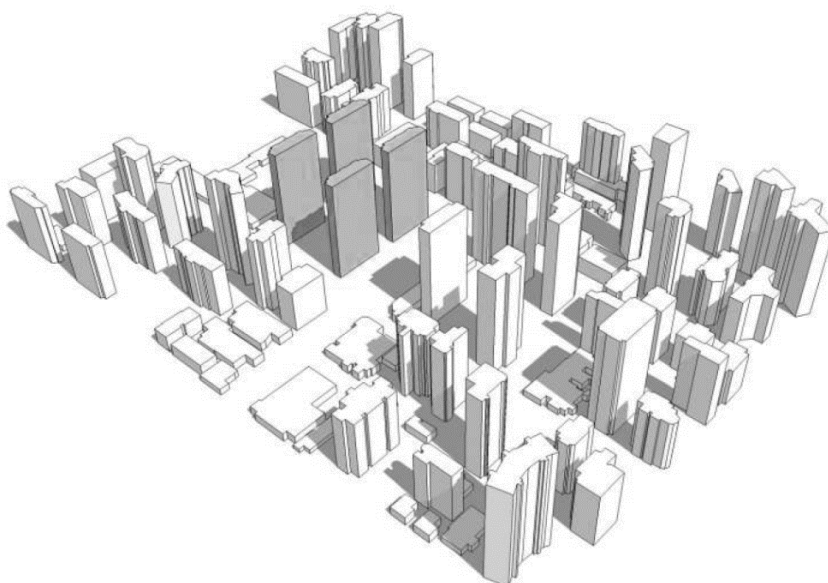
causando maiores pressões e efeitos aerodinâmicos no volume do edifício de interesse, resultando na maior variação de valores ao longo de sua superfície.

4.2.3.2. Comparação dos resultados da simulação em CFD com a literatura.

Nessa seção do trabalho, os resultados das simulações em CFD serão comparados com resultados de trabalhos similares que apresentam resultados de escoamento de vento em ambientes urbanos brasileiros reais encontrados na literatura. Essa comparação não serve como forma de validação do modelo urbano teórico proposto ou das simulações conduzidas, apenas como forma de uma análise comparativa entre os resultados obtidos com o modelo teórico e os resultados obtidos com a análise de meios urbanos reais de cidades brasileiras. Outra ressalva é grande dependência dos resultados à morfologia urbana e, especialmente, do entorno imediato à edificações analisadas.

Na literatura levantada, a pesquisa de Leite (2015) foi a única encontrada que apresentou resultados de C_p para experimentos em túnel de vento e/ou simulações em CFD de conformações de entorno similar ao desenvolvido neste trabalho. O autor realizou simulações de CFD para quatro cenários distintos de ocupação do solo e verticalização na cidade de Fortaleza, CE, sendo o cenário 2 (FIG. 28) aquele que mais se assemelha ao modelo de alta densidade proposto. Os ventos considerados na simulação foram o vento leste e sudeste e o azimute da fachada principal tem um ângulo de aproximadamente 105° com o Norte.

FIGURA 28: Cenário 2 simulado por Leite (2015).

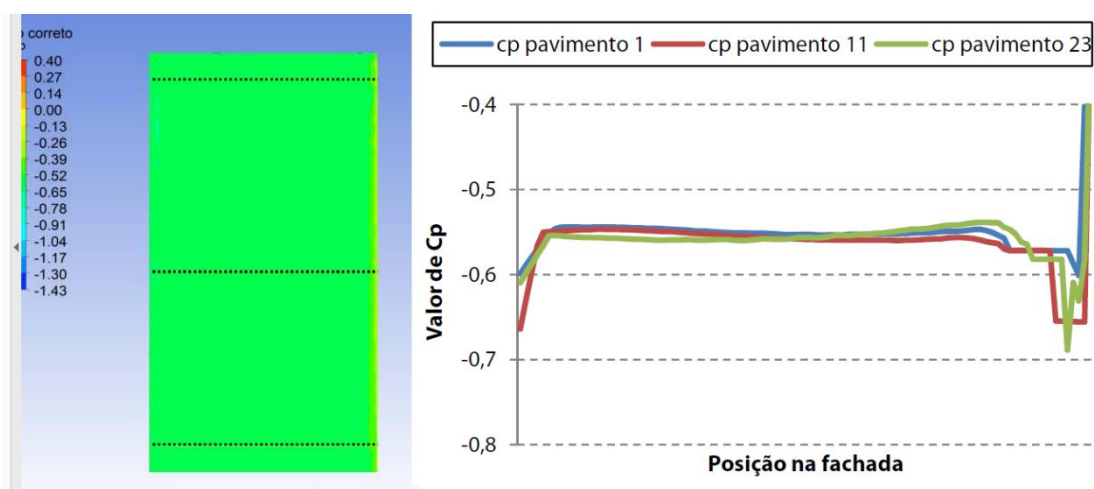


Fonte: Extraído de LEITE, 2015. (FIG. 54, pág. 118)

Em suas simulações, Leite (2015) obteve os valores de C_p na fachada frontal em uma linha no centro das aberturas do primeiro, do décimo primeiro e do vigésimo terceiro pavimentos. Dos resultados apresentados por Leite (2015), serão analisados os resultados do primeiro e do décimo primeiro pavimentos, uma vez que o edifício de interesse do presente estudo possui apenas treze pavimentos. Eles serão comparados com os resultados de C_p na fachada frontal no eixo das aberturas do primeiro e do décimo terceiro pavimentos dos dois modelos de entorno, com altura constante e com altura variável. Como não há orientações de vento coincidentes entre os trabalhos, serão considerados os resultados de 0° e 45° , que estão deslocados 15° no sentido horário em relação às direções de vento simulado por Leite (2015).

Os resultados de C_p para a simulação com o vento leste (FIG. 29) mostra uma baixa variação de valores na fachada principal, com ΔC_p de aproximadamente 0,50 no 1º pavimento e de 0,10 no 11º pavimento em quase toda a extensão da fachada, exceto na extremidade direita, onde há uma elevação da pressão. Conforme análise do autor, essa uniformidade apresentada é devida à presença de uma edificação de mesma altura na quadra à frente do edifício-modelo estudado por Leite (2015).

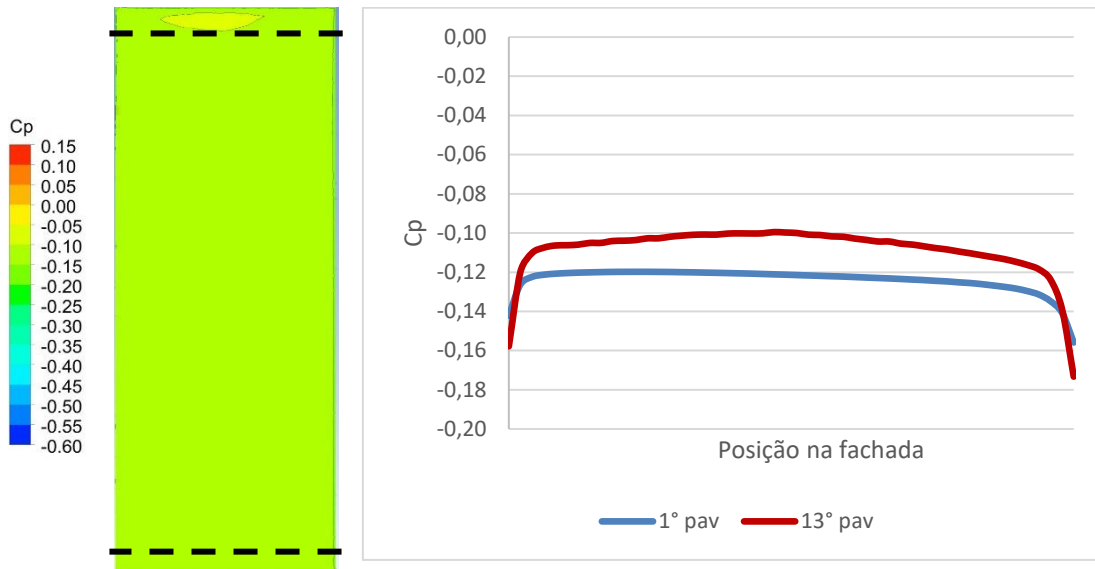
FIGURA 29: Variação de C_p ao longo da fachada frontal, vento leste. Leite (2015).



Fonte: Extraído de LEITE, 2015. (FIG. 111, pág. 178)

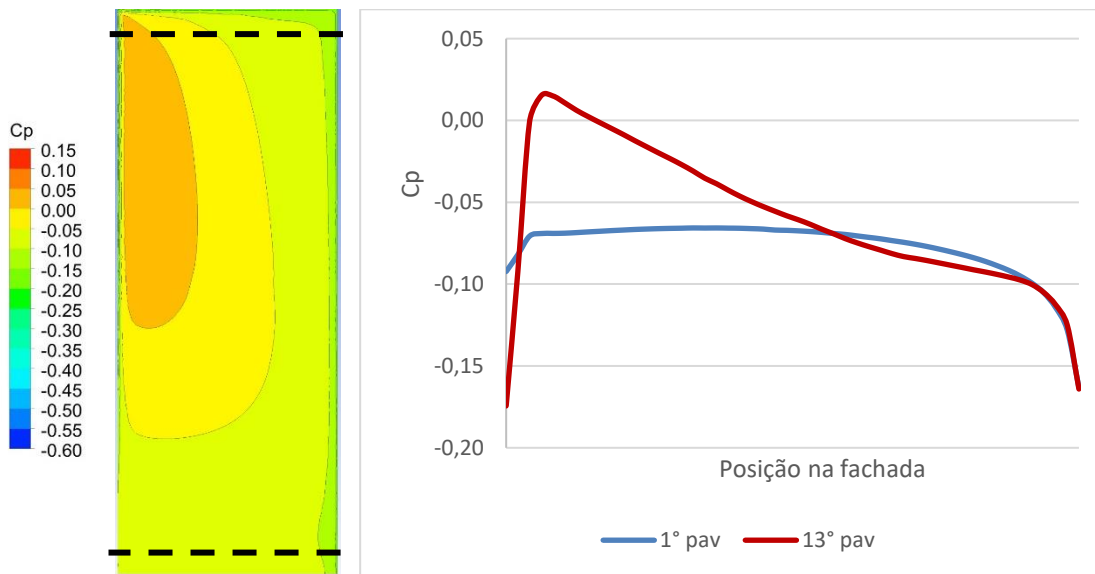
Os valores de C_p na fachada frontal no modelo de altura constante e direção de vento de 0° (FIG. 30) também apresentam baixa variação, concentrada nas laterais da fachada onde há uma queda da pressão exercida pelo vento devido ao descolamento do escoamento. O ΔC_p é de 0,04 no 1º pavimento e de 0,07 no 13º pavimento, valor próximo ao calculado em Leite (2015), apesar de apresentar valores de pressão mais altos. O comportamento na maior parte do perfil ao longo da fachada também se mostrou muito próximo, exceto na lateral direita em que há uma discordância acentuada.

FIGURA 30: Variação de C_p ao longo da fachada frontal, altura constante, $\theta = 0^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA 31: Variação de C_p ao longo da fachada frontal, altura variável, $\theta = 0^\circ$



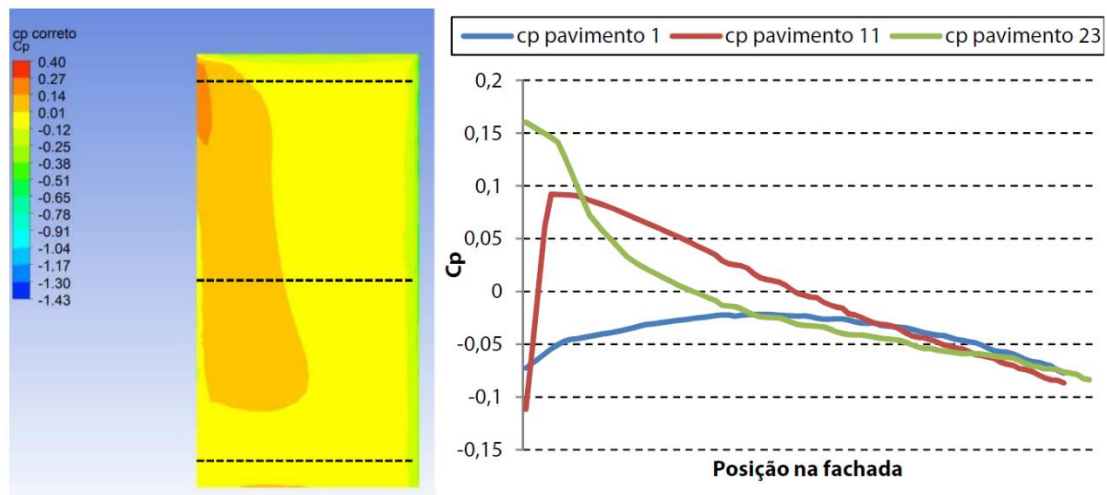
Fonte: Elaborado pelo autor

O perfil de C_p do modelo de altura constante com direção de vento a 0° (FIG. 31) mostra uma variação mais significativa, principalmente na altura do 13° pavimento. O comportamento do perfil do primeiro pavimento é similar ao registrado por Leite (2015), entretanto o comportamento do perfil no décimo terceiro pavimento difere, ao apresentar uma região de maior pressão na lateral esquerda do meio até o topo da fachada. As diferenças entre os valores máximo e mínimo de C_p no perfil é de 0,07 no 1° pavimento e de 0,18 no 13° pavimento.

Nas simulações para o vento sudeste do modelo de Leite (2015, FIG. 32) é possível perceber valores mais altos C_p , assim como uma maior variação na distribuição ao

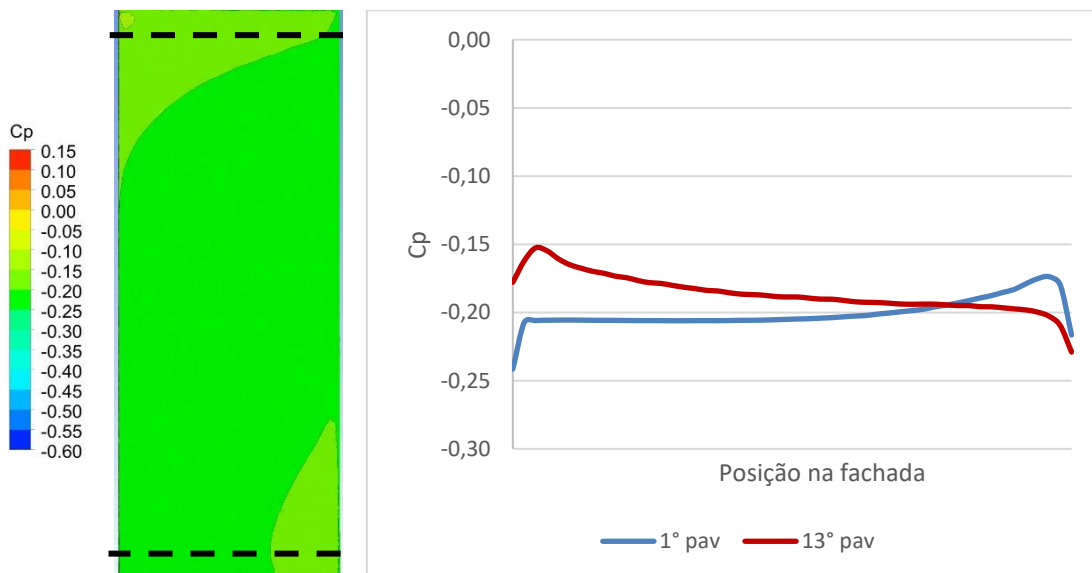
longo da fachada. O 1º pavimento apresenta um comportamento mais estável, assim como o do modelo com a direção de vento leste. No 13º pavimento há uma região de maiores pressões na lateral esquerda da fachada que percorre quase toda sua altura e se intensifica nos andares mais altos. O ΔC_p no 1º pavimento é de aproximadamente 0,06 e no 13º pavimento é de 0,20.

FIGURA 32: Variação de C_p ao longo da fachada frontal, vento sudeste. Leite (2015).



Fonte: Extraído de LEITE, 2015. (FIG. 117, pág. 181)

FIGURA 33: Variação de C_p ao longo da fachada frontal, altura constante, $\theta = 45^\circ$

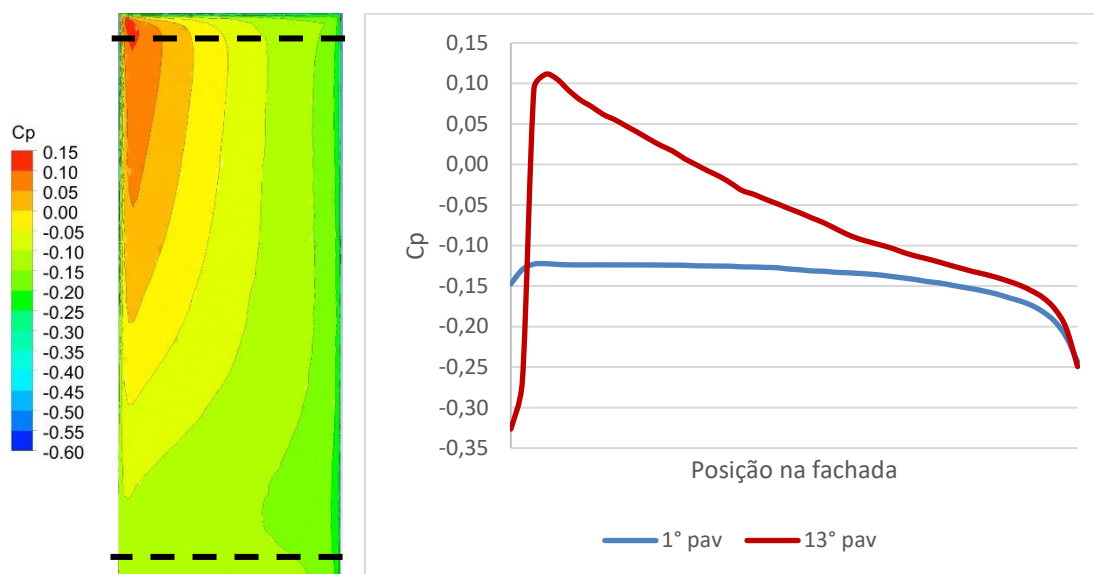


Fonte: Elaborado pelo autor

No modelo de entorno com altura constante e orientação de vento a 45° (FIG. 33) a distribuição dos C_p é mais uniforme com pouca variação. O 1º pavimento apresenta um leve aumento na pressão na lateral direita, pressões mais baixas na porção central da fachada, e uma redução ainda maior na lateral esquerda. O perfil do primeiro pavimento diverge do perfil apresentado por Leite (2015), que possui valores maiores de pressão

no centro da fachada reduzindo simetricamente para as laterais. No 13° também há um aumento na pressão, mas na lateral esquerda da fachada e a pressão vai reduzindo lentamente em direção à lateral direita e cai abruptamente no limite da fachada. Apesar de apresentar um caminho similar, a amplitude dos valores do perfil do 11° pavimento do estudo de Leite (2015) é bem maior, com um ΔC_p de aproximadamente 0,20 contra um ΔC_p de 0,08 deste modelo. Outra diferença importante entre os modelos foram os valores de C_p : no presente trabalho eles se mantiveram negativos em toda a fachada e com valores abaixo do valor mínimo registrado no modelo de Leite (2015).

FIGURA 34: Variação de C_p ao longo da fachada frontal, altura variável, $\theta = 45^\circ$



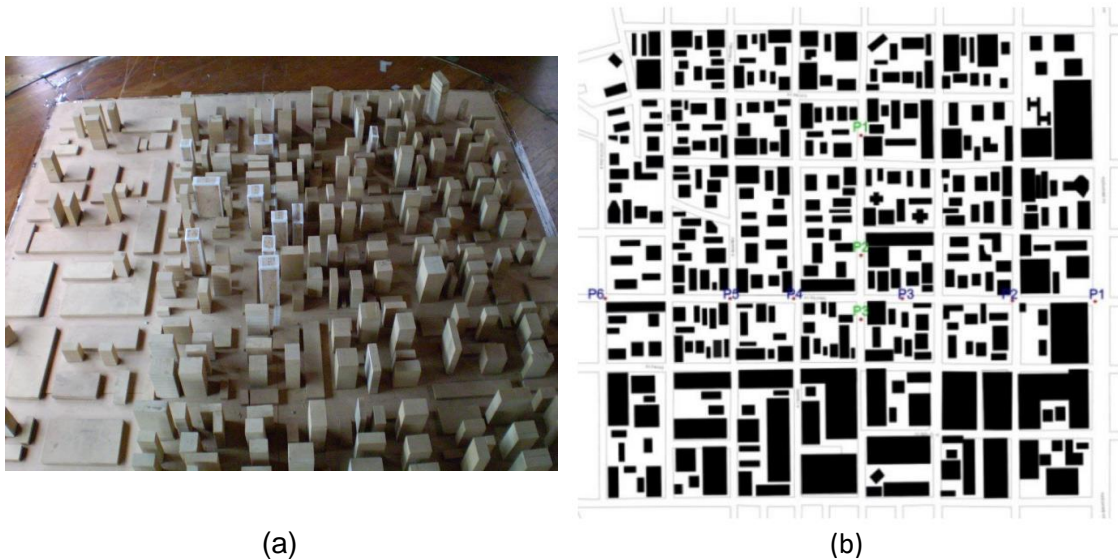
Fonte: Elaborado pelo autor

No modelo de entorno com altura variável e $\theta = 45^\circ$ (FIG. 34) o perfil do 1° pavimento apresenta uma variação maior que os registrados nos outros modelos, com um ΔC_p de 0,12 e um comportamento mais estável na lateral esquerda até o centro da fachada, e depois com uma curva mais acentuada na lateral direita com a queda da pressão. Os valores desse perfil também ficaram abaixo dos valores apresentados pelo estudo de Leite (2015). O perfil do 13° pavimento apresenta um comportamento bastante parecido com modelo de Leite (2015) apesar de apresentar um ΔC_p bem maior, de 0,44.

Na literatura pesquisada também foram encontrados resultados de experimentos em túnel de vento e de simulação em CFD apresentados na forma de perfis verticais de velocidade de vento em pontos do modelo, passíveis de comparação com o estudo desenvolvido neste trabalho. O relatório de Pós-doutoramento da pesquisadora Dra. Alessandra Rodrigues Prata-Shimomura (PRATA-SHIMOMURA, 2008) apresenta medições feitas em ensaio de uma área do bairro de Moema no túnel de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Moema é um bairro

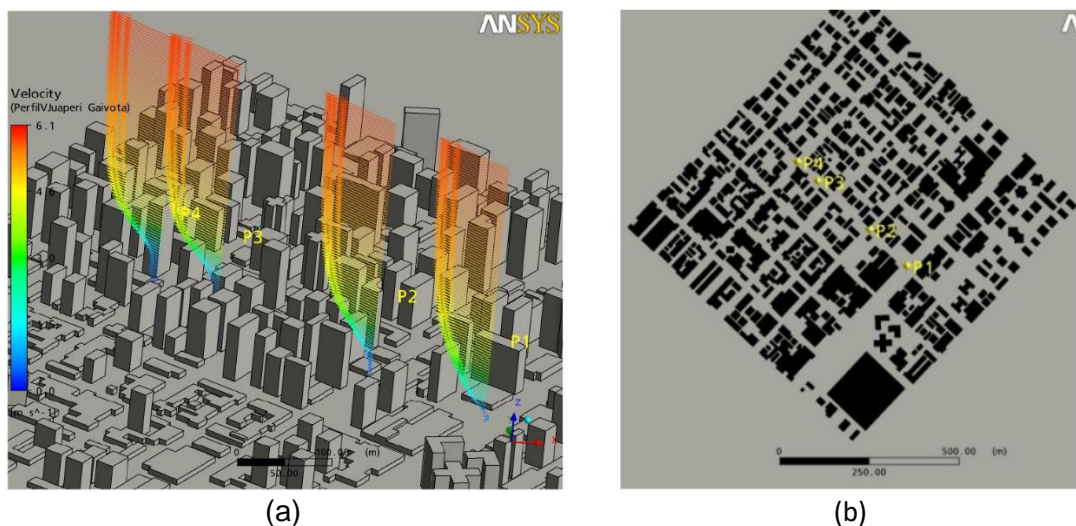
bastante verticalizado e denso conforme mostrado na foto do modelo ensaiado (FIG. 35a). Foram definidos seis pontos ao longo do modelo (FIG. 35b) numerados da direita para a esquerda, e a orientação de vento é a sudeste, paralela ao eixo dos pontos medidos. Na sua tese de doutorado, Brandão (2009) desenvolveu simulações em CFD para a mesma área (FIG. 36a) e compara os perfis verticais de vento em quatro pontos com os resultados obtidos por Prata-Shimomura (2008) (FIG. 36b).

FIGURA 35: Maquete e planta da área de Moema ensaiada em túnel de vento.



Fonte: (a) Prata-Shimomura, 2008 *apud* Prata-Shimomura *et al.*, 2011
(b) Prata-Shimomura, 2008 *apud* Brandão, 2009

FIGURA 36: Modelo no CFD com os perfis verticais e planta da área de Moema modelada.

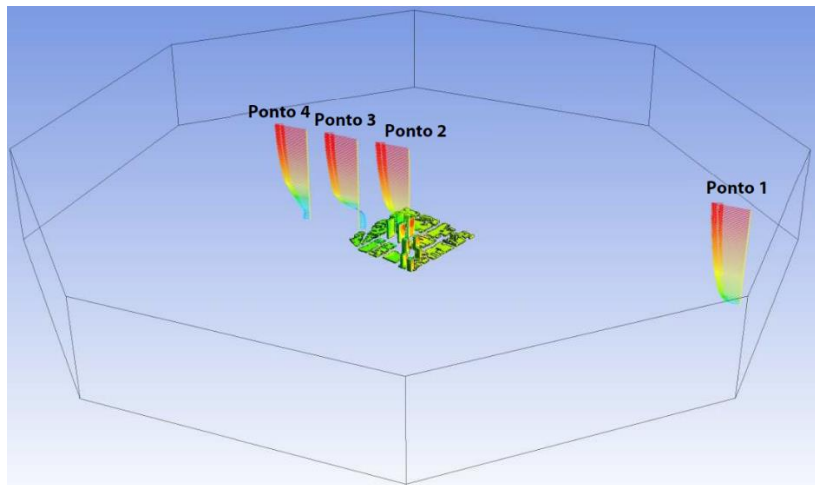


Fonte: Extraído de Brandão (2009)

Leite (2015) também apresentou perfis verticais de vento em quatro pontos do modelo de sua área de estudo na cidade de Fortaleza simulado em CFD. Foram definidos 6

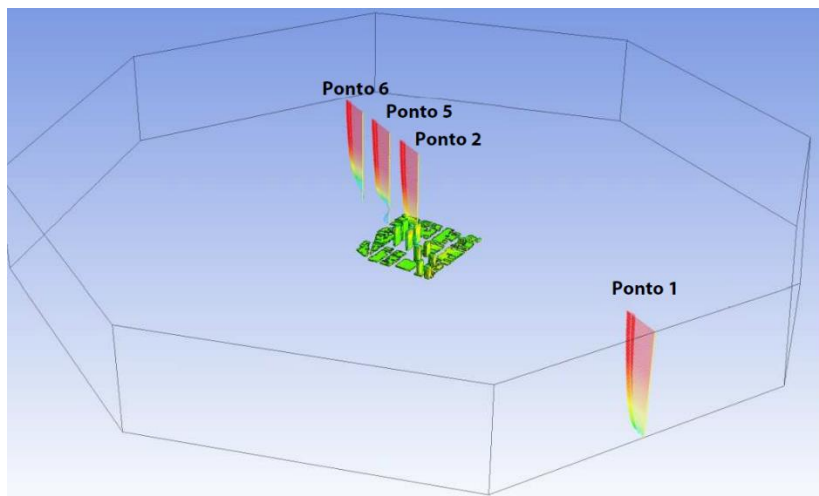
pontos, quatro para a simulação do vento leste (FIG. 37), dos quais dois foram mantidos e mais dois acrescentados para a simulação do vento sudeste (FIG. 38).

FIGURA 37: Localização dos perfis verticais na simulação de Fortaleza. Vento Leste.



Fonte: Extraído de Leite (2015)

FIGURA 38: Localização dos perfis verticais na simulação de Fortaleza. Vento Sudeste.

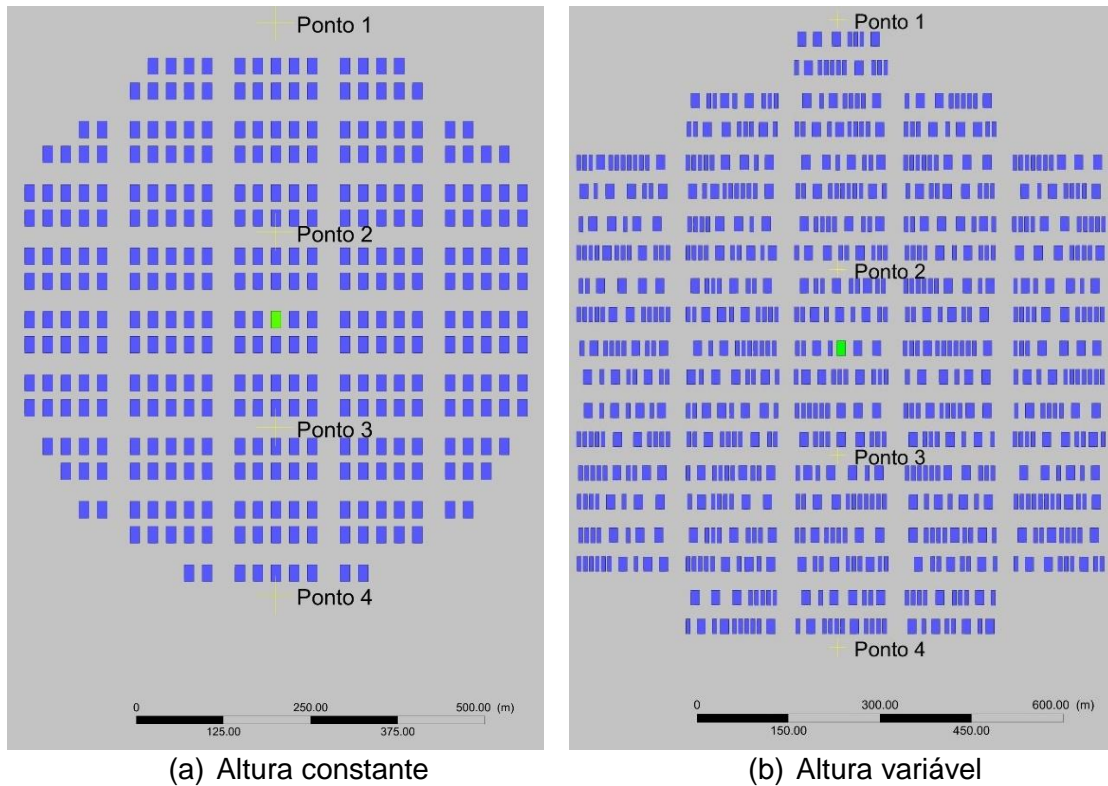


Fonte: Extraído de Leite (2015)

Para comparação com os resultados dos trabalhos listados acima foram definidos quatro pontos de onde foram gerados perfis verticais de velocidade nos modelos de altura constante (FIG. 39a) e de altura variável (FIG. 39b). Em todas as seis orientações de vento simuladas foram mantidas a lógica da localização dos pontos, todos no eixo central do modelo, o primeiro pouco à frente do modelo à barlavento, dois pontos no interior do modelo, um anterior e outro posterior ao edifício de referência, e o quarto logo após as últimas edificações à sotavento do modelo (FIG. 40). Os resultados serão apresentados e comparados a cada ponto, e as velocidades serão apresentadas como

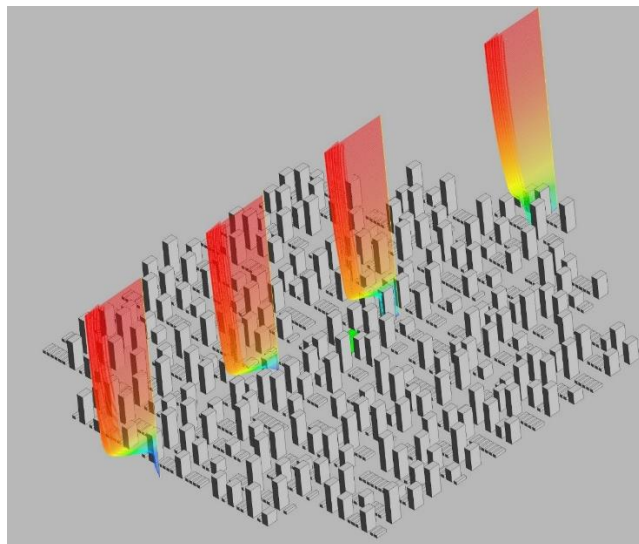
uma razão entre a velocidade no ponto (Z) e a velocidade máxima no perfil ($V_z/V_{m\acute{a}x}$), exceto nos resultados de Leite (2012) em que são apresentadas as velocidades reais.

FIGURA 39: Pontos dos perfis de velocidade nas simulações com $\theta = 0^\circ$.



Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA 40: Perfis de velocidade, modelo com alturas variáveis, orientação de vento de 0°

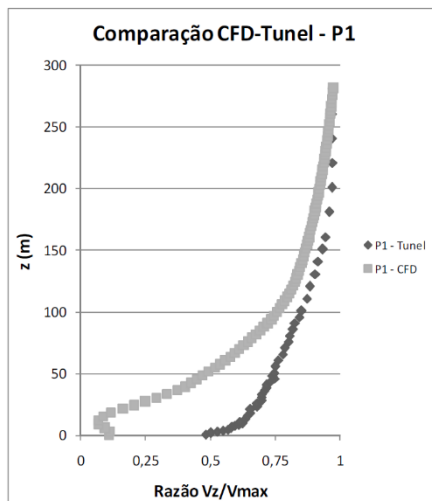


Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 41 são apresentados os resultados da medição e da simulação em CFD para Moema conduzidos por Prata-Shimomura (2008) e Brandão (2009), respectivamente. No modelo de Brandão (2009) há uma linha de quadra a mais a barlavento do que no

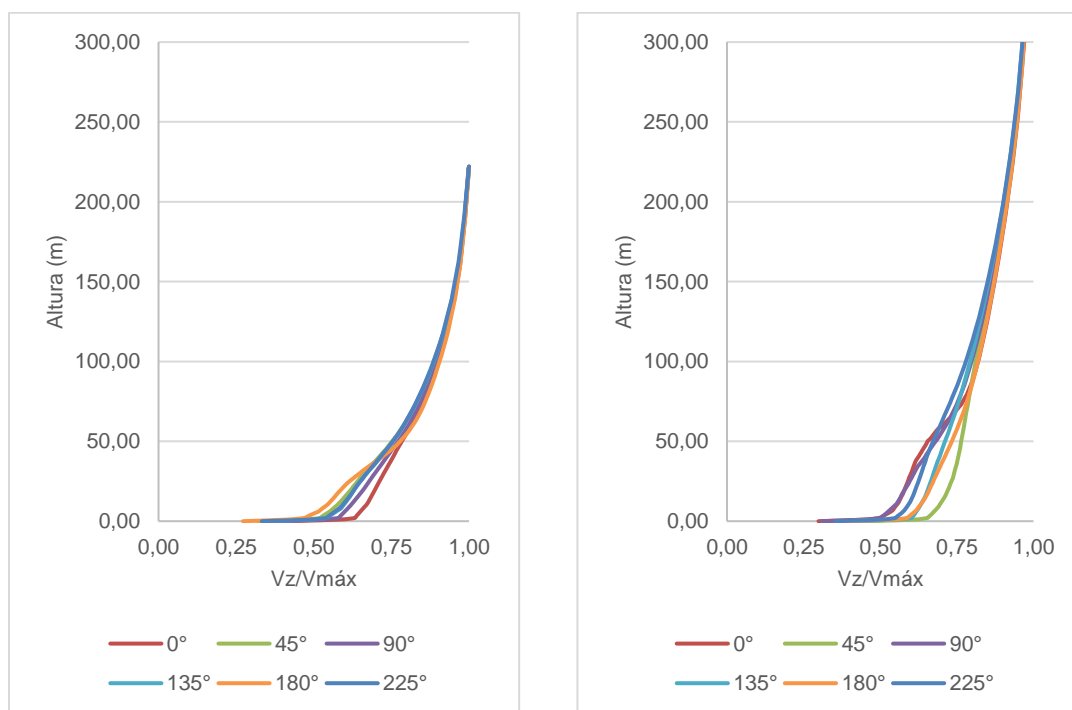
modelo de Prata-Shimomura (2008), fazendo com que o perfil vertical P1 apresente alterações devido ao impacto dessas edificações em relação ao perfil vertical P1 medido por Prata-Shimomura (2008) que está localizado imediatamente antes das edificações e, portanto, apresenta um perfil mais próximo de um escoamento não perturbado.

FIGURA 41: Comparação dos resultados de CFD e medição para o P1, Moema.



Fonte: Extraído de Brandão (2009)

GRÁFICO 20: Perfis de velocidades para o P1, caso de estudo.



(a) Altura Constante

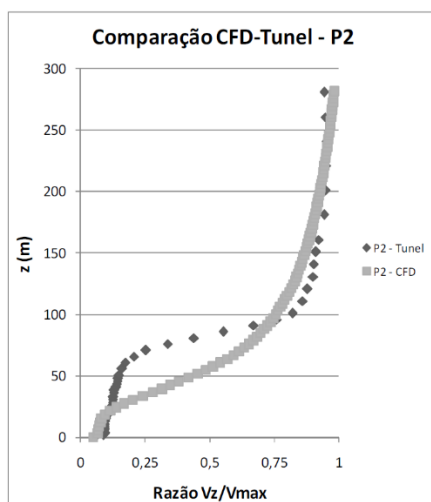
(b) Altura Variável

Fonte: Elaborado pelo autor

No gráfico 23 os perfis se mostram pouco alterados devido ao fato do Ponto 1 estar localizado antes da primeira fileira de edificações, mas ele já mostra uma ligeira

desaceleração do vento. Os resultados comparados com o mostrado na FIG. 41 mostra mais semelhança com os resultados medidos no ensaio de túnel de vento como previsto, uma vez que os dados calculados pelo CFD se dão em um ponto já dentro da malha urbana. Neste caso não foi comparado o resultado apresentado por Leite (2015) pois não há um perfil em um ponto similar ao Ponto 1 deste trabalho.

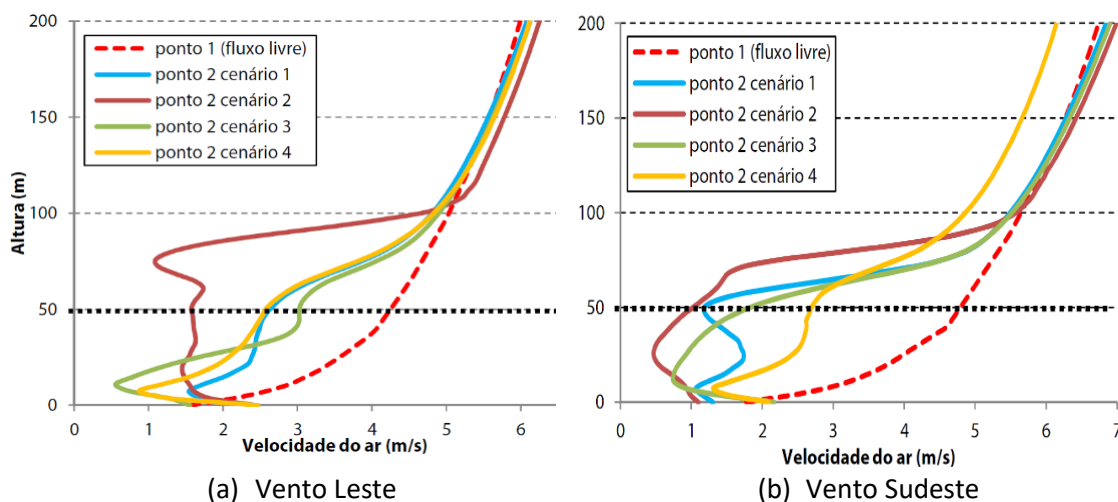
FIGURA 42: Comparação dos resultados de CFD e medição para o P2, Moema.



Fonte: Extraído de Brandão (2009)

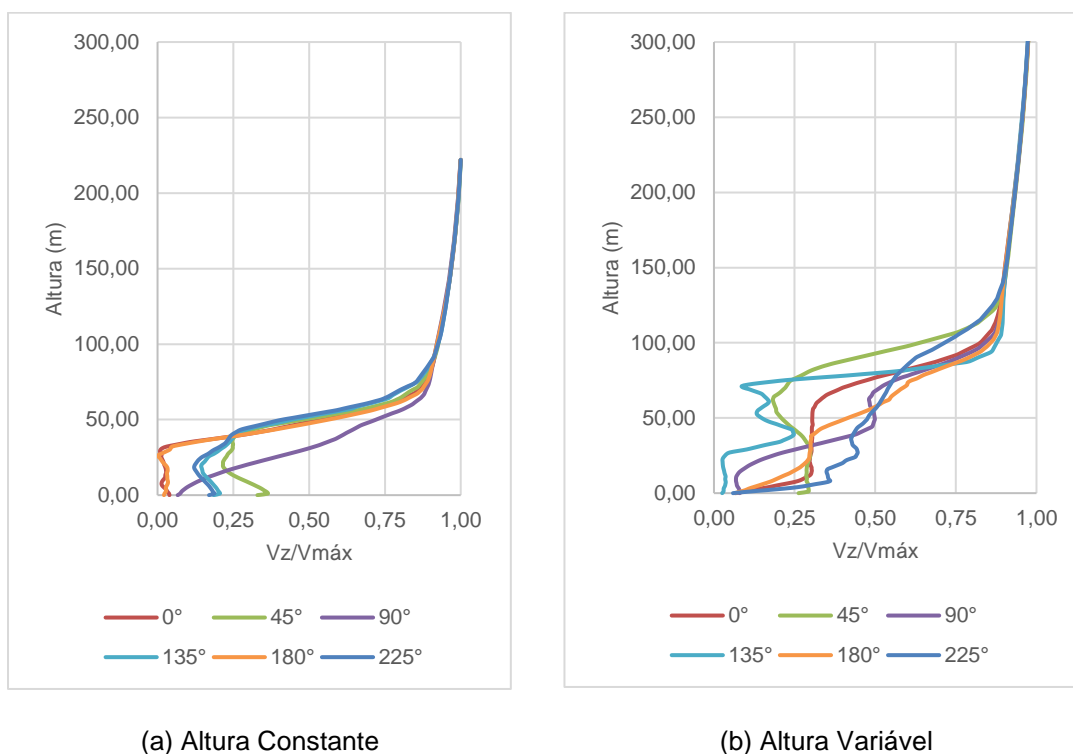
Na comparação entre o resultado do ponto 2 da medição e da simulação para Moema (FIG. 49) os dados medidos mostram uma diminuição acentuada da velocidade no nível das edificações e uma quebra do perfil pouco acima da faixa dos 50m de altura. Os dados simulados também apresentam a redução na velocidade mas surpreendem ao apresentar uma quebra a uma altura de aproximadamente 20m.

FIGURA 43: Resultados de CFD para o P2, Fortaleza.



Fonte: Extraído de Leite (2015).

GRÁFICO 21: Perfis de velocidades para o P2, caso de estudo.



(a) Altura Constante

(b) Altura Variável

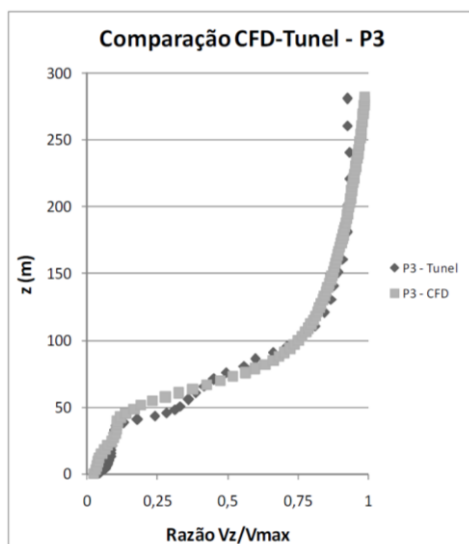
Fonte: Elaborado pelo autor

Nos resultados para o Ponto 2 do cenário 2 apresentado por Leite (2015) (FIG. 43), tanto o perfil do vento leste como o do vento sudeste apresentam a quebra após os 50m de altura, sendo que no primeiro a quebra acontece em uma altura maior, se aproximando dos 100m. Em relação às velocidades, no perfil do vento leste elas são ligeiramente maiores que o do vento sudeste, com valores superiores a 1,5m/s e inferiores a 1m/s, respectivamente.

Nos perfis de velocidade do modelo de altura constante (GRAF. 21a) a quebra acontece na altura dos 40m, devido à elevação geral do perfil ao topo das edificações com altura de 37m, como já discutido anteriormente com os planos verticais de velocidade. É possível perceber também que os modelos com orientação ortogonal à direção de vento, 0° e 180°, tiveram suas velocidades reduzidas mais rapidamente do que as dos modelos com orientação oblíqua à direção de vento, 45°, 135° e 225°. O resultado do modelo de 90° apresentou um perfil menos alterado que os demais, pois o meio do modelo neste caso coincide com uma rua, afetando menos o escoamento. Esses resultados divergem dos exemplos encontrados na literatura devido ao fato de apresentarem a quebra abaixo da altura dos 50m, entretanto as velocidades se aproximam dos valores medidos por Prata-Shimomura (2008).

No resultado do modelo de altura variável (GRAF. 21b) os perfis apresentam a quebra acima da altura de 50m e $V_z/V_{m\acute{a}x}$ mais concentrado na faixa de 0,2 a 0,4, acima do modelo de altura constante que concentrou os valores abaixo de 0,2. Esses resultados apresentam concordância com os exemplos da literatura na altura da quebra do perfil, e principalmente àqueles apresentados por Leite (2015) aos quais possui também similaridade no comportamento dos perfis e na velocidade registrada.

FIGURA 44: Comparação dos resultados de CFD e medição para o P3, Moema.



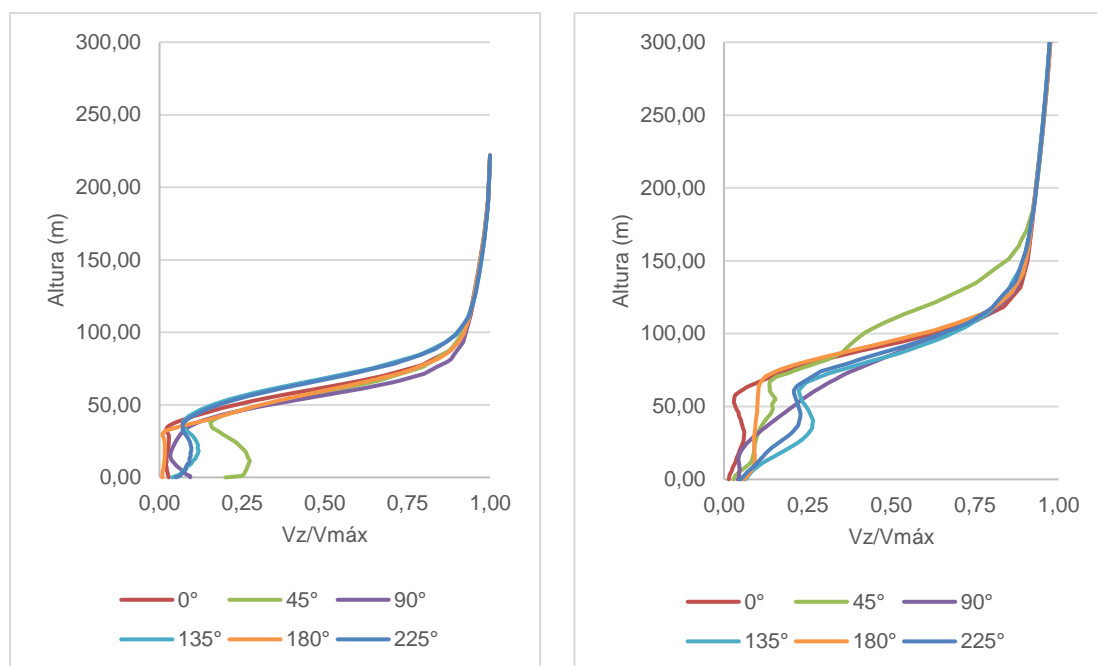
Fonte: Extraído de Brandão (2009)

O resultado do ponto P3 em Moema (FIG. 44) apresenta uma boa sobreposição dos valores entre a medição no túnel de vento e a simulação no CFD. Em relação ao ponto P2 a quebra aconteceu em um ponto mais baixo que a anterior, neste caso pouco abaixo dos 50m de altura, e razão das velocidades na faixa próxima ao solo se reduzem a mais próximo de zero.

No ponto P3 do modelo de altura constante (GRAF. 22a) a quebra se mantém na mesma altura que no ponto P2, aos 40m e os perfis dos ventos oblíquos ao modelo têm suas velocidades equiparadas aos dos ventos ortogonais. A exceção é o perfil do vento a 45° que se mantém com a mesma velocidade que no P2. Os perfis desse modelo apresentam o trecho antes da quebra de forma muito perpendicular ao solo, indicando pouca aceleração do escoamento com a altura dentro da camada dossel do modelo, ou seja, até o nível da cobertura das edificações onde ocorre a quebra. Nos resultados de Moema é possível ver um aumento gradual da velocidade do vento mesmo antes de acontecer a quebra. Outra diferença observada é o ponto em que perfil recupera a curva da camada limite atmosférica, que no perfil da medição em túnel de vento acontece a

uma altura de 115 metros e $V_z/V_{m\acute{a}x}$ igual a 0,80. No modelo de altura constante (FIG. 22^a) isso ocorre a uma altura de 85 metros e $V_z/V_{m\acute{a}x}$ de 0,87.

GRÁFICO 22: Perfis de velocidades para o P3, caso de estudo.



(a) Altura Constante

(b) Altura Variável

Fonte: Elaborado pelo autor

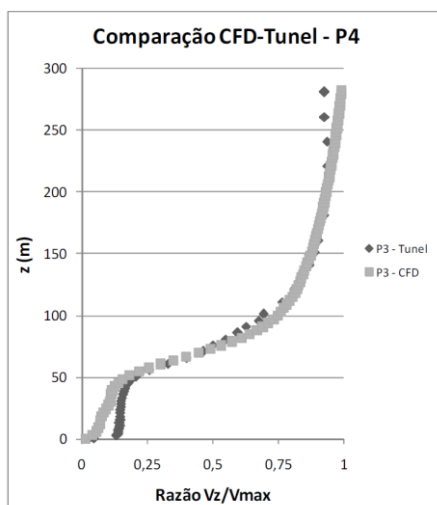
No modelo de altura variável (GRAF. 22b) a quebra acontece logo acima dos 50m, mais baixo que no P2, e possui um comportamento similar aos resultados de Moema no trecho abaixo da quebra, com as velocidades crescendo gradativamente com o aumento da altura, exceto a curva da orientação a 0°, que se apresenta mais perpendicular. Outra similaridade com os resultados de Moema é o momento em que o perfil recupera a curva da camada limite atmosférica, neste caso próximo à altura de 120m e com $V_z/V_{m\acute{a}x}$ de 0,85.

Os perfis do ponto P4 de Moema (FIG. 45) apresentam um comportamento muito próximo ao do ponto P3, entretanto o perfil da medição em túnel de vento já evidencia um aumento da velocidade na camada dossel urbana, indicando o início da recuperação do escoamento após o término das edificações.

Os resultados do ponto P4 para Fortaleza (FIG. 46), neste caso os pontos nomeados como P3 e P5 pelo autor equivale em localização ao ponto P4 dos outros trabalhos analisados, se assemelham mais aos resultados dos pontos P3 para Moema e para o modelo com altura variável do caso de estudo. Ele não apresenta sinais de recuperação do escoamento, a quebra acontece acima dos 50 metros e o ponto em que os perfis

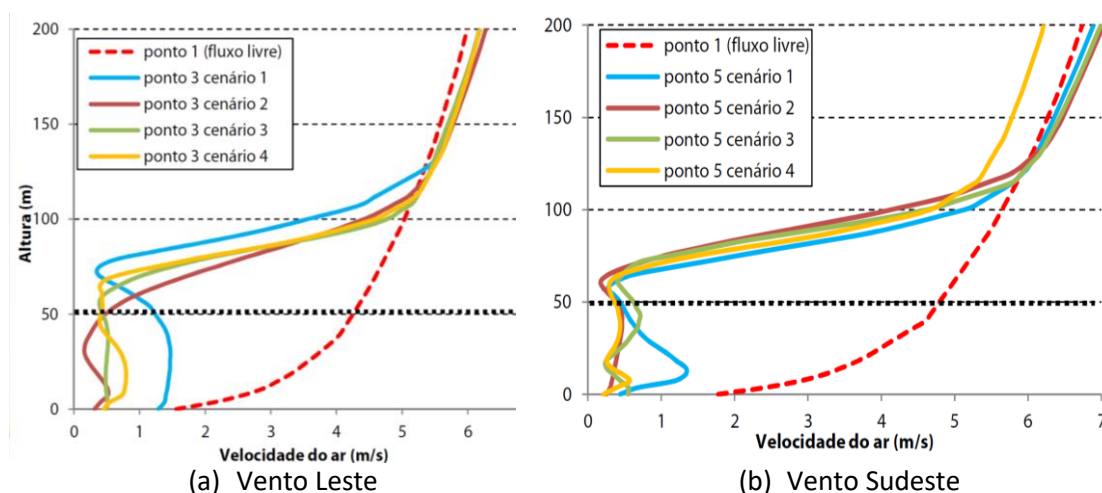
retornam ao perfil da camada limite atmosférica acontece próximo aos 120 metros e a um $V_z/V_{m\acute{a}x}$ de 0,85.

FIGURA 45: Comparação dos resultados de CFD e medição para o P4, Moema.



Fonte: Extraído de Brandão (2009)

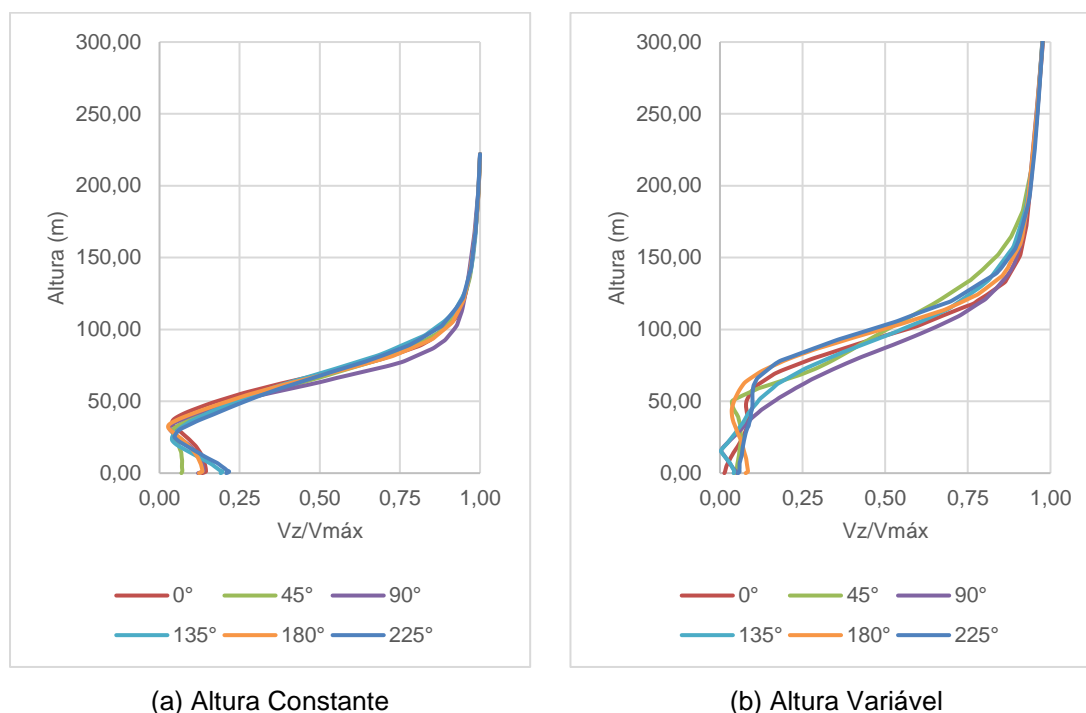
FIGURA 46: Resultados de CFD para o P5, Fortaleza.



Fonte: Extraído de Leite (2015).

Os perfis do ponto P4 para o modelo de altura constante (GRAF. 23a) e para o modelo de altura variável (GRAF. 23b) possuem também um comportamento similar ao observado para o ponto P3, não apresentando ainda sinais de recuperação do escoamento após o fim das edificações. Para o ponto P4, é possível também perceber que ambos os casos apresentam uma maior concordância do resultado entre as diferentes orientações de vento. Os perfis do ponto P4 para o modelo de altura variando apresentam boa correspondência com o perfil simulado para Moema (FIG. 45) e para o perfil simulado para o vento sudeste de Fortaleza (FIG. 46).

GRÁFICO 23: Perfis de velocidades para o P4, caso de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a análise comparativa dos resultados obtidos com os modelos do caso de estudo e de resultados encontrados na literatura, podemos perceber uma tendência do modelo urbano de altura variável em representar melhor o escoamento do ar em ambientes urbanos, tanto em relação aos perfis verticais de vento quanto aos valores de C_p nas fachadas e sua distribuição.

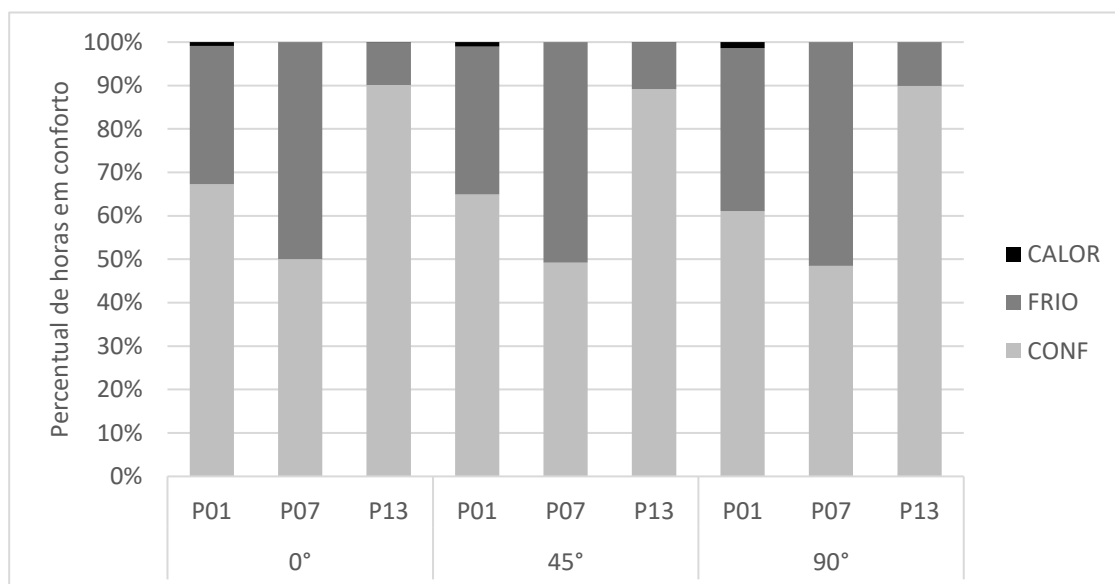
4.2.3.3. Resultados da simulação no EnergyPlus™

As simulações termo energéticas anuais foram realizadas no *EnergyPlus™* para os modelos de entorno com alta densidade, com altura constante e variável, com três orientações solares (0° , 45° e 90°), utilizando os dados climáticos de Belo Horizonte. Os resultados obtidos foram o percentual de horas de conforto (POC), e a renovação de ar por hora (Ren/h). O POC foi calculado através de dados horários de temperatura externa e de temperatura operativa interna retirados da simulação, com a metodologia do modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55:2013 (ASHRAE, 2013). Os dados horários de Ren/h são calculados pelo próprio programa e foram analisados com o intuito de verificar a quais valores de renovação de ar por hora estaria sujeita uma edificação inserida em um contexto urbano de alta densidade, com os dados de vento de Belo Horizonte. Foram considerados os valores de renovação de ar apenas das horas em que o fator de abertura da janela foi superior a 10% da área útil de ventilação

da abertura. Os cálculos foram feitos para cada cômodo de cada apartamento nos três andares estudados, totalizando 216 casos.

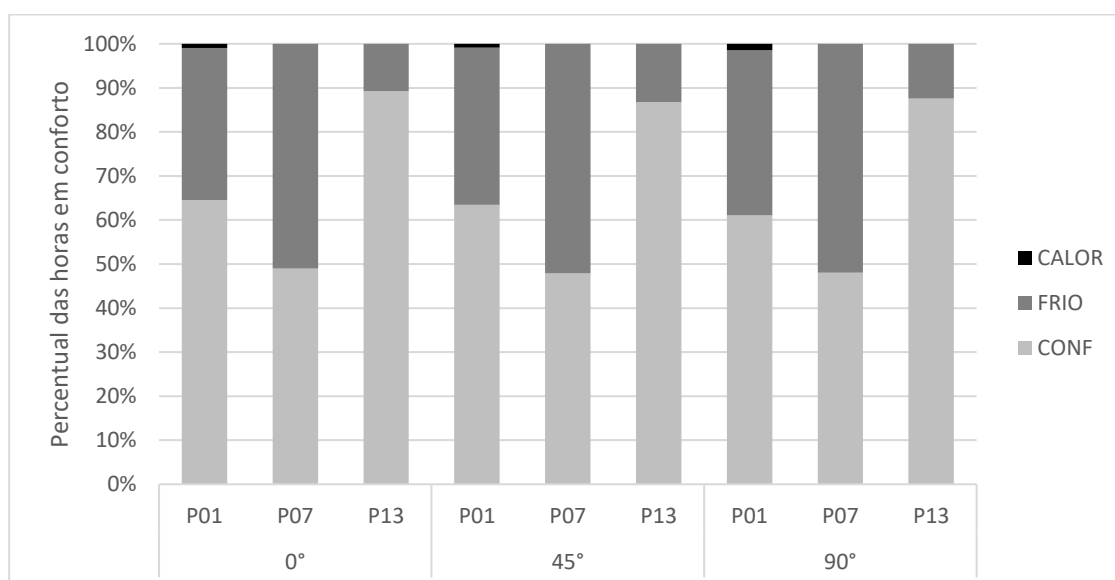
Os gráficos abaixo mostram as médias dos percentuais de horas em conforto de cada pavimento por orientação solar para cada modelo urbano.

GRÁFICO 24: Percentual de horas em conforto por tipo de modelo: Altura Constante



Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO 25: Percentual de horas em conforto por tipo de modelo: Altura Variável



Fonte: Elaborado pelo autor

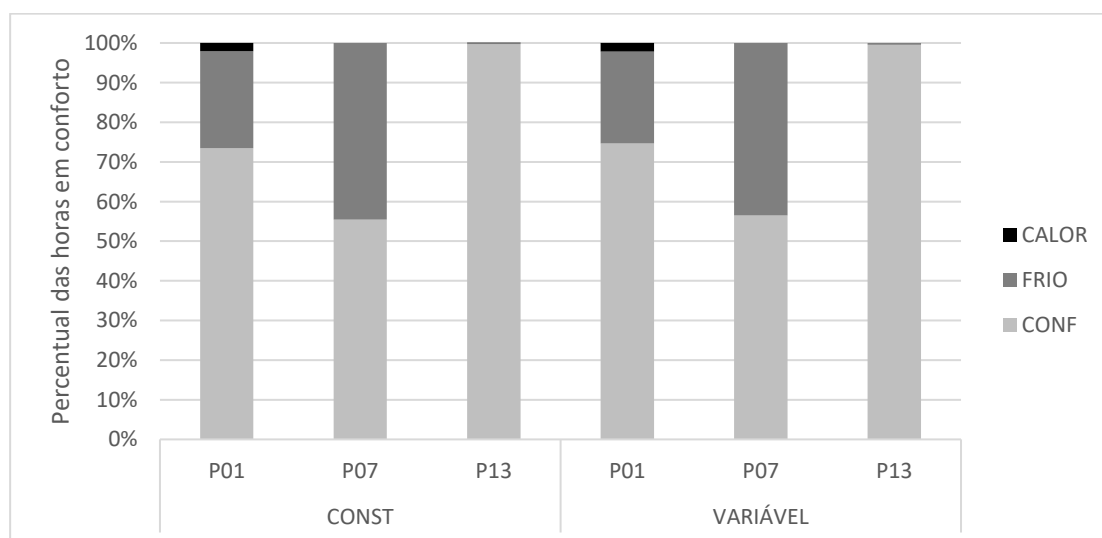
O gráfico de percentual de horas em conforto para o modelo de altura constante (GRAF. 24) e para o modelo de altura variável (GRAF. 25) mostra uma diferença significativa de

desempenho da edificação de acordo com o pavimento em que as unidades habitacionais estão localizadas. Não houve mudança significativa nos resultados encontrados de acordo com a orientação da edificação em relação ao sol, assim como entre os dois diferentes tipos de modelo urbano. Apenas o 13° pavimento obteve um POC acima de 80% das horas nas três orientações estudadas. O primeiro pavimento apresentou em média 65% e o sétimo pavimento ficou abaixo de 50% horas em conforto. O desconforto registrado foi quase que inteiramente por frio, sendo o desconforto por calor registrado em 1% das horas no 1° pavimento.

Esse alto índice de desconforto por frio pode ser devido às características da envoltória definida por Ferreira (2016) utilizadas na simulação. As paredes são isolantes, com alta capacidade térmica e baixa absorção à radiação solar, e a cobertura também é isolante, o que pode ter impedido o aquecimento do interior da edificação, uma vez que as cargas internas são muito reduzidas. Por essa mesma razão, acredita-se que o 1° e 13° pavimento tenha tido um desempenho melhor que o 7° por terem maior possibilidade de troca de calor com o meio externo, o 1° pavimento com o solo, e o 13° pavimento com a cobertura.

Os gráficos a seguir mostram a média do percentual de horas em conforto de cada pavimento de acordo com a estação do ano, no caso o verão (GRAF. 26) e o inverno (GRAF. 27). No verão nota-se uma melhora de aproximadamente 10% no 1° e no 13° pavimentos, sendo que neste último chega-se a 100% das horas em conforto. O 7° pavimento apresenta uma melhora mais tímida, de 5%.

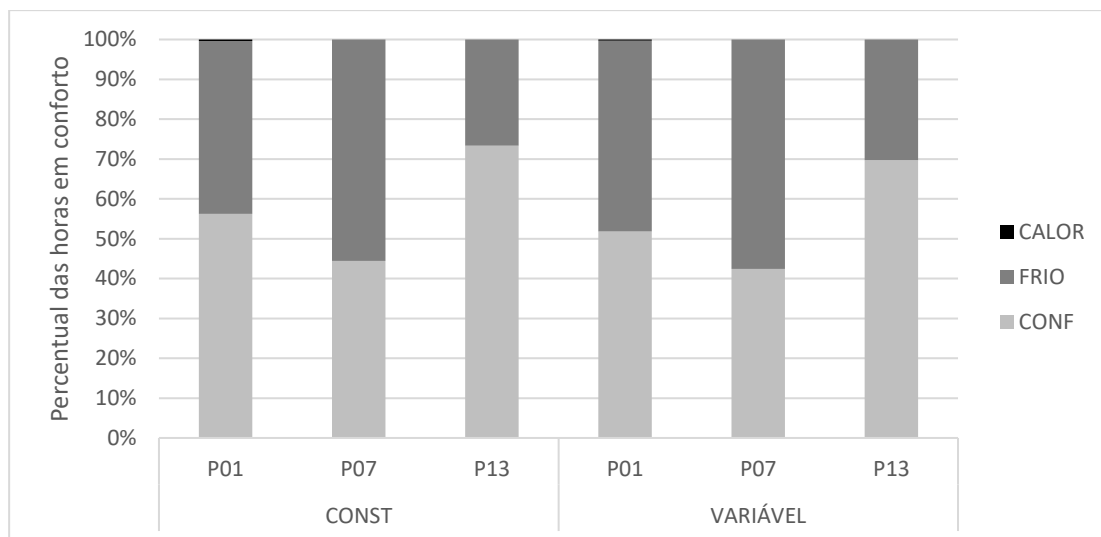
GRÁFICO 26: Percentual de horas em conforto por estação do ano: Verão



Fonte: Elaborado pelo autor

No inverno, todas as situações mostradas no gráfico apresentam POC abaixo dos 80%, tendo o 7º pavimento o pior desempenho com aproximadamente apenas 40% das horas em conforto. Novamente observa-se que os resultados obtidos com os dois modelos propostos de entorno urbano não possuem diferenças significativas.

GRÁFICO 27: Percentual de horas em conforto por estação do ano: Inverno

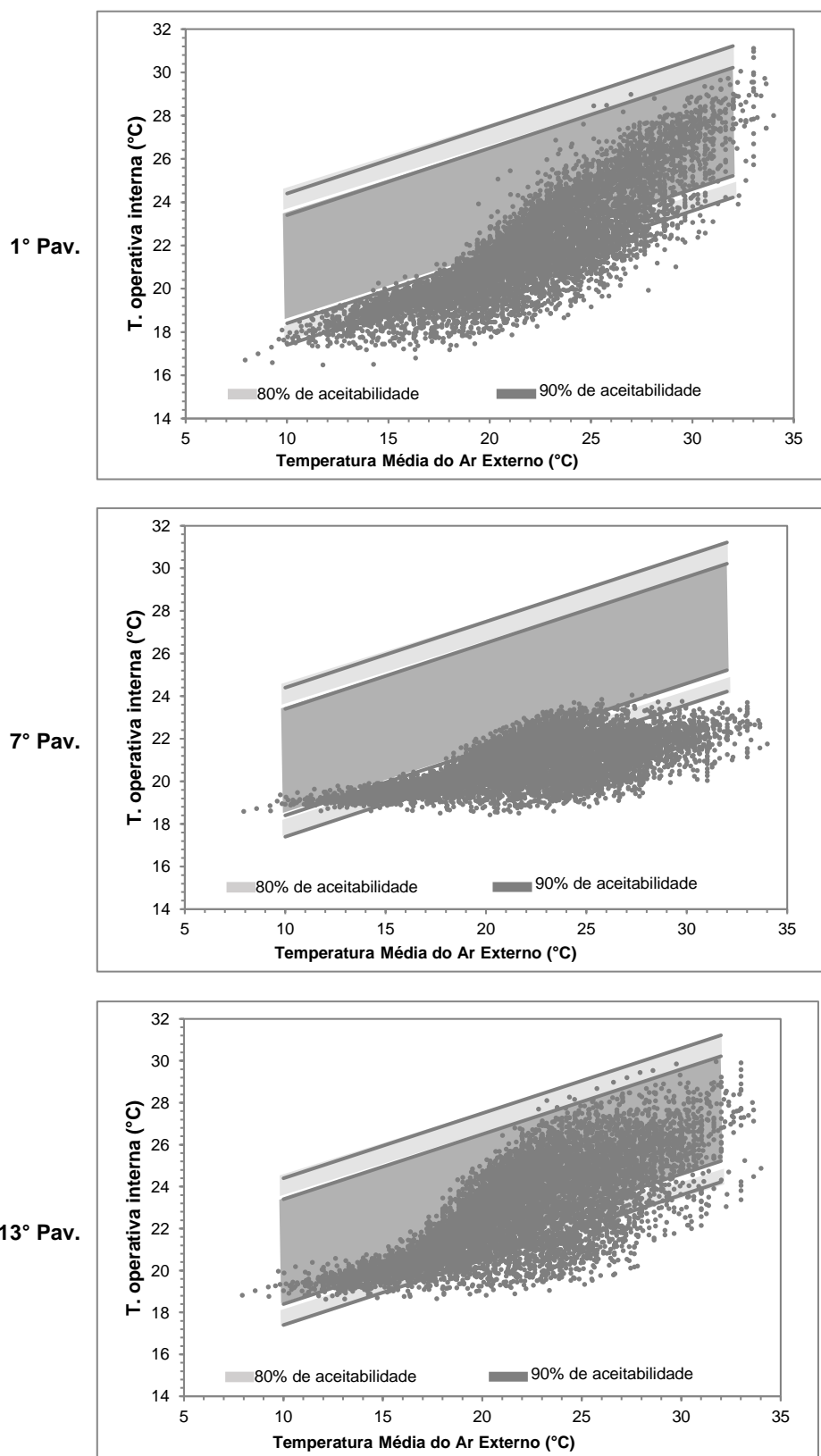


Fonte: Elaborado pelo autor

Nos gráficos a seguir as temperaturas operativas horárias médias por pavimento foram plotadas no gráfico de intervalos de temperatura operativa aceitáveis para espaços ventilados naturalmente do modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55:2013.

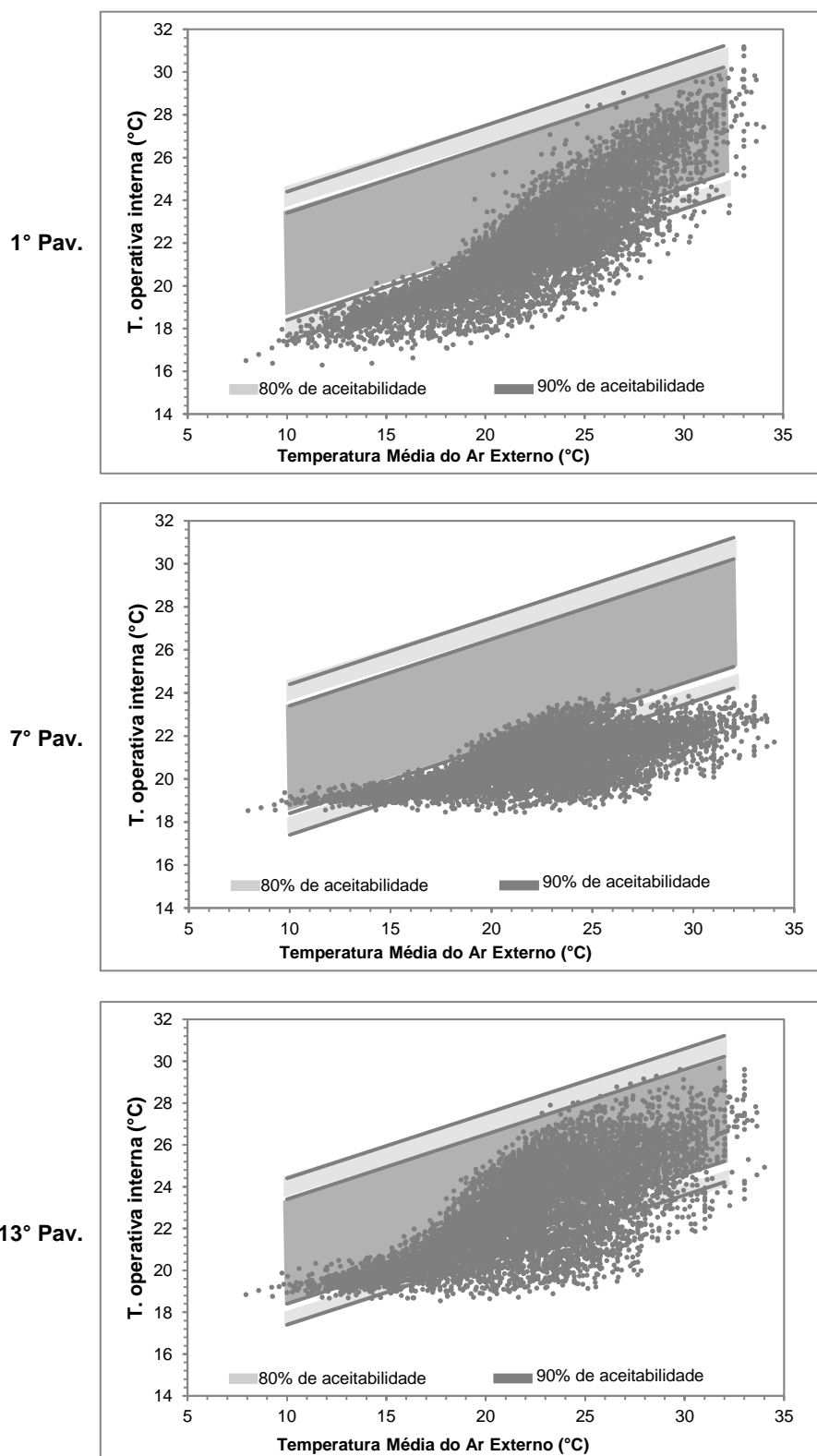
Conforme já demonstrado na discussão dos percentuais de horas em conforto, não há diferença significativa entre os dois modelos de entorno urbano, as diferenças acontecem de acordo com o pavimento da edificação em que se encontram as unidades habitacionais. O 1º e o 13º pavimentos apresentam uma parcela maior das horas dentro da faixa da zona de conforto de 80% de aceitabilidade e o restante das horas abaixo do limite inferior mínimo de temperatura, caracterizando desconforto por frio. E por sua vez o 7º pavimento apresenta a maior parte das horas em desconforto por frio, e o restante dentro da zona de conforto.

GRÁFICO 28: Conforto térmico com as temperaturas operativas horárias. Altura constante



Fonte: Elaborado pelo autor

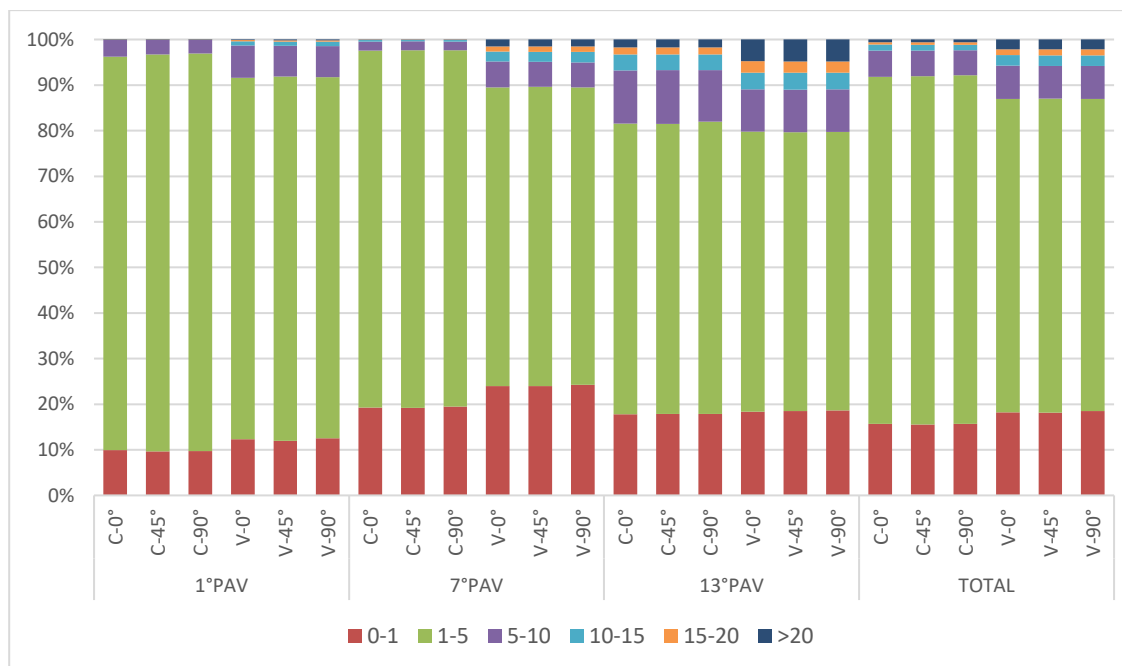
GRÁFICO 29: Conforto térmico com as temperaturas operativas horárias. Altura variável



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico abaixo (GRAF. 30) mostra os valores médios anuais de renovação de ar por hora para cada pavimento, nas três orientações solares e nos dois modelos de entorno definidos. Os valores foram separados em intervalos de 5m/s e assim calculada a frequência de ocorrência de cada intervalo.

GRÁFICO 30: Frequência de ocorrência de renovação de ar por hora.

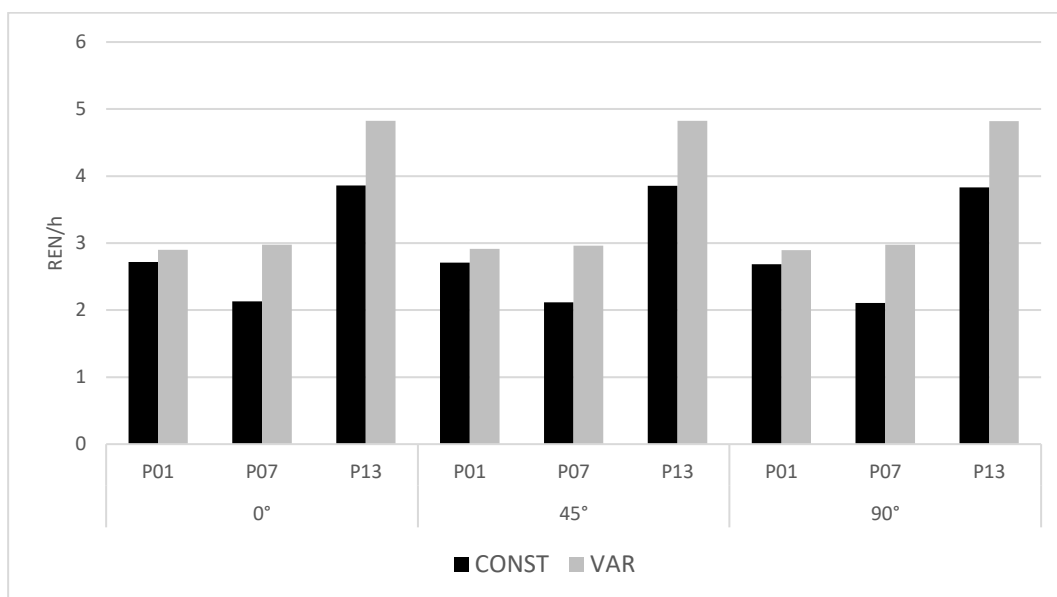


Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o gráfico é possível perceber que, em todos os cenários mostrados, as taxas de renovação de ar se apresentam no intervalo de 0 a 5m/s em mais de 80% do tempo, sendo que no 1º e o 7º pavimentos esse percentual sobe para acima de 90%. Como esperado, observa-se uma frequência maior de renovações acima de 5m/s no 13º pavimento, somando aproximadamente 20% em ambos os modelos de entorno. De modo geral, em todos os pavimentos o modelo de entorno com altura variável apresentou um percentual de renovações acima de 5m/s maior que o modelo de entorno com altura constante (GRAF. 31).

No gráfico de médias anuais de renovação de ar por hora (GRAF. 31) é possível perceber de forma mais clara a diferença nos resultados de acordo com os modelos de entorno. Isso acontece devido à diferença nos valores de C_p , e conseqüentemente nos valores de ΔC_p resultantes, calculados para cada modelo nas simulações de CFD. As diferenças nos valores de renovação foram em média 23% maiores no modelo de entorno com altura variando, entretanto, no 7º pavimento essa diferença chegou a 40%.

GRÁFICO 31: Médias anuais de renovações de ar por hora.

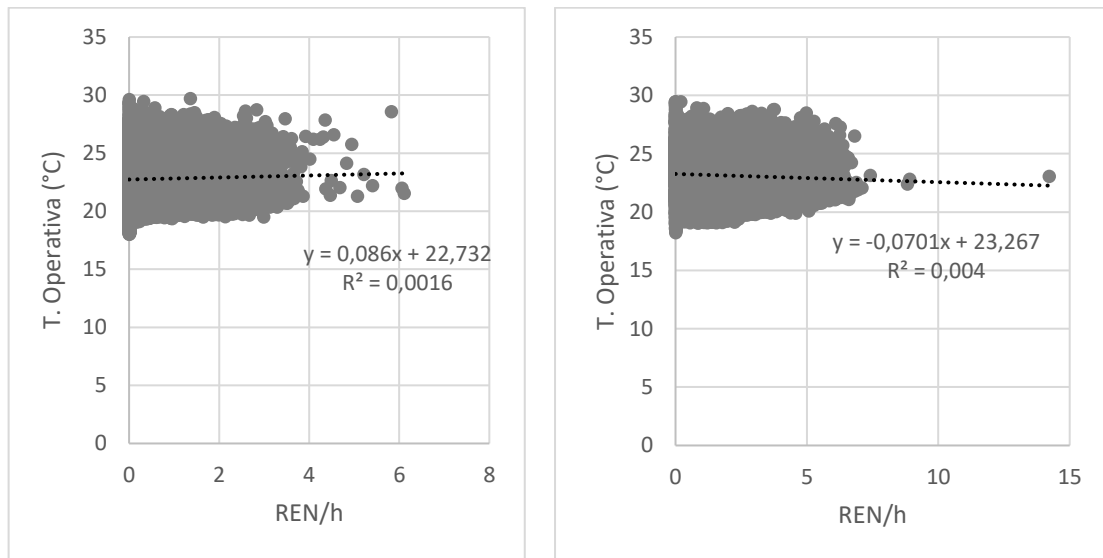


Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de apresentar uma diferença significativa de renovações de ar por hora entre os modelos de entorno urbano, a melhor condição de ventilação natural do modelo de altura variável não se refletiu em uma melhor condição de contorno, conforme visto nos gráficos comparativos de percentual de horas em conforto acima.

Para avaliar a correlação entre o número de renovações de ar por hora e as temperaturas operativas internas foram gerados gráficos de correlação com a determinação do R^2 dos dados horários anuais. Não foi encontrada correlação entre essas duas variáveis conforme mostrado no GRAF. 32. Apesar desse resultado encontrado, é conhecido que a ventilação natural tem potencial de contribuir para o conforto ambiental interno. Acredita-se que a falta de correlação apresentada seja devida à forma como foi realizado o experimento, à especificação de uma envoltória otimizada para o clima estudado, e à série de fatores variando ao mesmo tempo no modelo, como os fatores climáticos externos e a modulação da abertura das janelas, realizadas pelo programa de acordo com os parâmetros definidos para a simulação. Nas simulações realizadas o *EnergyPlus*TM abre as janelas quando a temperatura interna é superior a 20°C, e quando a temperatura externa é inferior à temperatura interna.

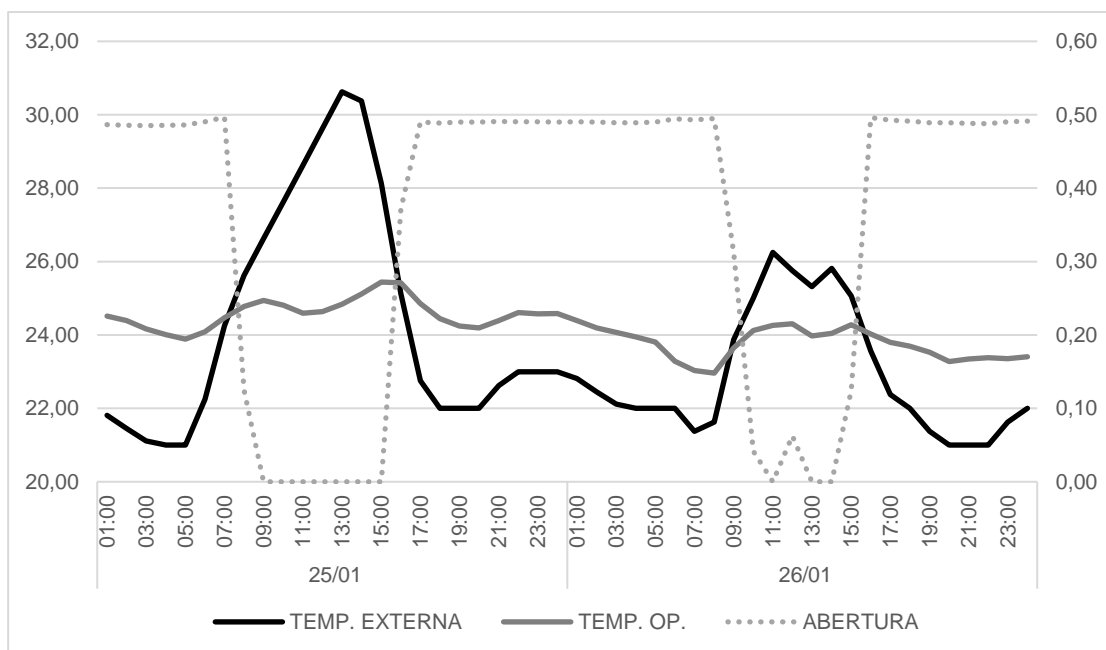
GRÁFICO 32: correlação do Q01 do 1° e 13° pavimentos do AP01. Altura variável



Fonte: Elaborado pelo autor

No gráfico 33, é apresentado, como exemplo, um pequeno trecho de dois dias que mostra a variação da temperatura externa, da temperatura operativa interna e da modulação de abertura das janelas do programa. Quando a janela está fechada o valor da abertura é zero, e quando ela está toda aberta o valor é 0,5. A série retrata os dias 25 e 26 de janeiro para o apartamento 01 do 13° pavimento, com o modelo de altura variável e orientação solar de 0°.

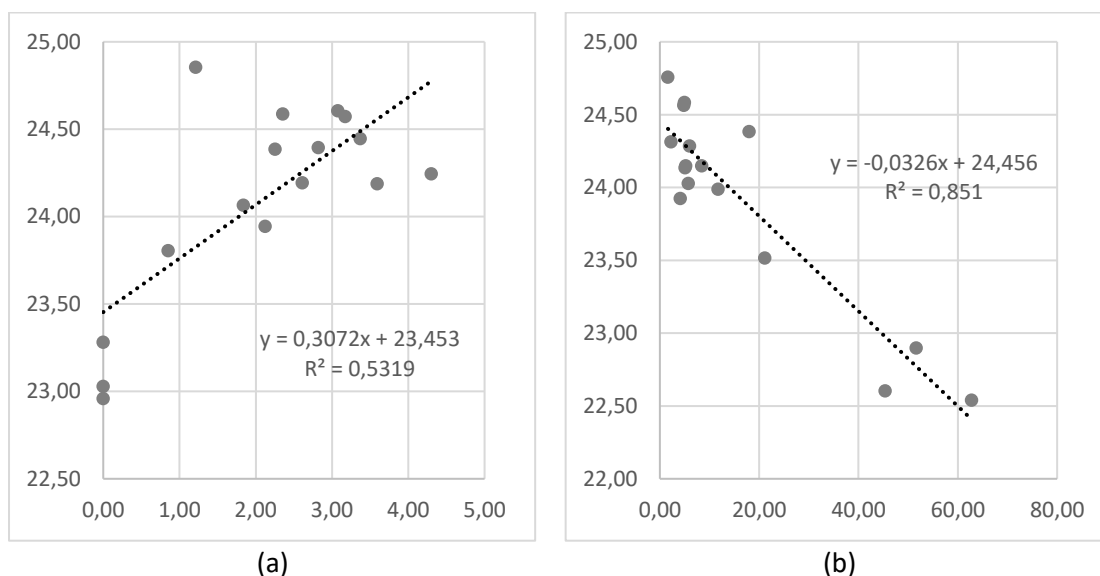
GRÁFICO 33: Temperatura operativa interna X variação de modulação de abertura



Fonte: Elaborado pelo autor

No gráfico acima com o amanhecer a janela fecha no momento em que a temperatura externa se torna maior que a temperatura interna, que se eleva. No final da tarde com a queda da temperatura externa a janela é aberta e percebe-se a queda da temperatura interna, e o recomeço do ciclo em seguida. Analisando o trecho central dessa série, um momento que a janela está totalmente aberta, foi encontrada uma correlação moderada entre as variáveis (GRAF. 34a). Entretanto a correlação positiva não é esperada, pois significa que nesta série quanto maior a renovação de ar maior será a temperatura operativa interna, o oposto do esperado, uma vez que a temperatura do ar exterior é menor que a temperatura operativa do interior. Analisando o quarto 02 (GRAF. 34b) no mesmo período é encontrado uma excelente correlação, mas dessa vez negativa, como seria esperado.

GRÁFICO 34: Correlação do Q01 e Q02 do 13º pavimentos do AP01. Altura variável



Fonte: Elaborado pelo autor

Essa divergência de comportamento entre as variáveis em um mesmo período de uma mesma simulação reforça aquilo que foi dito anteriormente, a forma como o experimento foi montado e a interação das variáveis desejadas com as demais variáveis envolvidas no cálculo efetuado pelo software, não permitiu que fosse encontrada a correlação entre a renovação de ar por hora e a temperatura operativa interna.

5. CONCLUSÃO

No Brasil não há nenhuma norma que trata especificamente da ventilação natural e traga parâmetros normativos em valores de renovação de ar por hora. A NBR 15.575:2013 exige que sejam cumpridos os valores de A_{AB}/A_P estipulados pelos códigos municipais, e permite também a comprovação do desempenho térmico através de simulação computacional. O RTQ-R apresenta pré-requisitos de ventilação natural como a razão da área de abertura pela área de piso e razão das áreas de entrada e áreas de saída do vento e faz o uso da simulação computacional como forma de análise de ambientes climatizados naturalmente. As metodologias de simulação computacional dessas normas se diferem consideravelmente. A NBR 15.575 usa uma metodologia simplificada em que são simulados apenas dois dias típicos, verão e inverno, e utilizado o valor fixo de 1 Ren/h, ou 5 Ren/h. O RTQ-R não estipula um valor de renovação a ser atendido, mas a ventilação natural é contabilizada através da temperatura operativa interna horária em uma simulação anual mais complexa com o uso de um modelo multizona.

As normas internacionais pesquisadas apresentam em sua maioria requisitos de ventilação para sistemas de condicionamento ativo, que são a forma padrão de condicionamento de edificações nesses países. As principais exceções encontradas foram os casos de Portugal e Hong Kong. Em Portugal, o REH traz um modelo de cálculo prescritivo de renovação de ar por hora devido à ventilação natural por efeito de vento e por efeito chaminé, e estipula as taxas de 1 Ren/h para os cômodos principais e 4 Ren/h para os cômodos de serviço. O guia de eficiência energética para edificações residenciais de Hong Kong estipula como parâmetros prescritivos a razão da área de abertura pela área de piso, diferenciados para unidades habitacionais com ventilação cruzada ou com uma única fachada, e a extensão máxima de 12 metros para o caminho que o ar percorrerá entre os cômodos no caso de unidades com mais de uma fachada. A norma de Hong Kong também apresenta a alternativa do uso de simulação computacional, utilizando um modelo CFD para o cálculo da velocidade média ponderada pela área de piso que deve ser superior a 0,4m/s.

O interessante observado nessas duas normas é a adoção de metodologias bem distintas do praticado na maioria dos países. O uso de modelos numéricos e empíricos prescritivos para o cálculo de ventilação natural, e de parâmetros como o caminho do ar no interior da unidade, são em geral fáceis de serem aplicados e podem permitir uma análise mais completa do potencial de ventilação natural do que apenas a razão entre área de abertura por área de piso. O uso de simulação computacional sem dúvida supera esses modelos por serem capazes de processar um número maior de variáveis.

Entretanto ainda é uma opção cara, pois demanda programas específicos, maior tempo de análise, e profissionais capacitados a operar os programas e a interpretar os resultados gerados.

As metodologias de predição de ventilação natural em edificações analisadas neste trabalho foram: os modelos experimentais, como túneis de vento ou medições em loco que fornecem dados primários; os modelos empíricos, que sistematizam os dados primários em metodologias de cálculo; e os modelos numéricos teóricos ou analíticos que são derivados das equações fundamentais da dinâmica de fluidos e transferência de calor. Os modelos teóricos descritos foram: o modelo zonal, o modelo multizona, e o modelo de Fluidodinâmica Computacional (CFD).

Foram adotados neste trabalho os modelos computacionais CFD e o *Airflow Network* (multizona). Com o CFD foi possível analisar o escoamento do ar nos modelos urbanos e obter o campo de pressões de vento incidente sobre a fachada do edifício de interesse, convertido em coeficientes de pressão (C_p) nas aberturas dos pavimentos estudados. Com o modelo AFN foram conduzidas simulações anuais para todos os ambientes de permanência prolongada e extraídos dados de temperatura interna e renovação de ar por hora, o que permitiu ter uma visão bem ampla do desempenho da edificação como um todo em relação ao conforto térmico de seus usuários.

A adoção das duas metodologias em conjunto permitiu aproveitar as melhores potencialidades de cada uma. Com o CFD se consegue ter um resultado detalhado do escoamento desenvolvido em um ambiente urbano adensado e seu impacto nas pressões de vento sobre a fachada da edificação estudada. E com o AFN foi possível extrapolar os dados de C_p das aberturas para um resultado de comportamento anual com dados horários de uma edificação como todo, considerando o fluxo de ar entre os ambientes internos e as trocas de calor com os ganhos externos e internos no balanço energético.

Um dos objetivos deste trabalho foi analisar o comportamento de uma edificação inserida em um meio urbano em relação à ventilação natural e às temperaturas operativas internas. Para a representação deste meio urbano decidiu-se pelo desenvolvimento de modelos teóricos de entorno baseados nas características de adensamento encontradas em cidades brasileiras de diferentes climas. Foram gerados três modelos, um de baixa densidade e dois com alta densidade, um com alturas constantes e outro com alturas variáveis. Dentre as 8 cidades selecionadas foram encontrados alguns empecilhos para o levantamento dos dados necessários para a geração dos modelos: a falta da ferramenta do *StreetView* do *Google Earth*® em

determinadas áreas de cidades menores; e a ocupação menos verticalizada da maioria das cidades estudadas, o que limitou a geração dos modelos de alta de densidade apenas aos dados de Belo Horizonte e Curitiba. Apesar disso acredita-se que o modelo de alta densidade gerado é representativo de áreas urbanas altamente adensadas brasileiras como mostram os resultados das simulações em CFD comparados com dados de escoamento do ar em áreas de São Paulo e Fortaleza encontrados na literatura.

Para a análise das metodologias de ventilação natural das normas brasileiras, NBR 15.575 e RTQ-R, a edificação estudada foi simulada conforme a metodologia de cada uma para as três orientações solares. No caso das simulações para a NBR 15.575 todos os cenários atenderam aos requisitos mínimos para o dia típico de inverno e para o dia típico de verão. Os resultados para o RTQ-R classificaram a envoltória do edifício como um todo como B, um bom resultado considerando que a classificação varia de A a E. Entretanto na classificação por unidade habitacional, das doze UH situadas no 1º pavimento cinco foram classificadas como D, quatro como C e três como B. No 7º pavimento todas as UH foram classificadas como B e no 13º pavimento todas foram classificadas como A.

Comparando os resultados das análises para a NBR 15.575 com o do caso de estudo é possível concluir que o fato de uma edificação atender seus requisitos mínimos de desempenho térmico não garante o conforto térmico de seus ocupantes. Os parâmetros da norma exigem que para o clima de Belo Horizonte não se deve ter temperatura inferior a 11,79°C e não superior a 32°C dentro dos cômodos de permanência prolongada nos dias típicos de inverno e de verão, respectivamente. Entretanto segundo a metodologia de conforto adaptativo da ASHRAE 55:2013 a zona de conforto para a cidade está entre 21,8°C e 28,8°C, muito distante dos valores permitidos pela norma.

Na comparação entre os resultados do RTQ-R e do caso de estudo também são encontradas algumas discordâncias. O 1º pavimento apresentou uma classificação mais baixa que o 7º pavimento, sendo que no estudo de caso o 7º pavimento possui o pior desempenho em comparação com os outros pavimentos. O que resultou na classificação ruim do 1º pavimento foram baixos índices de equivalente numérica da envoltória para resfriamento e para aquecimento. No caso da $EqNumEnv_{RESF}$ há uma diferença entre as temperaturas máximas para conforto, no RTQ-R ela é de 26°C e no caso de estudo é de 28,8°C. Em relação à $EqNumEnv_A$ o resultado condiz com o encontrado no caso de estudo. Quanto à classificação do 7º pavimento como “B” a divergência está na forma como é calculada a equivalente numérica da envoltória da unidade habitacional, através de uma média ponderada das $EqNumEnv_{RESF}$ e

$E_{qNumEnv_A}$ em que a primeira tem um peso de 0,64 dando uma importância maior ao desconforto por calor, sendo que o resultado do POC do caso de estudo sugere o oposto. Para o 13° pavimento, a classificação “A” obtida é condizente com o resultado obtido no estudo de caso que atingiu 90% de horas em conforto.

A metodologia de simulação da NBR 15.575 para comprovação do desempenho térmico de edificações habitacionais não é capaz de distinguir envoltórias que permitam o atendimento aos índices de conforto térmico dos usuários. Ao simular dias típicos que representam situações extremas usados para dimensionamento de sistemas de condicionamento ativo ignora-se o desempenho do edifício ao longo do ano e seus requisitos são permissíveis a ponto da simulação realizada neste trabalho, mesmo registrando temperaturas internas de 13°C, atender ao necessário para a norma. Já a metodologia de simulação computacional do RTQ-R possui parâmetros condizentes com metodologias utilizadas em trabalhos acadêmicos e técnicos para análise de conforto térmico. Apesar disso no caso apresentado neste trabalho os resultados divergiram na classificação de algumas unidades habitacionais em relação ao estudo de caso, penalizando unidades habitacionais que atingiram valores de percentual de horas em conforto maiores que outras unidades bem classificadas.

No estudo de caso os dois modelos de entorno com alta densidade foram simulados para seis orientações de vento no CFD e seus resultados inseridos no modelo do *EnergyPlus*[™] para as simulações anuais em três orientações solares distintas.

O escoamento do vento no modelo de entorno com altura constante apresentou uma elevação geral do perfil de vertical de vento para a altura das coberturas das edificações, causando uma zona de baixas velocidades na região abaixo das mesmas, a camada dossel urbana (UCL). Como consequência disso as pressões exercidas sobre as fachadas da edificação de interesse foram distribuídas de forma bem uniforme resultando em um valor de ΔC_p muito baixo. No modelo de entorno com altura variando a diferença de altimetria das edificações resultou em uma maior permeabilidade ao escoamento fazendo com que velocidades maiores atingissem a região do edifício de interesse. Isso resultou em uma maior heterogeneidade nas pressões de vento exercidas nas diferentes fachadas do modelo e conseqüentemente um ΔC_p mais alto que o registrado no modelo com altura constante.

Da simulação no CFD foram comparados os perfis verticais de velocidade do vento para quatro pontos nos dois modelos de entorno com perfis encontrados na literatura. Foram utilizados dados de medição em túnel de vento para um trecho do bairro de Moema, uma simulação em CFD para a mesma região, e uma simulação de CFD para uma

região de alta densidade em Fortaleza. Os perfis verticais de velocidade gerados para o modelo de altura constante apresentaram como principais discordâncias com os perfis encontrados na literatura a altura em que acontece a quebra do perfil e uma menor velocidade na região abaixo da quebra, indicando uma maior desaceleração do vento na camada dossel urbana. O modelo de entorno com altura variável apresentou uma melhor concordância com os resultados da literatura, incluindo a altura em que acontece a quebra do perfil, as velocidades no trecho do perfil que representa a UCL e a altura em que o perfil perturbado retorna ao comportamento do perfil da camada limite atmosférica.

Foram comparados também os valores de C_p e sua distribuição ao longo da fachada principal nos dois modelos de entorno com os valores encontrados para a simulação para Fortaleza. Também neste caso o modelo com altura variável apresentou uma maior concordância com os resultados da literatura, seja na distribuição ao longo da fachada, nos valores absolutos, e nos valores de ΔC_p que o modelo de entorno com alturas constante. Analisando os resultados obtidos nas simulações de CFD para os modelos de altura constante e altura variável com aqueles retirados da literatura, o modelo de altura variável se mostrou mais indicado para análises de ventilação natural em meio urbano para um contexto teórico.

Um dos resultados extraídos das simulações anuais no *EnergyPlus*TM do estudo de caso foi a renovação de ar por hora dos cômodos de permanência prolongada. Nos valores obtidos foi constatado uma diferença muito pequena nos valores de renovação de ar entre as três orientações, mas uma diferença significativa entre os modelos de entorno. Esse resultado era esperado uma vez que a diferença entre os ΔC_p dos modelos foi alta, pois essa variável é uma das principais envolvidas no cálculo realizado pelo AFN. Os valores registrados para o modelo de entorno com altura variável foram aproximadamente 23% maiores que os do modelo de altura constante, sendo que no caso do 7º pavimento a diferença foi de 40% maior para o primeiro. Outro resultado obtido interessante foi a frequência de ocorrência de renovação de ar por hora. Em média em quase 20% do tempo as taxas de renovação são inferiores a 1,0 e em média 60% do tempo as taxas estão situadas no intervalo de 1,0 a 5,0 Ren/h. Isso mostra que pelo menos para o caso de Belo Horizonte os valores de renovação estipulados pela NBR 15.575 como parâmetros de simulação são bem representativos do que seria observado em uma edificação inserida em um ambiente urbano adensado.

Outro objetivo pretendido por esse trabalho era a definição de diretrizes ou de um parâmetro de projeto com base em valores de renovação de ar por hora para conforto térmico. Com os resultados obtidos nas simulações do estudo de caso para o clima de

Belo Horizonte não foi possível atingir esse objetivo. Acredita-se que a forma como o experimento foi montado, as variáveis escolhidas e a forma como o resultado foi analisado não permitiram obter uma correlação viável entre as taxas de renovação de ar por hora e as temperaturas operativas internas.

As principais limitações deste trabalho estão relacionadas ao levantamento de informações para gerar os modelos de entorno e à abrangência das simulações em relação às possibilidades de adensamento e aos diferentes climas brasileiros. No levantamento de informações dos parâmetros urbanísticos e das alturas das edificações nas regiões censitárias definidas, em algumas cidades e em alguns exemplos de trechos urbanos com as densidades desejadas não foi possível conseguir as informações, sendo assim as médias geradas em alguns casos não incluem a realidade das oito cidades pretendidas.

Quanto à abrangência das simulações só foram simulados cenários considerando a alta densidade e o clima de Belo Horizonte, representante da zona bioclimática três. Portanto os resultados encontrados possuem validade apenas para situações envolvendo edificações multifamiliares verticais inseridas em um contexto urbano de alta densidade e que pertencem à ZB 3. De forma semelhante as conclusões apresentadas sobre a normalização brasileira devem ser interpretadas sabendo-se que dizem respeito a uma situação específica e não podem ser extrapoladas para todo o tipo de edificações habitacionais e aos climas brasileiros.

Para as conclusões mais assertivas a respeito da diferença nos resultados dos dois diferentes tipos de modelo urbano, com altura constante e altura variável, são necessários a disponibilidade de um túnel de vento para validação do modelo ou de dados primários publicados de exemplos similares em outras pesquisas, tendo sido encontrado para este estudo apenas o trabalho da Dra. Alessandra Rodrigues Prata-Shimomura.

Outra limitação das simulações foi não considerar trocas térmicas no cálculo do CFD, fazendo com que os impactos da absorção da radiação solar e conseqüentemente aquecimento das regiões urbanas muito adensadas no escoamento do ar não tenha sido levado em consideração, apesar de pesquisas nessa área demonstrarem que esse impacto pode ser significativo.

Para o desenvolvimento de modelos urbanos teóricos recomenda-se a busca de metodologias de levantamento de dados mais automatizadas, como o uso de *shape files* que já contenham as informações de área de projeção e altimetria das edificações, assim como o uso de métodos estatísticos mais avançados para a definição de quais

parâmetros são mais significativos. Sugere-se também a realização de testes comparativos entre os modelos teóricos e as regiões utilizadas em seu desenvolvimento para comparação dos resultados obtidos.

Para simulações computacionais em CFD recomenda-se o acesso a metodologias experimentais como túneis de vento ou medições em campo para a obtenção de dados primários, para fazer validação dos modelos utilizados e assim poder gerar conclusões mais assertivas.

Tem sido cada vez mais comum em trabalhos publicados o uso de linguagem de programação para gerar rotinas que permitam a geração automática dos modelos e suas variações, da entrada de dados para gerar os arquivos de simulação e para o tratamento dos dados. Recomenda-se também o uso de métodos estatísticos mais avançados para o tratamento dos dados obtidos nas simulações, pois facilitam enxergar os resultados no alto volume de dados gerados.

Os resultados e conclusões apresentados nesse trabalho mostram que a existência de metodologias e parâmetros em leis e normas capazes de avaliar de forma mais completa o potencial de ventilação natural e de conforto térmico das edificações habitacionais é ainda muito importante para que se garanta a qualidade mínima do que é construído e comercializado. A metodologia usada para gerar modelos urbanos teóricos se mostrou aplicável e com resultados de escoamento de ar promissores em comparação com áreas de adensamento similar reais. E a metodologia de simulação computacional com a união de dois modelos, o CFD e o multizona (AFN), foi capaz de ilustrar de forma bem completa o desempenho anual da ventilação natural, do entorno urbano ao interior da edificação.

REFERÊNCIAS

- AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD (ABCB). **NCC 2016**: National Construction Code. Canberra: Australian Building Codes Board Office, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **NBR 15220** – Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15575** – Edificações Residenciais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 16401**– Instalações de Sistemas de ar-condicionado – Sistemas centrais e Unitários. Rio de Janeiro, 2008.
- AIR INFILTRATION AND VENTILATION CENTRE (AIVC). **A guide to energy efficient ventilation**. AIVC, 1996.
- ALLARD, F. (ed.). **Natural Ventilation in Buildings**. Londres: James & James, 1998.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ASHRAE Standard 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE; 2013.
- _____. **ASHRAE Standard 62.1**: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: ASHRAE; 2013.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **ASME V&V 20**. Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer. New York: ASME; 2009.
- AXLEY, J. Multizone airflow modeling in buildings: History and theory. **HVAC&R Research**, 2007 (13): 907–28;
- BARNABY, C. S.; CRAWLEY, D. B. Weather data for building performance simulation. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Londres: Spon Press, 2011.
- BRANDÃO, R. S. **As interações espaciais urbanas e o clima**. (Tese). Doutorado em Arquitetura e Urbanismo – Tecnologia da Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BRASIL. Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, ano 138, nº 200, 18 de outubro de 2001. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=18/10/2001&jornal=1&pagina=1>>. Acesso em 22.abr.2015.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. [3ª ed.]. Maceió: EDUFAL, 2008. 173p.
- BLOCKEN, B.; ROELS, S; CARMELIET, J. Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2004; (92) 849-873.
- BLOCKEN, B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2014; (129) 69-102.
- BUCCOLIERI *et al.* City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries. **Atmospheric Environment**, 2010; (44) 1894-1903.

BUILDING REASERCH ESTABLISHMENT. **Principles of natural ventilation**. BRE Digest n. 210. BRE, Gaston, 1978 apud Bittencourt e Cândido (2008).

CÂNDIDO, C. *et al.* Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot climate zone. **Building and Environment**, 2010;(45): 222-229.

CAREY, P.S., ETHERIDGE, D.W. Direct wind tunnel modeling of natural ventilation for design purposes. **Building Service Engineering Research and Technology**, 1999; (3) 131-142.

CELIK *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering*, 2008;(130)

CENSO2010. **Sinopse por setores**. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Site disponível em:
<<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st>>.

CHAN, A.L.S. Generation of typical meteorological years using genetic algorithm for different energy systems. **Building and Environment**, 2016; (90): 1-13;

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building and Environment**, 2009; (44) 848-858.

COOK, N.J. A boundary layer wind tunnel for building aerodynamics. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 1975; (1) 3-12.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício**: procedimentos para a quantificação. (Dissertação). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Tecnologia da Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

CÓSTOLA, D.; ALLUCI, M. Pressure coefficient simulated by CFD for wind-driven ventilation analysis. In: 10th CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 2007, Beijing. **Proceedings of Building Simulation...** Beijing, 03-06 set. 2007.

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

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. L. M. A comparison of generic pressure coefficient for indoor air flow studies. In: 4th INTERNATIONAL BUILDING PHYSICS CONFERENCE, 2009, Istanbul. **Proceedings of International...** Istanbul, 15-18 Jun 2009.

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

DIMITROULOPOULOU, C. Ventilation in European dwellings: A review. **Building and Environment**, 2012; (47): 109-125.

FERREIRA, C. C. **Análise de sensibilidade por meio de experimento fatorial de parâmetros de desempenho térmico de envoltórias de edificações residenciais**: Contribuição à revisão das normas brasileiras. 2016. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2016.

FRANKE, J. Recommendations of the COST action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. In: The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering. 2006, Yokohama. **Proceedings of...** Yokohama, 2006.

FRANKE *et al.* **Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment.** Brussels: COST, 2007. 52p.

van HOOFF, T.; BLOCKEN, B. Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam Arena stadium. **Environmental Modelling & Software**, 2010: (25) 51–65.

HONG KONG BUILDINGS DEPARTMENT (HKBD). **Guidelines on design and construction requirements for energy efficiency of residential buildings.** Hong Kong: Buildings Department, 2014. 62p.

HUANG, Y.J.; CRAWLEY, D.B. Does it matter which weather data you use in energy simulations?. **Building Energy Simulation User News.** (1997): v.18, n.1.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). Censo Demográfico 2010. **Características da População e dos Domicílios:** Resultados do Universo. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2011.

_____. **Arranjos populacionais e concentrações urbanas do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 167p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acessado em: 03/10/2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria 18, de 16 de janeiro de 2012.** Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ). **NP 1037-1** – Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural. Monte de Caparica: IPQ, 2002.

KARAVA, P. **Airflow Prediction in Buildings for Natural Ventilation Design: Wind Tunnel Measurements and Simulation.** 2008. 243 f. Tese (Doutorado). Department of Building, Civil, and Environmental Engineering. Concordia University, Montreal, Canada. 2008.

KUNKEL *et al.* **Indoor air quality, thermal comfort and daylight:** Analysis of residential building regulations in eight EU member states. Brussels: BPIE, 2015. 100p.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura.** [3.ed.] Rio de Janeiro, 2014.

LABEEE. **Laboratório de eficiência energética em edificações da Universidade Federal de Santa Catarina.** Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>> Acessado em: 11/10/2016.

LEITE, R. C. V. **Cidade, Vento, Energia:** Limites de aplicação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido. 2015. 273 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.

LIN *et al.* Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. **Building and Environment**, 2014; (79) 152-167.

MARTINS, N. R.; DA GRAÇA, G. C. Validation of numerical simulation tools for wind-driven natural ventilation design. **Building Simulation**, 2016; (9) 75–87

MEGRI, A. C.; HAGHIGHAT, F. Zonal modeling for simulating indoor environment of buildings: Review, recent developments, and applications. **HVAC&R Research**, 2007; (13) 887-905

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - **Balço Energético Nacional 2016** – Ano base 2015: Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2016.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO. **Instrução Normativa SLTI n.º 2/2014**. Disponível em: <http://www.comprasgovernamentais.gov.br/paginas/instrucoes-normativas/instrucao-normativa-no-2-de-4-de-junho-de-2014>

MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. CFD simulation of Wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. **Building and Environment**, 2013; (60) 137-149

PASSE, Ulrike; BATTAGLIA, Francine. **Designing spaces for natural ventilation: An architect's guide**. New York: Routledge, 2015.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 10, n. 1, 2010. p. 7-51.

PORTUGAL. Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto de 2013. **Diário da República**, 1.ª série – N.º159 – 20 de agosto de 2013. 2013a.. Disponível em: <<https://dre.pt/application/dir/pdf1s/2013/08/15900/0498805005.pdf>>. Acessado em 03 de março de 2016.

PORTUGAL. Despacho n.º15793-K/2013, de 03 de dezembro de 2013. **Diário da República**, 1.ª série – N.º234 – 03 de dezembro de 2013. 2013b. Disponível em: <<https://dre.pt/application/dir/pdf2sdip/2013/12/234000003/0005800087.pdf>>. Acessado em 03 de março de 2016.

PRATA-SHIMOMURA, A. R. **Relatório 2 FAPESP**. Programa de Pós-Doutoramento. São Paulo. Dez. 2008.

PRATA-SHIMOMURA *et al.* Construção de modelos físicos para análise da ventilação natural em túnel de vento. In: ENCAC 2011. Encontro nacional de conforto no ambiente construído. Búzios, 2011. **Anais do...** Búzios, 2011.

RAMPONI *et al.* Evaluation of wind-driven ventilation in building energy simulation: Sensitivity to pressure coefficients. In: CISBAT 2011. Cleantech for sustainable buildings conference. Lausanne, 2011. **Proceedings of the...** Lausanne, 14-16 Set 2011.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**, 2012; (53) 34-48.

RAMPONI *et al.* CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. **Building and Environment**, 2015; (92) 152-166.

SORGATO, M. J. **Relatório Técnico da Base de Simulações para o RTQ-R. ELETROBRAS/PROCEL.** [S.I.]. 2011.

SREBRIC, J. Ventilation performance prediction. In: HENSEN, Jan. L. M.; LAMBERTS, Roberto (org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation.** Londres: Spon Press, 2011.

STANDARDS AUSTRALIA INTERNATIONAL. **AS 1668** – The use of ventilation and air conditioning in buildings. Part 2: Ventilation design for indoor air contaminant control (excluding requirements for the health aspects of tobacco smoke exposure). Sydney, 2012.

TAMURA, T.; NOZAWA, K.; KONDO, K. AIJ guide for numerical prediction of Wind loads on buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2008; (96) 1974-1984.

TOLEDO, E. **Ventilação natural das habitações.** Coordenação da publicação brasileira por Alexandre Toledo. Maceió: EDUFAL, 1999.

TOMINAGA *et al.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2008; (96) 1749-1761.

VIANNA, N. S. **O estado da arte em ensino e pesquisa na área de conforto ambiental no Brasil.** São Paulo: USP, 2001.

WANG *et al.* Simulating naturally ventilated buildings with detailed CFD-based wind pressure database. In: SimBuild 2012, 5th National Conference of IBPSA-USA, Madison, WI. **Proceedings of...**, Madison, 2012.

WANG, L.; WONG, N.H. Coupled simulations for naturally ventilated rooms between building simulation (BS) and computational fluid dynamics (CFD) for better prediction of indoor thermal environment. **Building and Environment**, 2009; (44): 95-112.

APÊNDICES

A1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA A NBR 15.575

TABELA A1.1 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 0°, dia típico de inverno

HORA	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	16,78	16,01	15,73	16,01	16,01	15,80	15,58	16,33	16,56	15,60	16,33	15,70
1:00	9,90	16,52	15,40	15,14	15,43	15,37	15,22	15,07	16,17	16,39	15,08	16,14	15,14
2:00	9,47	16,27	14,85	14,60	14,89	14,80	14,70	14,61	16,02	16,24	14,61	15,96	14,64
3:00	9,09	16,02	14,35	14,13	14,40	14,28	14,23	14,18	15,88	16,10	14,16	15,79	14,19
4:00	8,79	15,78	13,90	13,70	13,94	13,81	13,82	13,78	15,74	15,97	13,75	15,62	13,79
5:00	8,86	15,58	13,51	13,34	13,53	13,41	13,46	13,43	15,62	15,86	13,39	15,48	13,45
6:00	9,50	15,43	13,22	13,07	13,22	13,11	13,20	13,16	15,56	15,81	13,11	15,40	13,20
7:00	11,17	15,41	13,24	13,03	13,25	13,13	13,27	13,22	15,64	15,99	13,02	15,46	13,15
8:00	13,47	15,50	13,84	13,51	13,73	13,74	13,86	13,71	15,85	16,28	13,36	15,64	13,59
9:00	15,71	15,69	15,02	14,60	14,67	14,95	14,96	14,60	16,10	16,56	14,17	15,90	14,60
10:00	17,69	15,98	16,58	16,11	15,88	16,55	16,41	15,70	16,39	16,82	15,25	16,24	16,00
11:00	19,19	16,33	18,29	17,81	17,26	18,32	18,07	16,96	16,67	17,08	16,47	16,58	17,58
12:00	20,29	16,72	20,04	19,54	18,77	20,13	19,78	18,31	16,93	17,35	17,79	16,93	19,21
13:00	21,06	17,20	21,55	21,08	20,11	21,69	21,24	19,48	17,19	17,61	19,02	17,27	20,67
14:00	21,30	17,72	22,65	22,24	21,11	22,82	22,28	20,32	17,40	17,81	20,02	17,58	21,80
15:00	20,83	18,13	23,15	22,83	21,65	23,33	22,76	20,74	17,53	17,93	20,60	17,77	22,36
16:00	19,91	18,30	22,95	22,71	21,66	23,14	22,61	20,68	17,55	17,94	20,61	17,84	22,24
17:00	18,75	18,26	22,15	21,92	21,16	22,33	21,87	20,17	17,49	17,86	20,10	17,76	21,46
18:00	17,09	18,18	21,10	20,86	20,36	21,26	20,81	19,41	17,35	17,69	19,40	17,59	20,46
19:00	15,52	18,00	20,00	19,71	19,48	20,13	19,69	18,59	17,18	17,47	18,61	17,38	19,40
20:00	14,29	17,80	19,02	18,70	18,67	19,12	18,70	17,87	17,01	17,28	17,92	17,16	18,47
21:00	13,16	17,56	18,18	17,86	17,96	18,25	17,88	17,26	16,84	17,08	17,31	16,95	17,69
22:00	12,18	17,30	17,40	17,10	17,28	17,44	17,13	16,68	16,66	16,90	16,71	16,73	16,98
23:00	11,30	17,04	16,68	16,39	16,63	16,70	16,44	16,11	16,50	16,72	16,14	16,53	16,32

TABELA A1.2 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 0°, dia típico de inverno (continua)

HORA	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	16,78	16,01	15,73	16,01	16,01	15,80	15,58	16,33	16,56	15,60	16,33	15,70
1:00	9,90	16,52	15,40	15,14	15,43	15,37	15,22	15,07	16,17	16,39	15,08	16,14	15,14
2:00	9,47	16,27	14,85	14,60	14,89	14,80	14,70	14,61	16,02	16,24	14,61	15,96	14,64
3:00	9,09	16,02	14,35	14,13	14,40	14,28	14,23	14,18	15,88	16,10	14,16	15,79	14,19
4:00	8,79	15,78	13,90	13,70	13,94	13,81	13,82	13,78	15,74	15,97	13,75	15,62	13,79
5:00	8,86	15,58	13,51	13,34	13,53	13,41	13,46	13,43	15,62	15,86	13,39	15,48	13,45
6:00	9,50	15,43	13,22	13,07	13,22	13,11	13,20	13,16	15,56	15,81	13,11	15,40	13,20
7:00	11,17	15,41	13,24	13,03	13,25	13,13	13,27	13,22	15,64	15,99	13,02	15,46	13,15
8:00	13,47	15,50	13,84	13,51	13,73	13,74	13,86	13,71	15,85	16,28	13,36	15,64	13,59
9:00	15,71	15,69	15,02	14,60	14,67	14,95	14,96	14,60	16,10	16,56	14,17	15,90	14,60
10:00	17,69	15,98	16,58	16,11	15,88	16,55	16,41	15,70	16,39	16,82	15,25	16,24	16,00

TABELA A1.2 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 0°, dia típico de inverno (conclusão)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
11:00	19,19	16,33	18,29	17,81	17,26	18,32	18,07	16,96	16,67	17,08	16,47	16,58	17,58
12:00	20,29	16,72	20,04	19,54	18,77	20,13	19,78	18,31	16,93	17,35	17,79	16,93	19,21
13:00	21,06	17,20	21,55	21,08	20,11	21,69	21,24	19,48	17,19	17,61	19,02	17,27	20,67
14:00	21,30	17,72	22,65	22,24	21,11	22,82	22,28	20,32	17,40	17,81	20,02	17,58	21,80
15:00	20,83	18,13	23,15	22,83	21,65	23,33	22,76	20,74	17,53	17,93	20,60	17,77	22,36
16:00	19,91	18,30	22,95	22,71	21,66	23,14	22,61	20,68	17,55	17,94	20,61	17,84	22,24
17:00	18,75	18,26	22,15	21,92	21,16	22,33	21,87	20,17	17,49	17,86	20,10	17,76	21,46
18:00	17,09	18,18	21,10	20,86	20,36	21,26	20,81	19,41	17,35	17,69	19,40	17,59	20,46
19:00	15,52	18,00	20,00	19,71	19,48	20,13	19,69	18,59	17,18	17,47	18,61	17,38	19,40
20:00	14,29	17,80	19,02	18,70	18,67	19,12	18,70	17,87	17,01	17,28	17,92	17,16	18,47
21:00	13,16	17,56	18,18	17,86	17,96	18,25	17,88	17,26	16,84	17,08	17,31	16,95	17,69
22:00	12,18	17,30	17,40	17,10	17,28	17,44	17,13	16,68	16,66	16,90	16,71	16,73	16,98
23:00	11,30	17,04	16,68	16,39	16,63	16,70	16,44	16,11	16,50	16,72	16,14	16,53	16,32

TABELA A1.3 – Temp. internas do ar (°C) 13° pav., orientação 0°, dia típico de inverno

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	16,78	16,01	15,73	16,01	16,01	15,80	15,58	16,33	16,56	15,60	16,33	15,70
1:00	9,90	16,52	15,40	15,14	15,43	15,37	15,22	15,07	16,17	16,39	15,08	16,14	15,14
2:00	9,47	16,27	14,85	14,60	14,89	14,80	14,70	14,61	16,02	16,24	14,61	15,96	14,64
3:00	9,09	16,02	14,35	14,13	14,40	14,28	14,23	14,18	15,88	16,10	14,16	15,79	14,19
4:00	8,79	15,78	13,90	13,70	13,94	13,81	13,82	13,78	15,74	15,97	13,75	15,62	13,79
5:00	8,86	15,58	13,51	13,34	13,53	13,41	13,46	13,43	15,62	15,86	13,39	15,48	13,45
6:00	9,50	15,43	13,22	13,07	13,22	13,11	13,20	13,16	15,56	15,81	13,11	15,40	13,20
7:00	11,17	15,41	13,24	13,03	13,25	13,13	13,27	13,22	15,64	15,99	13,02	15,46	13,15
8:00	13,47	15,50	13,84	13,51	13,73	13,74	13,86	13,71	15,85	16,28	13,36	15,64	13,59
9:00	15,71	15,69	15,02	14,60	14,67	14,95	14,96	14,60	16,10	16,56	14,17	15,90	14,60
10:00	17,69	15,98	16,58	16,11	15,88	16,55	16,41	15,70	16,39	16,82	15,25	16,24	16,00
11:00	19,19	16,33	18,29	17,81	17,26	18,32	18,07	16,96	16,67	17,08	16,47	16,58	17,58
12:00	20,29	16,72	20,04	19,54	18,77	20,13	19,78	18,31	16,93	17,35	17,79	16,93	19,21
13:00	21,06	17,20	21,55	21,08	20,11	21,69	21,24	19,48	17,19	17,61	19,02	17,27	20,67
14:00	21,30	17,72	22,65	22,24	21,11	22,82	22,28	20,32	17,40	17,81	20,02	17,58	21,80
15:00	20,83	18,13	23,15	22,83	21,65	23,33	22,76	20,74	17,53	17,93	20,60	17,77	22,36
16:00	19,91	18,30	22,95	22,71	21,66	23,14	22,61	20,68	17,55	17,94	20,61	17,84	22,24
17:00	18,75	18,26	22,15	21,92	21,16	22,33	21,87	20,17	17,49	17,86	20,10	17,76	21,46
18:00	17,09	18,18	21,10	20,86	20,36	21,26	20,81	19,41	17,35	17,69	19,40	17,59	20,46
19:00	15,52	18,00	20,00	19,71	19,48	20,13	19,69	18,59	17,18	17,47	18,61	17,38	19,40
20:00	14,29	17,80	19,02	18,70	18,67	19,12	18,70	17,87	17,01	17,28	17,92	17,16	18,47
21:00	13,16	17,56	18,18	17,86	17,96	18,25	17,88	17,26	16,84	17,08	17,31	16,95	17,69
22:00	12,18	17,30	17,40	17,10	17,28	17,44	17,13	16,68	16,66	16,90	16,71	16,73	16,98
23:00	11,30	17,04	16,68	16,39	16,63	16,70	16,44	16,11	16,50	16,72	16,14	16,53	16,32

TABELA A1.4 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 45°, dia típico de inverno

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	16,48	15,93	15,61	16,09	15,97	15,89	15,84	16,38	16,67	15,46	16,32	15,59
1:00	9,90	16,24	15,32	15,03	15,51	15,33	15,30	15,31	16,21	16,49	14,96	16,12	15,04
2:00	9,47	16,01	14,77	14,51	14,96	14,76	14,78	14,82	16,06	16,33	14,49	15,94	14,55
3:00	9,09	15,79	14,28	14,04	14,45	14,25	14,30	14,37	15,91	16,18	14,06	15,77	14,11
4:00	8,79	15,57	13,83	13,62	13,99	13,78	13,88	13,96	15,77	16,03	13,66	15,61	13,72
5:00	8,86	15,38	13,45	13,26	13,58	13,38	13,51	13,59	15,65	15,92	13,30	15,47	13,38
6:00	9,50	15,25	13,16	13,01	13,26	13,08	13,24	13,31	15,59	15,86	13,03	15,39	13,14
7:00	11,17	15,23	13,09	12,97	13,31	13,02	13,33	13,39	15,69	16,05	12,95	15,46	13,10
8:00	13,47	15,31	13,53	13,45	13,82	13,48	13,95	13,94	15,90	16,39	13,33	15,66	13,55
9:00	15,71	15,46	14,57	14,54	14,79	14,54	15,13	14,94	16,17	16,74	14,18	15,93	14,56
10:00	17,69	15,71	16,03	16,05	16,06	16,04	16,70	16,20	16,48	17,11	15,30	16,28	15,97
11:00	19,19	16,01	17,77	17,74	17,42	17,83	18,41	17,55	16,77	17,42	16,57	16,62	17,55
12:00	20,29	16,35	19,62	19,47	18,85	19,72	20,07	18,93	17,04	17,67	17,93	16,97	19,17
13:00	21,06	16,73	21,22	20,96	20,13	21,38	21,49	20,11	17,29	17,89	19,12	17,31	20,56
14:00	21,30	17,11	22,39	22,02	21,13	22,59	22,50	20,98	17,51	18,08	20,01	17,59	21,56
15:00	20,83	17,42	22,98	22,53	21,69	23,20	22,97	21,40	17,63	18,17	20,47	17,77	22,03
16:00	19,91	17,64	22,87	22,42	21,74	23,09	22,81	21,31	17,65	18,17	20,47	17,82	21,92
17:00	18,75	17,72	22,02	21,70	21,28	22,24	22,05	20,75	17,58	18,07	20,00	17,75	21,24
18:00	17,09	17,68	20,98	20,66	20,49	21,18	20,98	19,93	17,44	17,89	19,27	17,59	20,27
19:00	15,52	17,55	19,90	19,55	19,60	20,08	19,85	19,05	17,26	17,66	18,49	17,38	19,24
20:00	14,29	17,38	18,90	18,54	18,78	19,06	18,84	18,28	17,08	17,44	17,77	17,16	18,31
21:00	13,16	17,17	18,07	17,70	18,07	18,19	18,00	17,62	16,90	17,24	17,15	16,94	17,54
22:00	12,18	16,95	17,31	16,95	17,38	17,40	17,24	17,00	16,72	17,04	16,57	16,72	16,84
23:00	11,30	16,71	16,59	16,26	16,72	16,65	16,54	16,40	16,55	16,85	16,00	16,52	16,19

TABELA A1.5 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 45°, dia típico de inverno (continua)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	16,27	16,48	16,31	16,43	16,52	16,50	16,14	16,17	16,38	15,92	16,14	16,27
1:00	9,90	16,07	16,31	16,20	16,20	16,35	16,37	15,95	16,04	16,26	15,76	16,00	16,16
2:00	9,47	15,88	16,16	16,09	15,98	16,19	16,26	15,77	15,91	16,15	15,60	15,89	16,06
3:00	9,09	15,69	16,01	16,00	15,77	16,04	16,16	15,59	15,79	16,04	15,44	15,77	15,96
4:00	8,79	15,50	15,87	15,90	15,56	15,90	16,05	15,41	15,67	15,93	15,27	15,65	15,87
5:00	8,86	15,34	15,76	15,82	15,38	15,78	15,97	15,25	15,58	15,85	15,13	15,56	15,79
6:00	9,50	15,23	15,70	15,79	15,27	15,72	15,94	15,15	15,53	15,82	15,03	15,51	15,77
7:00	11,17	15,23	15,76	15,88	15,44	15,80	16,16	15,32	15,65	16,05	15,04	15,61	15,86
8:00	13,47	15,32	15,95	16,07	15,71	16,01	16,50	15,58	15,88	16,41	15,15	15,82	16,05
9:00	15,71	15,45	16,18	16,30	15,98	16,25	16,81	15,84	16,12	16,73	15,31	16,05	16,28
10:00	17,69	15,65	16,45	16,52	16,27	16,53	17,07	16,13	16,38	17,01	15,52	16,30	16,50
11:00	19,19	15,87	16,79	16,72	16,53	16,87	17,26	16,37	16,60	17,21	15,74	16,52	16,70
12:00	20,29	16,12	17,16	16,89	16,77	17,24	17,37	16,56	16,79	17,32	15,96	16,71	16,86
13:00	21,06	16,40	17,51	17,04	17,03	17,59	17,45	16,76	16,96	17,41	16,19	16,89	17,01
14:00	21,30	16,68	17,79	17,16	17,30	17,86	17,53	16,95	17,09	17,48	16,40	17,02	17,12

TABELA A1.5 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 45°, dia típico de inverno (conclusão)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
15:00	20,83	16,91	17,94	17,22	17,52	18,01	17,55	17,08	17,15	17,49	16,56	17,09	17,17
16:00	19,91	17,07	17,90	17,21	17,63	17,97	17,51	17,14	17,14	17,44	16,67	17,08	17,16
17:00	18,75	17,16	17,64	17,14	17,65	17,71	17,41	17,14	17,08	17,35	16,70	17,02	17,09
18:00	17,09	17,16	17,50	17,03	17,59	17,56	17,29	17,08	16,98	17,22	16,68	16,92	16,99
19:00	15,52	17,09	17,34	16,90	17,46	17,39	17,14	16,96	16,84	17,06	16,59	16,79	16,85
20:00	14,29	16,97	17,18	16,78	17,30	17,23	17,01	16,83	16,71	16,92	16,49	16,66	16,73
21:00	13,16	16,83	17,00	16,66	17,10	17,05	16,88	16,68	16,57	16,78	16,37	16,53	16,61
22:00	12,18	16,65	16,82	16,53	16,88	16,87	16,74	16,50	16,44	16,64	16,23	16,40	16,49
23:00	11,30	16,46	16,65	16,42	16,66	16,69	16,61	16,32	16,30	16,51	16,08	16,26	16,38

TABELA A1.6 – Temperaturas internas do ar no (°C) 13° pav., orientação 45°, dia típico de inverno

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	14,86	14,89	14,46	15,10	14,93	14,75	14,78	14,50	14,69	14,46	14,44	14,49
1:00	9,90	14,62	14,67	14,29	14,85	14,73	14,58	14,54	14,31	14,52	14,25	14,25	14,33
2:00	9,47	14,38	14,46	14,12	14,60	14,53	14,42	14,30	14,12	14,35	14,04	14,07	14,18
3:00	9,09	14,14	14,24	13,96	14,35	14,32	14,25	14,05	13,94	14,18	13,81	13,89	14,03
4:00	8,79	13,89	14,03	13,79	14,09	14,11	14,08	13,80	13,75	14,00	13,59	13,70	13,87
5:00	8,86	13,66	13,84	13,65	13,85	13,92	13,93	13,58	13,58	13,85	13,38	13,54	13,73
6:00	9,50	13,49	13,71	13,56	13,66	13,78	13,83	13,41	13,47	13,75	13,23	13,43	13,64
7:00	11,17	13,44	13,71	13,60	13,58	13,74	13,96	13,57	13,55	13,90	13,21	13,49	13,67
8:00	13,47	13,51	13,85	13,79	13,62	13,82	14,26	13,87	13,76	14,21	13,30	13,68	13,82
9:00	15,71	13,66	14,07	14,05	13,76	13,96	14,56	14,16	14,02	14,54	13,47	13,92	14,04
10:00	17,69	13,87	14,35	14,34	14,00	14,16	14,87	14,49	14,33	14,88	13,71	14,21	14,29
11:00	19,19	14,15	14,74	14,62	14,30	14,40	15,11	14,79	14,63	15,14	13,99	14,51	14,54
12:00	20,29	14,46	15,18	14,88	14,64	14,68	15,30	15,05	14,91	15,35	14,29	14,79	14,78
13:00	21,06	14,81	15,62	15,13	15,02	14,98	15,48	15,31	15,17	15,53	14,60	15,06	15,01
14:00	21,30	15,16	16,01	15,35	15,39	15,28	15,64	15,57	15,39	15,69	14,89	15,29	15,21
15:00	20,83	15,46	16,28	15,49	15,70	15,54	15,74	15,76	15,54	15,79	15,13	15,44	15,34
16:00	19,91	15,68	16,34	15,56	15,93	15,73	15,78	15,88	15,59	15,82	15,29	15,49	15,41
17:00	18,75	15,82	16,16	15,54	16,09	15,84	15,76	15,92	15,56	15,78	15,36	15,47	15,40
18:00	17,09	15,85	16,05	15,44	16,12	15,84	15,67	15,87	15,47	15,68	15,35	15,39	15,32
19:00	15,52	15,78	15,89	15,27	16,05	15,76	15,52	15,74	15,32	15,52	15,25	15,24	15,18
20:00	14,29	15,65	15,69	15,07	15,93	15,62	15,35	15,58	15,14	15,32	15,13	15,06	15,01
21:00	13,16	15,47	15,47	14,90	15,75	15,45	15,18	15,39	14,97	15,14	14,97	14,90	14,86
22:00	12,18	15,27	15,27	14,73	15,53	15,27	15,02	15,18	14,80	14,97	14,80	14,73	14,72
23:00	11,30	15,05	15,05	14,57	15,30	15,08	14,86	14,97	14,63	14,81	14,62	14,57	14,58

TABELA A1.7 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 90°, dia típico de inverno

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	16,26	15,73	15,59	16,09	15,81	16,00	16,16	16,56	16,84	15,58	16,47	15,60
1:00	9,90	16,04	15,15	15,01	15,50	15,20	15,40	15,61	16,38	16,65	15,06	16,26	15,05
2:00	9,47	15,84	14,62	14,49	14,96	14,64	14,86	15,09	16,22	16,48	14,59	16,07	14,56
3:00	9,09	15,63	14,14	14,02	14,45	14,14	14,38	14,62	16,06	16,31	14,15	15,89	14,12
4:00	8,79	15,43	13,71	13,60	13,98	13,68	13,95	14,18	15,90	16,16	13,74	15,72	13,73
5:00	8,86	15,26	13,34	13,25	13,57	13,29	13,58	13,80	15,78	16,03	13,38	15,57	13,39
6:00	9,50	15,14	13,06	13,00	13,25	13,00	13,30	13,49	15,71	15,96	13,10	15,49	13,15
7:00	11,17	15,12	13,00	12,96	13,20	12,93	13,29	13,46	15,98	16,07	13,03	15,75	13,11
8:00	13,47	15,21	13,44	13,44	13,64	13,38	13,85	13,96	16,36	16,35	13,43	16,13	13,56
9:00	15,71	15,37	14,46	14,53	14,63	14,44	15,02	14,99	16,66	16,69	14,32	16,44	14,59
10:00	17,69	15,61	15,87	16,03	15,92	15,90	16,62	16,31	16,90	17,09	15,49	16,71	16,00
11:00	19,19	15,89	17,46	17,72	17,34	17,56	18,41	17,81	17,14	17,47	16,83	17,00	17,58
12:00	20,29	16,20	19,13	19,45	18,84	19,31	20,20	19,33	17,42	17,84	18,24	17,34	19,20
13:00	21,06	16,53	20,67	20,93	20,17	20,90	21,72	20,63	17,69	18,17	19,45	17,68	20,59
14:00	21,30	16,86	21,89	22,00	21,18	22,17	22,78	21,54	17,90	18,41	20,33	17,94	21,59
15:00	20,83	17,13	22,54	22,50	21,74	22,84	23,25	21,98	18,00	18,52	20,77	18,10	22,06
16:00	19,91	17,32	22,43	22,38	21,75	22,74	23,05	21,87	18,00	18,48	20,74	18,12	21,93
17:00	18,75	17,39	21,62	21,67	21,24	21,92	22,24	21,26	17,90	18,33	20,24	18,03	21,26
18:00	17,09	17,35	20,62	20,62	20,46	20,90	21,14	20,41	17,73	18,15	19,49	17,84	20,28
19:00	15,52	17,22	19,56	19,49	19,58	19,81	20,00	19,52	17,52	17,90	18,66	17,59	19,23
20:00	14,29	17,07	18,60	18,50	18,77	18,81	19,00	18,72	17,32	17,67	17,93	17,36	18,32
21:00	13,16	16,88	17,80	17,66	18,06	17,97	18,15	18,03	17,13	17,45	17,30	17,13	17,55
22:00	12,18	16,68	17,06	16,92	17,37	17,20	17,38	17,38	16,93	17,24	16,70	16,90	16,85
23:00	11,30	16,47	16,38	16,23	16,72	16,48	16,66	16,76	16,75	17,03	16,13	16,68	16,20

TABELA A1.8 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 90°, dia típico de inverno (continua)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	16,11	16,35	16,33	16,46	16,42	16,63	16,45	16,33	16,55	16,04	16,27	16,32
1:00	9,90	15,93	16,20	16,22	16,23	16,26	16,50	16,23	16,18	16,41	15,86	16,13	16,21
2:00	9,47	15,76	16,07	16,12	16,01	16,12	16,38	16,02	16,05	16,29	15,70	16,00	16,11
3:00	9,09	15,58	15,93	16,02	15,79	15,98	16,26	15,82	15,92	16,17	15,53	15,87	16,01
4:00	8,79	15,41	15,80	15,92	15,58	15,85	16,15	15,62	15,79	16,05	15,36	15,75	15,91
5:00	8,86	15,26	15,70	15,85	15,41	15,74	16,06	15,45	15,69	15,96	15,22	15,65	15,84
6:00	9,50	15,16	15,65	15,82	15,29	15,68	16,02	15,33	15,65	15,92	15,11	15,61	15,81
7:00	11,17	15,16	15,72	15,90	15,36	15,76	16,15	15,40	15,93	16,06	15,13	15,90	15,90
8:00	13,47	15,25	15,91	16,09	15,57	15,96	16,42	15,62	16,32	16,35	15,26	16,28	16,10
9:00	15,71	15,40	16,13	16,31	15,84	16,19	16,73	15,90	16,59	16,68	15,45	16,54	16,33
10:00	17,69	15,59	16,38	16,54	16,17	16,45	17,03	16,25	16,77	16,99	15,70	16,70	16,56
11:00	19,19	15,80	16,59	16,74	16,49	16,68	17,30	16,61	16,94	17,27	15,96	16,86	16,75
12:00	20,29	16,02	16,80	16,91	16,81	16,90	17,52	16,95	17,13	17,51	16,21	17,03	16,92
13:00	21,06	16,26	17,08	17,06	17,13	17,19	17,72	17,27	17,31	17,71	16,46	17,20	17,07
14:00	21,30	16,50	17,42	17,18	17,41	17,53	17,85	17,51	17,44	17,84	16,66	17,32	17,19

TABELA A1.8 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 90°, dia típico de inverno (conclusão)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
15:00	20,83	16,71	17,65	17,24	17,62	17,75	17,87	17,65	17,48	17,86	16,81	17,37	17,23
16:00	19,91	16,85	17,61	17,22	17,70	17,71	17,78	17,67	17,44	17,76	16,89	17,34	17,21
17:00	18,75	16,91	17,37	17,15	17,68	17,47	17,63	17,63	17,35	17,60	16,90	17,25	17,14
18:00	17,09	16,90	17,24	17,04	17,62	17,33	17,49	17,54	17,22	17,46	16,86	17,13	17,04
19:00	15,52	16,83	17,09	16,90	17,48	17,18	17,33	17,40	17,06	17,29	16,76	16,98	16,90
20:00	14,29	16,73	16,96	16,79	17,32	17,04	17,20	17,25	16,92	17,14	16,65	16,84	16,78
21:00	13,16	16,60	16,81	16,67	17,13	16,89	17,05	17,07	16,77	16,98	16,51	16,70	16,66
22:00	12,18	16,45	16,65	16,55	16,91	16,73	16,90	16,87	16,62	16,83	16,36	16,55	16,54
23:00	11,30	16,28	16,50	16,43	16,69	16,57	16,76	16,66	16,47	16,68	16,20	16,41	16,42

TABELA A1.9 – Temperaturas internas do ar (°C) 13° pav., orientação 90°, dia típico de inverno

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	14,72	14,75	14,53	15,15	14,87	14,98	15,18	14,75	14,96	14,65	14,66	14,61
1:00	9,90	14,50	14,56	14,36	14,90	14,68	14,80	14,91	14,55	14,77	14,42	14,46	14,45
2:00	9,47	14,28	14,37	14,20	14,65	14,49	14,62	14,64	14,36	14,59	14,20	14,27	14,30
3:00	9,09	14,04	14,17	14,04	14,40	14,30	14,45	14,37	14,16	14,41	13,97	14,08	14,15
4:00	8,79	13,81	13,98	13,88	14,15	14,10	14,27	14,11	13,96	14,22	13,74	13,89	13,99
5:00	8,86	13,60	13,80	13,73	13,91	13,92	14,11	13,86	13,78	14,06	13,52	13,71	13,85
6:00	9,50	13,44	13,68	13,65	13,72	13,79	14,00	13,67	13,67	13,95	13,37	13,61	13,75
7:00	11,17	13,40	13,70	13,69	13,64	13,75	14,05	13,71	13,93	14,01	13,36	13,87	13,78
8:00	13,47	13,48	13,84	13,87	13,67	13,82	14,27	13,94	14,35	14,26	13,47	14,29	13,94
9:00	15,71	13,63	14,06	14,12	13,80	13,97	14,56	14,25	14,65	14,58	13,68	14,57	14,16
10:00	17,69	13,85	14,32	14,42	14,01	14,18	14,89	14,66	14,88	14,93	13,96	14,78	14,42
11:00	19,19	14,11	14,59	14,70	14,28	14,41	15,20	15,11	15,10	15,27	14,28	14,98	14,67
12:00	20,29	14,39	14,86	14,96	14,60	14,65	15,51	15,54	15,36	15,59	14,60	15,22	14,91
13:00	21,06	14,70	15,23	15,21	14,95	14,92	15,79	15,94	15,62	15,88	14,93	15,48	15,14
14:00	21,30	15,01	15,64	15,42	15,29	15,19	16,01	16,25	15,84	16,11	15,21	15,69	15,34
15:00	20,83	15,29	15,94	15,56	15,61	15,42	16,13	16,44	15,97	16,23	15,43	15,81	15,47
16:00	19,91	15,48	16,00	15,62	15,88	15,59	16,13	16,51	15,99	16,22	15,56	15,84	15,53
17:00	18,75	15,58	15,84	15,59	16,07	15,68	16,06	16,49	15,93	16,14	15,61	15,79	15,52
18:00	17,09	15,60	15,75	15,50	16,12	15,68	15,97	16,43	15,82	16,02	15,59	15,69	15,44
19:00	15,52	15,53	15,61	15,32	16,06	15,59	15,81	16,28	15,64	15,85	15,48	15,52	15,29
20:00	14,29	15,42	15,43	15,13	15,94	15,47	15,63	16,11	15,46	15,65	15,35	15,34	15,12
21:00	13,16	15,25	15,25	14,96	15,77	15,32	15,44	15,88	15,27	15,45	15,18	15,16	14,98
22:00	12,18	15,08	15,08	14,80	15,56	15,16	15,27	15,64	15,09	15,27	15,01	14,98	14,84
23:00	11,30	14,89	14,90	14,64	15,34	15,00	15,10	15,40	14,90	15,09	14,81	14,80	14,70

TABELA A1.10 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 0°, dia típico de verão

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	22,59	22,34	22,22	23,24	22,42	22,08	23,16	21,67	21,41	23,17	21,79	21,99
1:00	9,90	22,37	21,79	21,65	22,72	21,85	21,53	22,66	21,50	21,25	22,67	21,59	21,46
2:00	9,47	22,16	21,29	21,14	22,24	21,33	21,02	22,20	21,35	21,11	22,21	21,41	20,98
3:00	9,09	21,95	20,84	20,68	21,80	20,87	20,57	21,78	21,20	20,97	21,78	21,23	20,55
4:00	8,79	21,75	20,44	20,27	21,39	20,45	20,17	21,39	21,06	20,83	21,39	21,06	20,17
5:00	8,86	21,58	20,11	19,94	21,04	20,10	19,85	21,06	20,94	20,73	21,05	20,93	19,86
6:00	9,50	21,48	19,95	19,78	20,90	19,95	19,74	20,93	20,93	20,75	20,86	20,90	19,71
7:00	11,17	21,49	20,22	20,07	21,14	20,22	20,09	21,18	21,05	20,89	21,01	20,99	19,97
8:00	13,47	21,62	20,96	20,85	21,79	20,97	20,90	21,82	21,26	21,12	21,56	21,21	20,69
9:00	15,71	21,83	22,02	21,97	22,70	22,07	22,01	22,71	21,51	21,36	22,38	21,49	21,70
10:00	17,69	22,08	23,35	23,38	23,83	23,44	23,40	23,81	21,78	21,61	23,42	21,81	22,99
11:00	19,19	22,35	24,72	24,83	25,01	24,88	24,84	24,96	22,03	21,84	24,50	22,13	24,34
12:00	20,29	22,64	26,02	26,21	26,14	26,24	26,21	26,03	22,27	22,06	25,55	22,44	25,62
13:00	21,06	22,95	27,15	27,40	27,12	27,39	27,37	26,95	22,49	22,27	26,51	22,72	26,75
14:00	21,30	23,25	27,98	28,30	27,85	28,23	28,20	27,64	22,66	22,44	27,28	22,96	27,59
15:00	20,83	23,48	28,43	28,79	28,27	28,71	28,63	28,04	22,77	22,54	27,75	23,11	28,05
16:00	19,91	23,62	28,45	28,81	28,34	28,73	28,60	28,09	22,81	22,57	27,87	23,18	28,07
17:00	18,75	23,65	28,03	28,33	28,04	28,30	28,12	27,77	22,77	22,53	27,60	23,14	27,62
18:00	17,09	23,59	27,19	27,42	27,38	27,45	27,21	27,10	22,65	22,42	26,96	23,00	26,76
19:00	15,52	23,49	26,16	26,31	26,51	26,38	26,11	26,27	22,51	22,26	26,20	22,82	25,75
20:00	14,29	23,36	25,20	25,28	25,73	25,39	25,08	25,52	22,36	22,10	25,49	22,63	24,80
21:00	13,16	23,20	24,35	24,36	25,02	24,51	24,18	24,85	22,20	21,94	24,84	22,43	23,96
22:00	12,18	23,01	23,60	23,56	24,38	23,73	23,39	24,24	22,03	21,76	24,25	22,22	23,22
23:00	11,30	22,81	22,93	22,85	23,80	23,04	22,69	23,69	21,85	21,59	23,70	22,01	22,57

TABELA A1.11 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 0°, dia típico de verão (continua)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	22,80	21,94	21,71	22,77	21,93	21,64	22,89	21,99	21,77	22,86	21,99	21,72
1:00	9,90	22,63	21,81	21,60	22,60	21,80	21,53	22,71	21,86	21,66	22,68	21,85	21,61
2:00	9,47	22,45	21,69	21,50	22,42	21,68	21,44	22,54	21,74	21,56	22,50	21,73	21,51
3:00	9,09	22,28	21,57	21,39	22,25	21,56	21,34	22,37	21,61	21,46	22,32	21,61	21,41
4:00	8,79	22,11	21,46	21,30	22,08	21,45	21,25	22,20	21,50	21,37	22,15	21,49	21,31
5:00	8,86	21,97	21,37	21,22	21,94	21,37	21,19	22,06	21,41	21,30	22,00	21,40	21,24
6:00	9,50	21,89	21,37	21,23	21,93	21,37	21,24	22,04	21,42	21,35	21,92	21,41	21,24
7:00	11,17	21,91	21,48	21,33	22,03	21,49	21,40	22,13	21,55	21,52	21,94	21,53	21,34
8:00	13,47	22,03	21,67	21,50	22,22	21,69	21,60	22,30	21,75	21,73	22,07	21,72	21,51
9:00	15,71	22,21	21,89	21,70	22,44	21,91	21,79	22,50	21,98	21,94	22,25	21,94	21,71
10:00	17,69	22,41	22,12	21,89	22,65	22,14	21,95	22,70	22,21	22,12	22,46	22,17	21,91
11:00	19,19	22,61	22,31	22,06	22,85	22,33	22,09	22,89	22,40	22,25	22,66	22,37	22,07
12:00	20,29	22,82	22,48	22,21	23,06	22,50	22,21	23,08	22,57	22,38	22,87	22,54	22,22
13:00	21,06	23,06	22,64	22,36	23,26	22,65	22,32	23,28	22,72	22,50	23,11	22,70	22,38
14:00	21,30	23,29	22,75	22,50	23,43	22,76	22,40	23,44	22,84	22,58	23,34	22,82	22,52

TABELA A1.11 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 0°, dia típico de verão (conclusão)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
15:00	20,83	23,46	22,82	22,59	23,55	22,81	22,44	23,57	22,90	22,62	23,52	22,89	22,61
16:00	19,91	23,58	22,82	22,61	23,61	22,81	22,43	23,65	22,91	22,61	23,64	22,91	22,62
17:00	18,75	23,60	22,78	22,54	23,63	22,76	22,37	23,68	22,86	22,55	23,67	22,86	22,56
18:00	17,09	23,56	22,67	22,41	23,59	22,66	22,28	23,65	22,75	22,45	23,63	22,75	22,43
19:00	15,52	23,50	22,55	22,29	23,51	22,55	22,17	23,59	22,63	22,33	23,57	22,63	22,31
20:00	14,29	23,41	22,44	22,18	23,41	22,44	22,07	23,50	22,52	22,22	23,49	22,51	22,20
21:00	13,16	23,29	22,33	22,07	23,28	22,32	21,96	23,38	22,40	22,11	23,36	22,39	22,08
22:00	12,18	23,14	22,20	21,95	23,12	22,19	21,86	23,23	22,27	22,00	23,21	22,26	21,97
23:00	11,30	22,98	22,08	21,84	22,96	22,07	21,75	23,07	22,14	21,89	23,04	22,13	21,85

TABELA A1.12 – Temp. internas do ar (°C) 13° pav., orientação 0°, dia típico de verão

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	26,26	26,05	26,04	26,16	26,07	26,08	26,25	26,09	26,07	26,31	26,10	26,12
1:00	9,90	26,06	25,89	25,89	25,98	25,93	25,94	26,05	25,92	25,93	26,10	25,93	25,97
2:00	9,47	25,86	25,74	25,75	25,79	25,78	25,81	25,84	25,76	25,80	25,90	25,77	25,84
3:00	9,09	25,65	25,58	25,60	25,60	25,63	25,68	25,63	25,60	25,66	25,68	25,60	25,69
4:00	8,79	25,45	25,42	25,46	25,41	25,47	25,55	25,42	25,43	25,52	25,47	25,44	25,55
5:00	8,86	25,26	25,29	25,33	25,23	25,33	25,43	25,24	25,29	25,40	25,28	25,30	25,43
6:00	9,50	25,15	25,23	25,27	25,10	25,24	25,41	25,19	25,26	25,39	25,16	25,26	25,37
7:00	11,17	25,14	25,28	25,33	25,06	25,22	25,50	25,27	25,35	25,49	25,16	25,34	25,41
8:00	13,47	25,23	25,43	25,50	25,13	25,31	25,67	25,42	25,53	25,67	25,26	25,51	25,55
9:00	15,71	25,39	25,64	25,73	25,28	25,46	25,86	25,61	25,77	25,89	25,43	25,75	25,75
10:00	17,69	25,61	25,88	25,98	25,49	25,65	26,06	25,83	26,04	26,10	25,66	26,01	25,97
11:00	19,19	25,85	26,12	26,21	25,72	25,85	26,25	26,07	26,29	26,30	25,91	26,27	26,18
12:00	20,29	26,12	26,36	26,44	25,97	26,06	26,43	26,33	26,53	26,49	26,19	26,51	26,39
13:00	21,06	26,43	26,60	26,68	26,23	26,28	26,62	26,61	26,78	26,69	26,52	26,76	26,62
14:00	21,30	26,74	26,80	26,91	26,48	26,48	26,78	26,86	26,98	26,85	26,84	26,98	26,85
15:00	20,83	27,00	26,95	27,07	26,68	26,65	26,89	27,05	27,12	26,97	27,11	27,13	27,02
16:00	19,91	27,17	27,02	27,15	26,84	26,76	26,94	27,18	27,19	27,01	27,28	27,20	27,10
17:00	18,75	27,23	27,02	27,12	26,94	26,82	26,94	27,23	27,16	27,00	27,32	27,18	27,09
18:00	17,09	27,17	26,94	27,01	26,95	26,81	26,87	27,19	27,05	26,92	27,27	27,06	26,98
19:00	15,52	27,10	26,82	26,86	26,90	26,74	26,76	27,11	26,92	26,80	27,19	26,93	26,86
20:00	14,29	26,99	26,68	26,70	26,81	26,64	26,63	27,00	26,77	26,66	27,08	26,78	26,72
21:00	13,16	26,83	26,52	26,53	26,68	26,51	26,49	26,84	26,61	26,51	26,92	26,61	26,57
22:00	12,18	26,66	26,38	26,38	26,52	26,38	26,36	26,66	26,45	26,37	26,73	26,46	26,43
23:00	11,30	26,47	26,23	26,23	26,36	26,24	26,24	26,47	26,29	26,24	26,54	26,30	26,29

TABELA A1.13 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 45°, dia típico de verão

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	22,66	22,43	22,21	23,29	22,50	22,06	23,22	21,68	21,39	23,27	21,81	21,99
1:00	9,90	22,44	21,87	21,64	22,76	21,92	21,51	22,71	21,51	21,23	22,75	21,61	21,46
2:00	9,47	22,22	21,36	21,13	22,28	21,39	21,01	22,25	21,36	21,09	22,28	21,42	20,98
3:00	9,09	22,01	20,91	20,68	21,83	20,92	20,56	21,82	21,20	20,95	21,85	21,24	20,55
4:00	8,79	21,81	20,50	20,27	21,42	20,50	20,16	21,42	21,06	20,82	21,45	21,07	20,17
5:00	8,86	21,63	20,16	19,94	21,07	20,15	19,83	21,09	20,95	20,71	21,10	20,94	19,85
6:00	9,50	21,52	20,00	19,78	20,88	19,98	19,69	20,92	21,00	20,70	20,91	20,97	19,71
7:00	11,17	21,53	20,27	20,06	21,08	20,24	20,00	21,17	21,18	20,81	21,09	21,14	19,97
8:00	13,47	21,66	21,00	20,84	21,71	20,98	20,79	21,83	21,42	21,02	21,69	21,38	20,69
9:00	15,71	21,86	22,07	21,96	22,61	22,07	21,90	22,78	21,66	21,26	22,57	21,66	21,71
10:00	17,69	22,11	23,40	23,35	23,75	23,45	23,29	23,97	21,91	21,52	23,69	21,96	22,99
11:00	19,19	22,38	24,79	24,81	24,93	24,87	24,75	25,20	22,15	21,76	24,87	22,26	24,35
12:00	20,29	22,67	26,13	26,20	26,05	26,24	26,13	26,35	22,37	22,00	25,99	22,55	25,63
13:00	21,06	22,98	27,28	27,38	27,03	27,43	27,29	27,32	22,58	22,21	26,97	22,83	26,75
14:00	21,30	23,27	28,15	28,27	27,79	28,32	28,13	28,01	22,74	22,38	27,74	23,05	27,58
15:00	20,83	23,51	28,63	28,75	28,24	28,83	28,56	28,40	22,84	22,48	28,19	23,19	28,04
16:00	19,91	23,67	28,66	28,78	28,34	28,87	28,55	28,42	22,86	22,52	28,28	23,24	28,06
17:00	18,75	23,72	28,22	28,31	28,06	28,43	28,07	28,07	22,81	22,48	27,97	23,20	27,62
18:00	17,09	23,67	27,35	27,40	27,40	27,56	27,17	27,35	22,69	22,37	27,28	23,05	26,76
19:00	15,52	23,58	26,31	26,29	26,55	26,48	26,07	26,46	22,54	22,22	26,45	22,86	25,75
20:00	14,29	23,45	25,34	25,26	25,78	25,49	25,04	25,66	22,39	22,07	25,69	22,67	24,80
21:00	13,16	23,28	24,47	24,35	25,07	24,60	24,14	24,96	22,22	21,91	25,00	22,46	23,96
22:00	12,18	23,09	23,71	23,55	24,44	23,82	23,36	24,33	22,05	21,73	24,38	22,25	23,22
23:00	11,30	22,89	23,04	22,84	23,85	23,12	22,67	23,76	21,87	21,56	23,82	22,03	22,57

TABELA A1.14 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 45°, dia típico de verão (continua)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	22,85	21,99	21,70	22,80	21,98	21,62	22,85	21,99	21,74	22,85	21,99	21,71
1:00	9,90	22,67	21,85	21,59	22,62	21,84	21,51	22,68	21,85	21,63	22,67	21,85	21,60
2:00	9,47	22,49	21,73	21,49	22,45	21,72	21,42	22,51	21,73	21,54	22,49	21,73	21,50
3:00	9,09	22,32	21,61	21,39	22,27	21,60	21,33	22,34	21,61	21,44	22,32	21,61	21,39
4:00	8,79	22,14	21,49	21,29	22,10	21,48	21,24	22,18	21,49	21,35	22,14	21,49	21,30
5:00	8,86	21,99	21,40	21,22	21,96	21,39	21,17	22,04	21,41	21,28	21,99	21,40	21,23
6:00	9,50	21,92	21,39	21,22	21,90	21,39	21,19	21,98	21,48	21,30	21,92	21,47	21,23
7:00	11,17	21,94	21,50	21,32	21,97	21,50	21,31	22,04	21,67	21,43	21,95	21,66	21,33
8:00	13,47	22,05	21,69	21,49	22,13	21,69	21,49	22,20	21,89	21,63	22,08	21,88	21,51
9:00	15,71	22,23	21,90	21,69	22,34	21,91	21,67	22,41	22,11	21,83	22,28	22,09	21,70
10:00	17,69	22,43	22,13	21,88	22,57	22,13	21,86	22,64	22,32	22,03	22,51	22,30	21,90
11:00	19,19	22,63	22,32	22,05	22,78	22,33	22,01	22,86	22,49	22,18	22,72	22,47	22,07
12:00	20,29	22,83	22,49	22,20	22,99	22,50	22,14	23,06	22,64	22,32	22,94	22,63	22,22
13:00	21,06	23,06	22,67	22,35	23,19	22,67	22,26	23,26	22,79	22,44	23,17	22,77	22,37
14:00	21,30	23,28	22,81	22,48	23,38	22,81	22,34	23,43	22,89	22,52	23,39	22,89	22,50

TABELA A1.14 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 45°, dia típico de verão (conclusão)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
15:00	20,83	23,47	22,91	22,56	23,50	22,90	22,38	23,55	22,94	22,56	23,56	22,94	22,58
16:00	19,91	23,60	22,93	22,59	23,59	22,91	22,38	23,63	22,93	22,55	23,67	22,94	22,60
17:00	18,75	23,64	22,87	22,52	23,63	22,85	22,33	23,65	22,87	22,50	23,69	22,88	22,54
18:00	17,09	23,61	22,75	22,39	23,60	22,73	22,24	23,62	22,76	22,40	23,64	22,77	22,41
19:00	15,52	23,56	22,63	22,28	23,53	22,62	22,13	23,55	22,64	22,29	23,57	22,64	22,29
20:00	14,29	23,47	22,52	22,17	23,44	22,51	22,03	23,46	22,52	22,18	23,48	22,52	22,18
21:00	13,16	23,35	22,40	22,06	23,31	22,38	21,93	23,34	22,40	22,08	23,36	22,40	22,07
22:00	12,18	23,20	22,27	21,94	23,15	22,25	21,83	23,19	22,27	21,97	23,20	22,27	21,95
23:00	11,30	23,03	22,13	21,83	22,98	22,12	21,73	23,03	22,13	21,86	23,03	22,13	21,84

TABELA A1.15 – Temp. internas do ar (°C) 13° pav, orientação 45°, dia típico de verão

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	26,30	26,10	26,03	26,18	26,12	26,04	26,21	26,09	26,03	26,30	26,10	26,10
1:00	9,90	26,10	25,94	25,88	26,00	25,96	25,91	26,01	25,92	25,90	26,09	25,93	25,95
2:00	9,47	25,89	25,78	25,73	25,81	25,81	25,78	25,81	25,75	25,77	25,88	25,76	25,82
3:00	9,09	25,68	25,62	25,59	25,62	25,66	25,65	25,60	25,59	25,63	25,67	25,60	25,68
4:00	8,79	25,47	25,46	25,44	25,42	25,50	25,52	25,40	25,42	25,49	25,46	25,43	25,53
5:00	8,86	25,29	25,32	25,32	25,24	25,35	25,40	25,21	25,28	25,37	25,27	25,29	25,41
6:00	9,50	25,17	25,25	25,26	25,11	25,25	25,36	25,12	25,31	25,33	25,16	25,32	25,35
7:00	11,17	25,16	25,30	25,31	25,06	25,23	25,41	25,17	25,48	25,40	25,17	25,49	25,40
8:00	13,47	25,25	25,45	25,48	25,13	25,32	25,56	25,30	25,70	25,56	25,28	25,70	25,54
9:00	15,71	25,41	25,66	25,72	25,26	25,46	25,74	25,50	25,94	25,77	25,47	25,94	25,74
10:00	17,69	25,63	25,90	25,97	25,46	25,65	25,95	25,76	26,18	26,00	25,72	26,18	25,96
11:00	19,19	25,86	26,14	26,20	25,68	25,85	26,15	26,03	26,41	26,21	25,98	26,40	26,17
12:00	20,29	26,13	26,38	26,43	25,92	26,06	26,34	26,31	26,63	26,41	26,27	26,63	26,38
13:00	21,06	26,43	26,63	26,66	26,18	26,28	26,53	26,59	26,86	26,61	26,59	26,86	26,61
14:00	21,30	26,74	26,86	26,88	26,43	26,48	26,70	26,84	27,05	26,78	26,89	27,05	26,82
15:00	20,83	27,00	27,03	27,04	26,64	26,66	26,81	27,03	27,17	26,89	27,14	27,18	26,99
16:00	19,91	27,19	27,12	27,12	26,81	26,79	26,87	27,15	27,21	26,95	27,31	27,23	27,07
17:00	18,75	27,26	27,11	27,10	26,93	26,86	26,87	27,19	27,17	26,94	27,34	27,20	27,06
18:00	17,09	27,21	27,01	26,99	26,95	26,86	26,81	27,15	27,07	26,86	27,27	27,09	26,96
19:00	15,52	27,15	26,89	26,84	26,91	26,79	26,70	27,07	26,93	26,75	27,19	26,95	26,84
20:00	14,29	27,04	26,75	26,68	26,83	26,70	26,58	26,95	26,77	26,61	27,07	26,79	26,70
21:00	13,16	26,89	26,60	26,51	26,70	26,57	26,44	26,79	26,60	26,46	26,91	26,62	26,54
22:00	12,18	26,71	26,44	26,36	26,54	26,43	26,32	26,62	26,44	26,33	26,72	26,46	26,40
23:00	11,30	26,52	26,29	26,21	26,38	26,29	26,20	26,43	26,28	26,20	26,53	26,30	26,27

TABELA A1.16 – Temp. internas do ar (°C) 1° pav., orientação 90°, dia típico de verão

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	22,64	22,47	22,17	23,32	22,56	22,04	23,18	21,66	21,34	23,20	21,79	21,93
1:00	9,90	22,42	21,90	21,60	22,79	21,97	21,49	22,68	21,49	21,19	22,69	21,58	21,41
2:00	9,47	22,20	21,39	21,09	22,30	21,44	20,99	22,22	21,34	21,05	22,22	21,40	20,93
3:00	9,09	21,99	20,93	20,64	21,85	20,96	20,54	21,79	21,19	20,91	21,79	21,22	20,51
4:00	8,79	21,79	20,52	20,24	21,44	20,54	20,15	21,40	21,04	20,78	21,40	21,05	20,13
5:00	8,86	21,61	20,18	19,91	21,09	20,18	19,82	21,06	20,93	20,68	21,06	20,92	19,82
6:00	9,50	21,51	20,02	19,76	20,89	20,01	19,66	20,89	20,98	20,65	20,88	20,95	19,68
7:00	11,17	21,53	20,28	20,05	21,06	20,25	19,95	21,10	21,16	20,74	21,07	21,12	19,96
8:00	13,47	21,67	21,01	20,84	21,66	20,99	20,71	21,75	21,41	20,94	21,69	21,39	20,69
9:00	15,71	21,88	22,05	21,96	22,55	22,07	21,82	22,69	21,67	21,18	22,58	21,68	21,71
10:00	17,69	22,13	23,37	23,36	23,67	23,44	23,22	23,87	21,91	21,43	23,73	21,97	23,01
11:00	19,19	22,40	24,76	24,82	24,85	24,88	24,69	25,10	22,13	21,68	24,92	22,27	24,36
12:00	20,29	22,69	26,09	26,18	25,99	26,27	26,07	26,24	22,35	21,92	26,03	22,55	25,64
13:00	21,06	22,97	27,26	27,34	26,98	27,49	27,24	27,22	22,56	22,14	26,97	22,83	26,73
14:00	21,30	23,22	28,16	28,20	27,75	28,42	28,09	27,94	22,73	22,31	27,68	23,04	27,52
15:00	20,83	23,43	28,67	28,66	28,21	28,95	28,52	28,32	22,82	22,41	28,09	23,17	27,94
16:00	19,91	23,58	28,72	28,67	28,32	29,01	28,51	28,35	22,84	22,45	28,16	23,22	27,94
17:00	18,75	23,65	28,27	28,21	28,06	28,56	28,03	28,00	22,79	22,41	27,86	23,17	27,51
18:00	17,09	23,63	27,38	27,33	27,42	27,64	27,14	27,29	22,67	22,31	27,19	23,03	26,68
19:00	15,52	23,54	26,34	26,23	26,58	26,57	26,04	26,41	22,52	22,16	26,36	22,84	25,67
20:00	14,29	23,42	25,38	25,20	25,81	25,57	25,02	25,61	22,37	22,01	25,60	22,64	24,73
21:00	13,16	23,25	24,52	24,29	25,11	24,68	24,12	24,91	22,20	21,85	24,91	22,44	23,89
22:00	12,18	23,07	23,75	23,49	24,47	23,89	23,33	24,28	22,03	21,68	24,30	22,22	23,15
23:00	11,30	22,86	23,08	22,79	23,89	23,19	22,64	23,72	21,85	21,51	23,74	22,00	22,51

TABELA A1.17 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 90°, dia típico de verão (continua)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	22,83	22,02	21,64	22,81	22,01	21,57	22,81	21,96	21,69	22,77	21,96	21,64
1:00	9,90	22,65	21,88	21,53	22,63	21,87	21,47	22,64	21,83	21,59	22,60	21,82	21,53
2:00	9,47	22,47	21,75	21,43	22,45	21,74	21,38	22,47	21,71	21,49	22,42	21,70	21,43
3:00	9,09	22,30	21,62	21,33	22,27	21,62	21,29	22,31	21,59	21,40	22,25	21,58	21,34
4:00	8,79	22,12	21,50	21,24	22,10	21,50	21,20	22,14	21,47	21,31	22,08	21,46	21,24
5:00	8,86	21,97	21,41	21,17	21,96	21,40	21,14	22,00	21,39	21,24	21,94	21,38	21,18
6:00	9,50	21,91	21,40	21,18	21,89	21,39	21,14	21,93	21,46	21,25	21,88	21,45	21,19
7:00	11,17	21,93	21,50	21,29	21,92	21,49	21,23	21,97	21,65	21,35	21,92	21,64	21,30
8:00	13,47	22,06	21,69	21,47	22,07	21,68	21,40	22,11	21,88	21,54	22,06	21,88	21,49
9:00	15,71	22,24	21,90	21,67	22,27	21,89	21,58	22,32	22,11	21,74	22,27	22,11	21,69
10:00	17,69	22,45	22,13	21,87	22,49	22,12	21,77	22,55	22,31	21,94	22,51	22,31	21,89
11:00	19,19	22,65	22,32	22,04	22,70	22,31	21,93	22,77	22,48	22,11	22,73	22,47	22,06
12:00	20,29	22,85	22,50	22,18	22,91	22,49	22,07	22,98	22,63	22,24	22,94	22,62	22,20
13:00	21,06	23,05	22,70	22,31	23,12	22,69	22,19	23,18	22,77	22,37	23,15	22,76	22,32
14:00	21,30	23,23	22,89	22,40	23,31	22,88	22,27	23,36	22,87	22,45	23,32	22,87	22,41

TABELA A1.17 – Temp. internas do ar (°C) 7° pav., orientação 90°, dia típico de verão (conclusão)

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
15:00	20,83	23,39	23,00	22,45	23,45	23,00	22,32	23,48	22,92	22,49	23,45	22,92	22,46
16:00	19,91	23,51	23,04	22,45	23,55	23,03	22,31	23,55	22,91	22,48	23,54	22,91	22,45
17:00	18,75	23,57	22,97	22,40	23,61	22,96	22,27	23,58	22,85	22,43	23,57	22,85	22,41
18:00	17,09	23,57	22,82	22,30	23,60	22,81	22,18	23,55	22,74	22,34	23,54	22,74	22,31
19:00	15,52	23,53	22,70	22,19	23,54	22,69	22,07	23,49	22,62	22,23	23,47	22,62	22,20
20:00	14,29	23,45	22,58	22,08	23,45	22,57	21,98	23,41	22,50	22,13	23,39	22,49	22,09
21:00	13,16	23,33	22,45	21,98	23,32	22,44	21,88	23,29	22,37	22,02	23,26	22,37	21,98
22:00	12,18	23,18	22,31	21,87	23,17	22,30	21,79	23,14	22,24	21,92	23,11	22,24	21,87
23:00	11,30	23,01	22,17	21,76	23,00	22,16	21,68	22,98	22,11	21,81	22,95	22,10	21,76

TABELA A1.18 – Temp. internas do ar (°C) 13° pav., orientação 90°, dia típico de verão

HOR A	T. EXT	AP01			AP02			AP03			AP04		
		Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01	Q01	Q02	SL01
0:00	10,50	26,25	26,11	25,93	26,16	26,12	25,96	26,14	26,03	25,95	26,20	26,04	25,98
1:00	9,90	26,05	25,94	25,78	25,98	25,96	25,83	25,94	25,86	25,81	25,99	25,87	25,85
2:00	9,47	25,84	25,78	25,64	25,79	25,80	25,71	25,74	25,70	25,68	25,79	25,70	25,71
3:00	9,09	25,64	25,61	25,50	25,59	25,64	25,58	25,54	25,53	25,55	25,58	25,54	25,58
4:00	8,79	25,43	25,44	25,36	25,40	25,48	25,45	25,33	25,36	25,41	25,37	25,37	25,44
5:00	8,86	25,24	25,30	25,24	25,22	25,33	25,33	25,15	25,23	25,30	25,18	25,23	25,32
6:00	9,50	25,13	25,23	25,19	25,08	25,23	25,27	25,05	25,26	25,25	25,09	25,27	25,27
7:00	11,17	25,13	25,28	25,25	25,03	25,21	25,31	25,06	25,44	25,29	25,11	25,44	25,32
8:00	13,47	25,23	25,43	25,42	25,09	25,29	25,44	25,18	25,67	25,44	25,23	25,68	25,48
9:00	15,71	25,40	25,64	25,67	25,21	25,43	25,62	25,38	25,92	25,65	25,44	25,93	25,69
10:00	17,69	25,62	25,88	25,92	25,39	25,62	25,83	25,64	26,16	25,87	25,70	26,17	25,92
11:00	19,19	25,86	26,11	26,16	25,60	25,81	26,03	25,91	26,37	26,09	25,97	26,38	26,13
12:00	20,29	26,12	26,36	26,38	25,83	26,02	26,22	26,19	26,59	26,29	26,26	26,60	26,34
13:00	21,06	26,40	26,63	26,60	26,09	26,24	26,42	26,47	26,81	26,49	26,54	26,83	26,54
14:00	21,30	26,67	26,90	26,78	26,34	26,45	26,58	26,73	27,00	26,66	26,80	27,01	26,71
15:00	20,83	26,89	27,11	26,90	26,57	26,64	26,70	26,92	27,12	26,78	27,00	27,13	26,84
16:00	19,91	27,06	27,22	26,96	26,75	26,78	26,77	27,05	27,16	26,84	27,14	27,18	26,90
17:00	18,75	27,15	27,20	26,95	26,88	26,86	26,77	27,10	27,13	26,84	27,18	27,14	26,90
18:00	17,09	27,15	27,07	26,86	26,93	26,87	26,71	27,07	27,02	26,76	27,15	27,03	26,82
19:00	15,52	27,09	26,95	26,72	26,90	26,81	26,61	26,99	26,88	26,65	27,06	26,89	26,70
20:00	14,29	26,99	26,80	26,57	26,82	26,72	26,49	26,87	26,73	26,52	26,95	26,74	26,57
21:00	13,16	26,84	26,63	26,40	26,70	26,59	26,36	26,72	26,55	26,37	26,79	26,57	26,42
22:00	12,18	26,66	26,47	26,25	26,53	26,44	26,23	26,54	26,39	26,24	26,61	26,40	26,28
23:00	11,30	26,47	26,31	26,10	26,37	26,30	26,11	26,36	26,23	26,11	26,42	26,24	26,15

A2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM CFD.

FIGURA A2.1: Perfis de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 135^\circ$

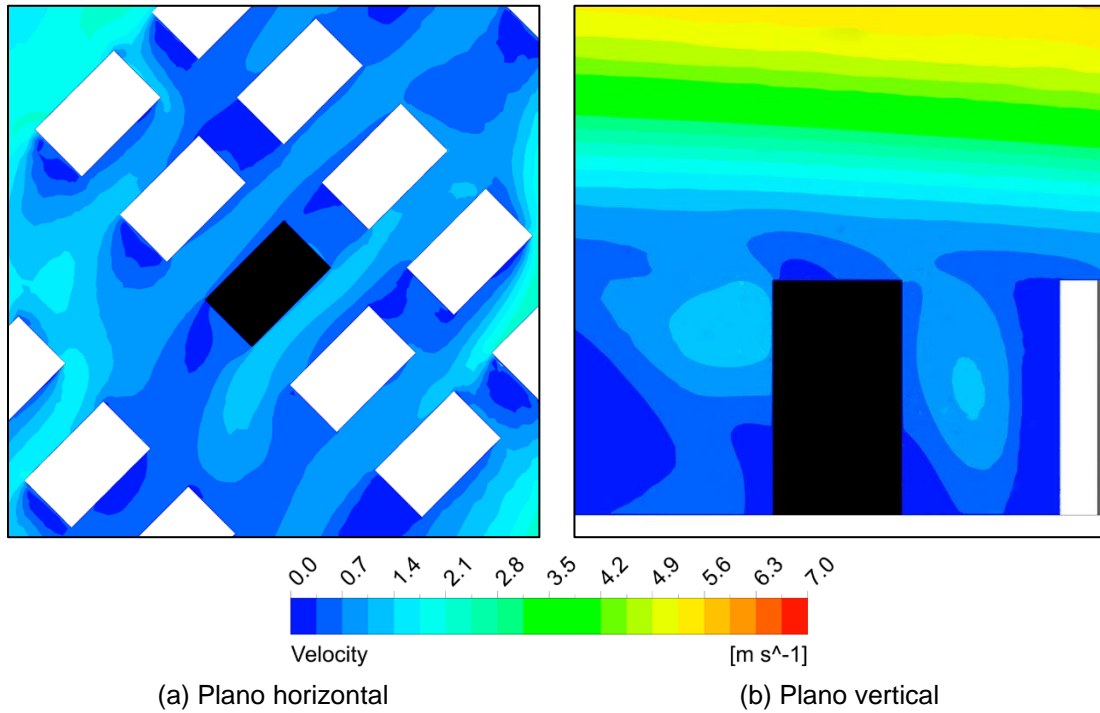


FIGURA A2.2: Perfis de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 135^\circ$

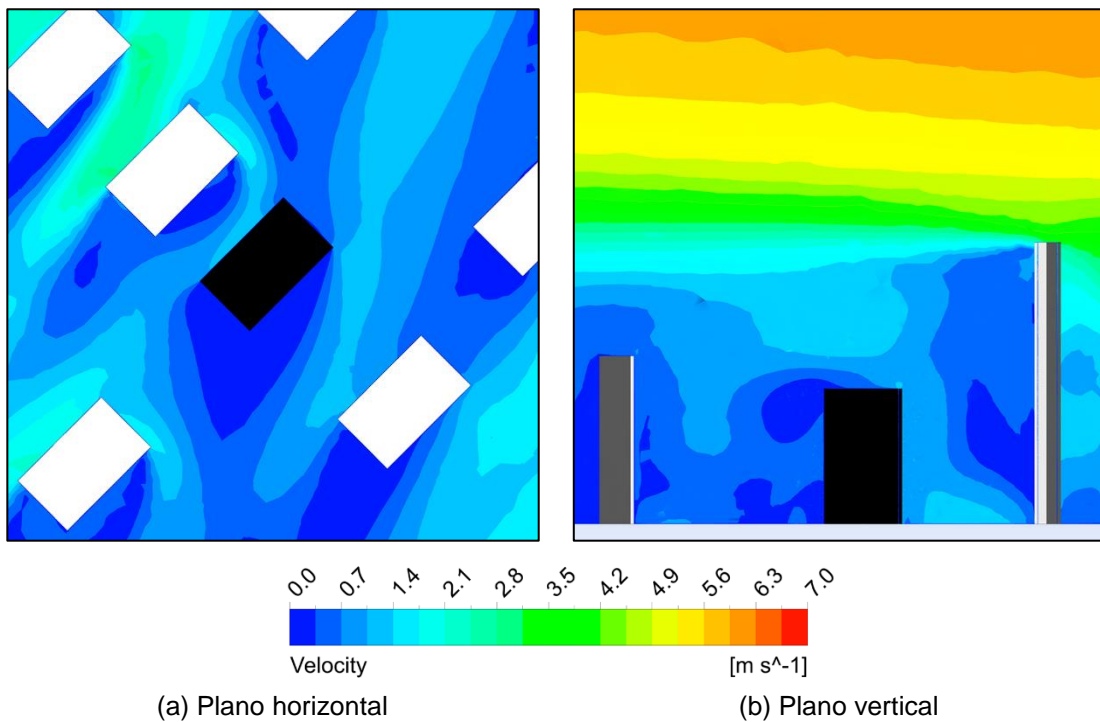
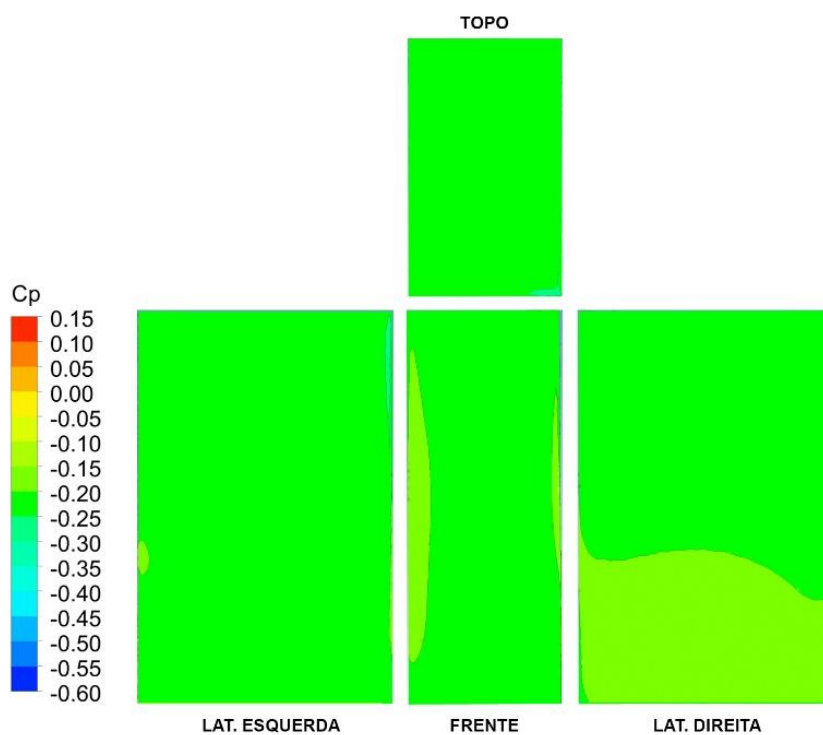
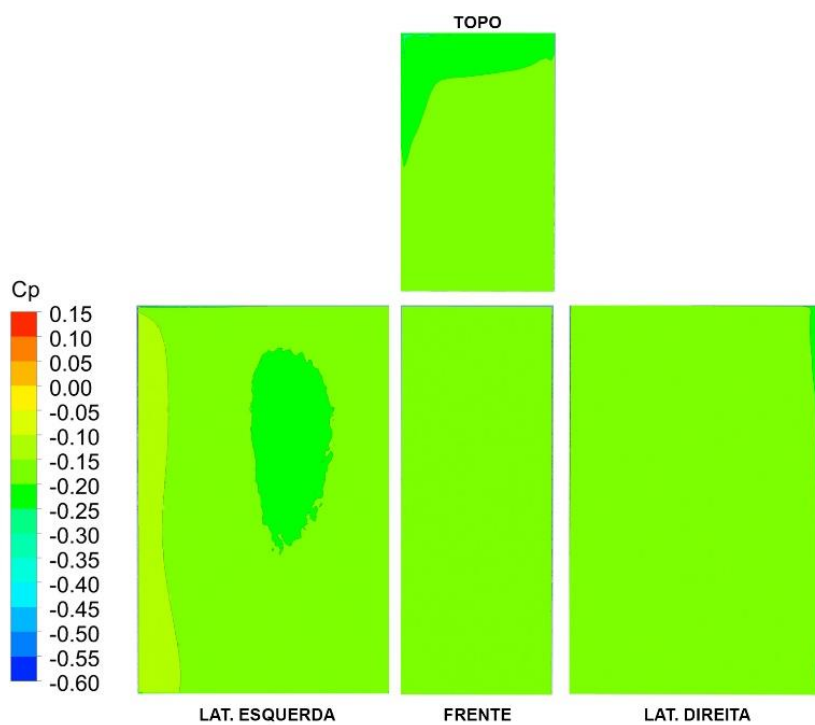


FIGURA A2.3: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 135^\circ$



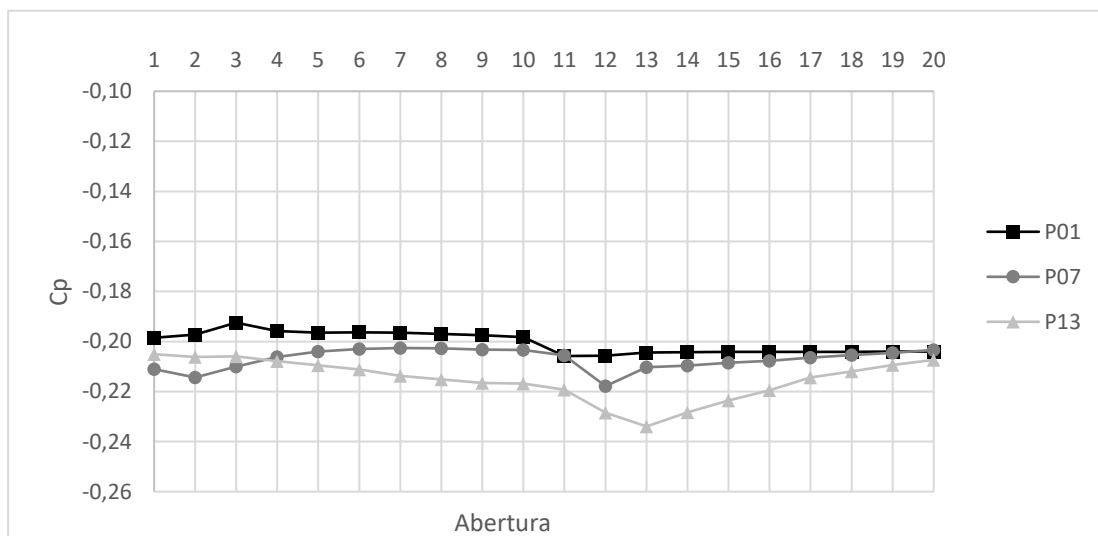
Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA A2.4: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 135^\circ$



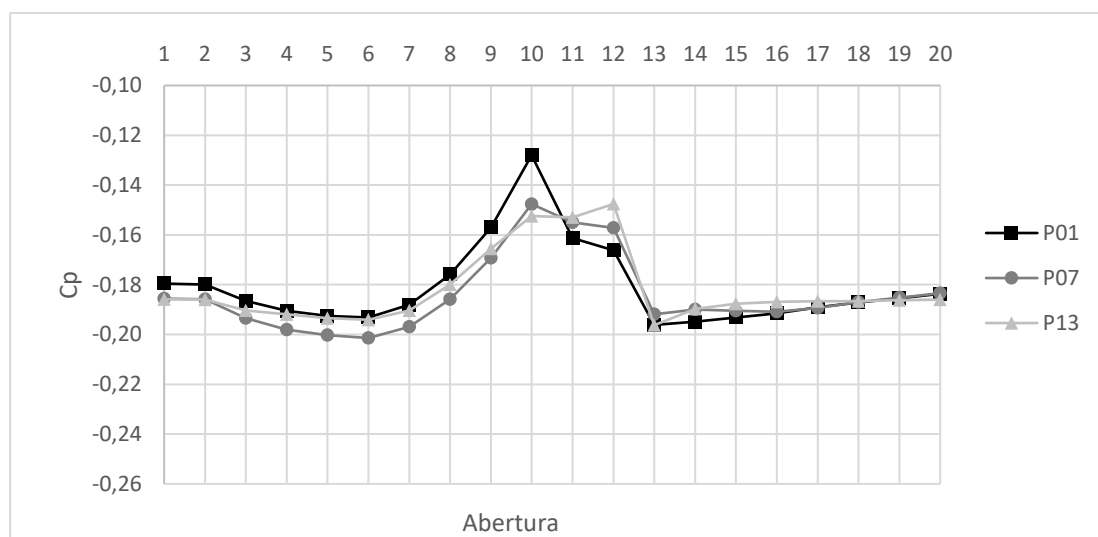
Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO A2. 1: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 135^\circ$



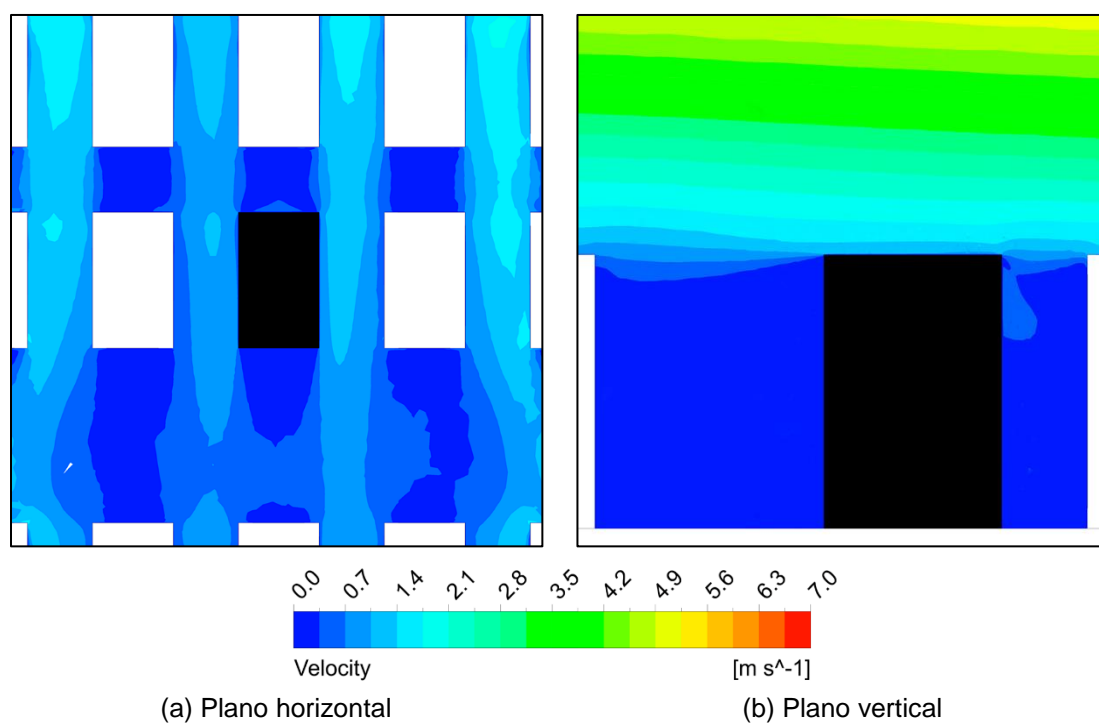
Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO A2. 2: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 135^\circ$



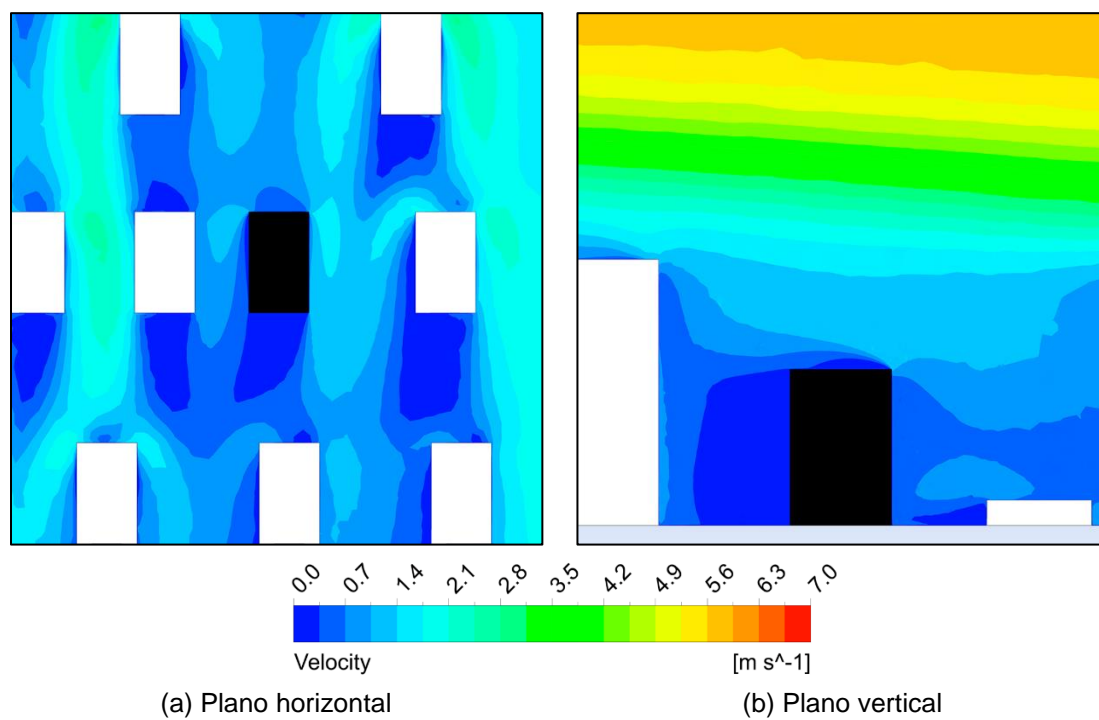
Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA A2.5: Perfis de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 180^\circ$



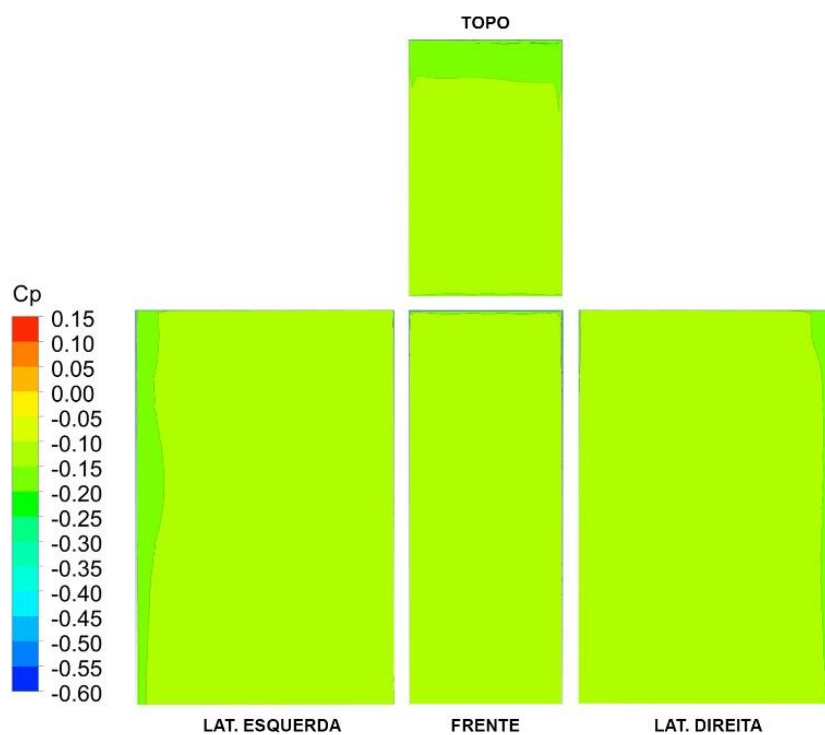
Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA A2.6: Perfis de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 180^\circ$



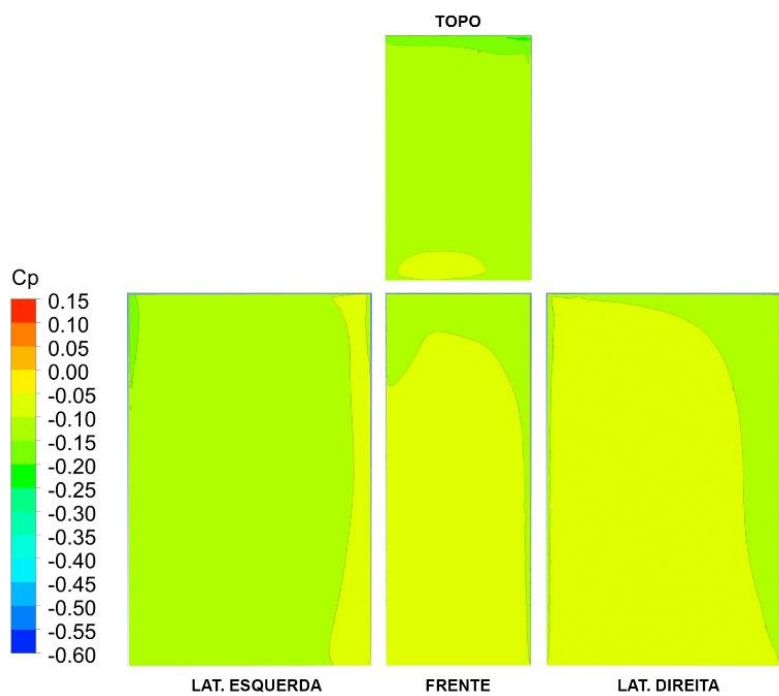
Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA A2.7: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 180^\circ$



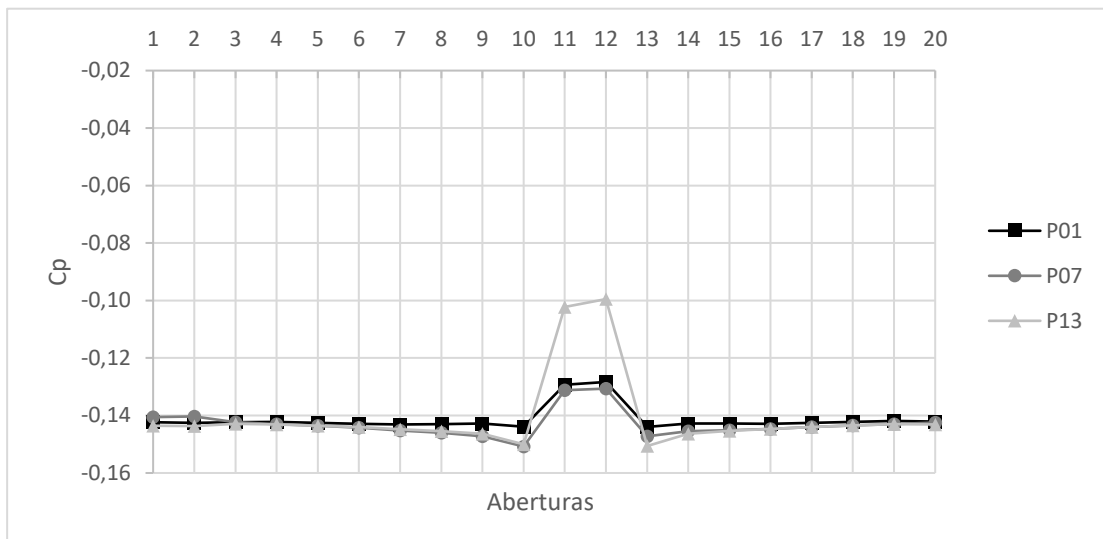
Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA A2.8: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 180^\circ$



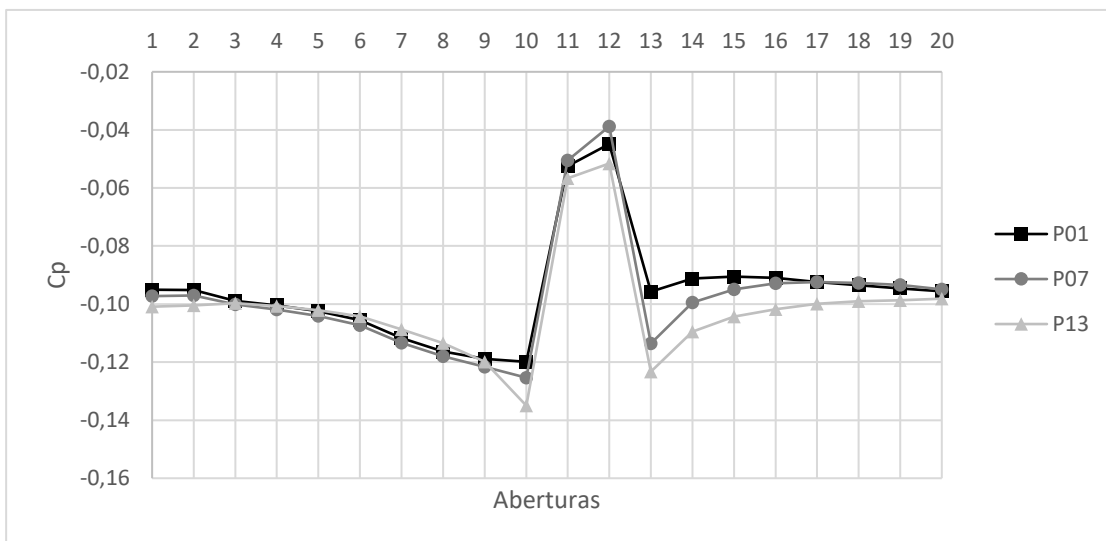
Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO A2.3: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 180^\circ$



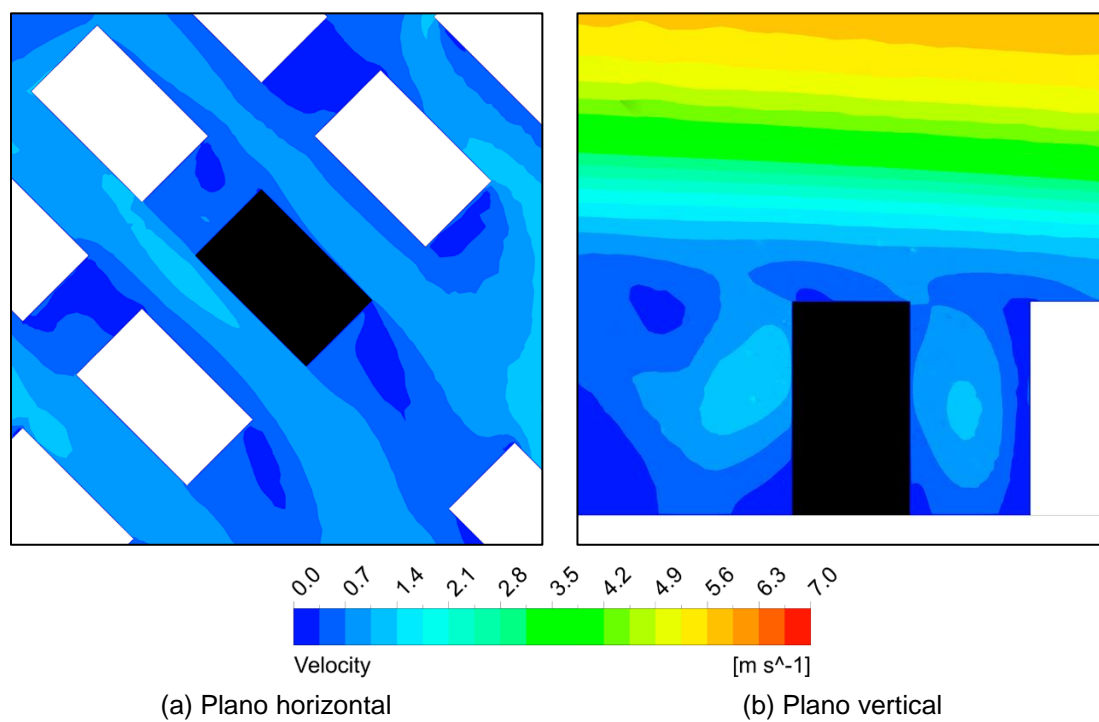
Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO A2.4: Gráfico de Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 180^\circ$



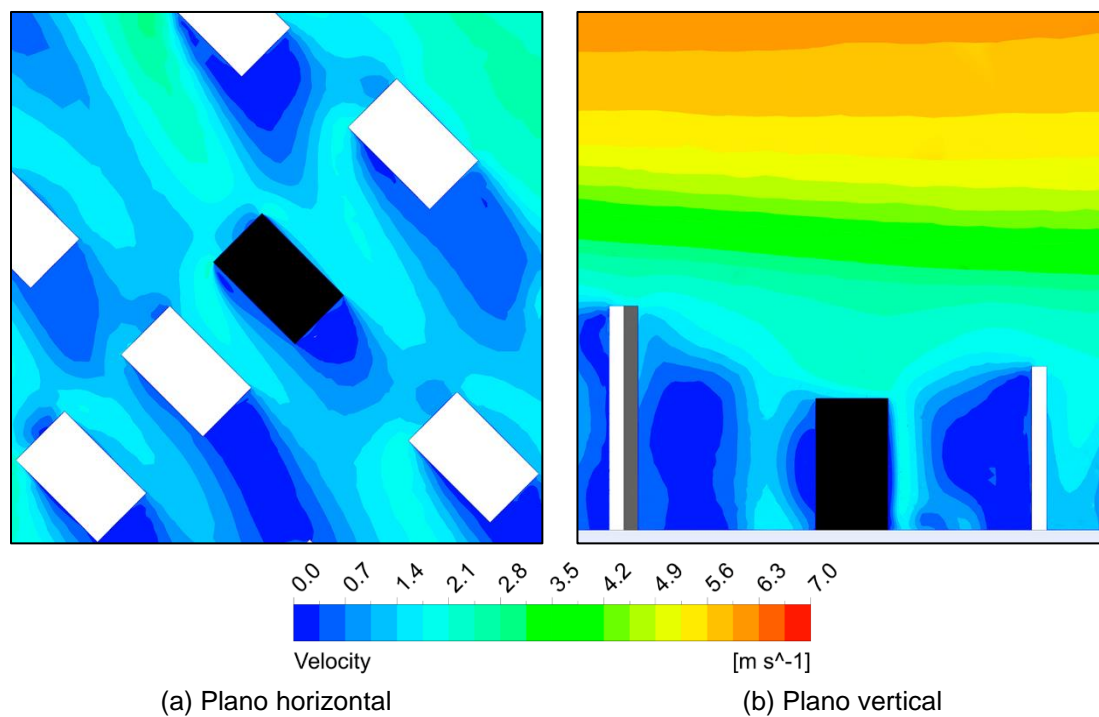
Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA A2.9: Perfis de velocidade, modelo com altura constante, $\theta = 225^\circ$



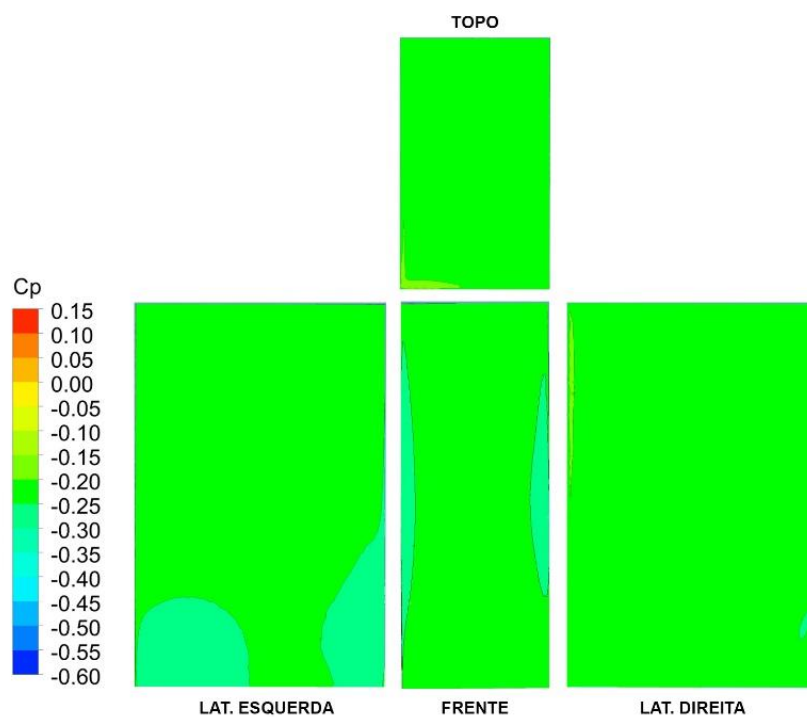
Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA A2.10: Perfis de velocidade, modelo com altura variável, $\theta = 225^\circ$



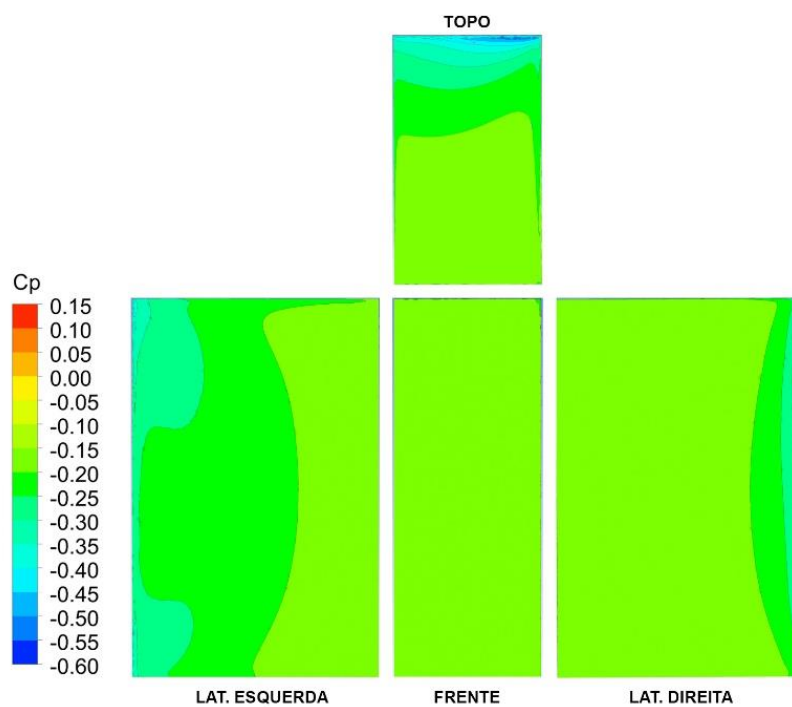
Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA A2.11: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura constante, $\theta = 225^\circ$



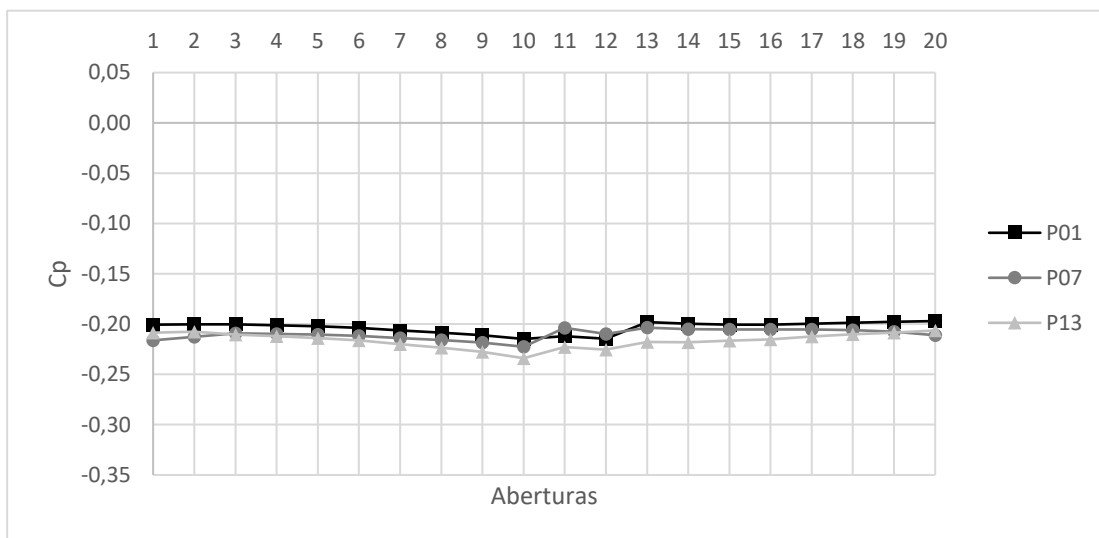
Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA A2.12: Mapa de Cp nas fachadas, modelo com altura variável, $\theta = 225^\circ$



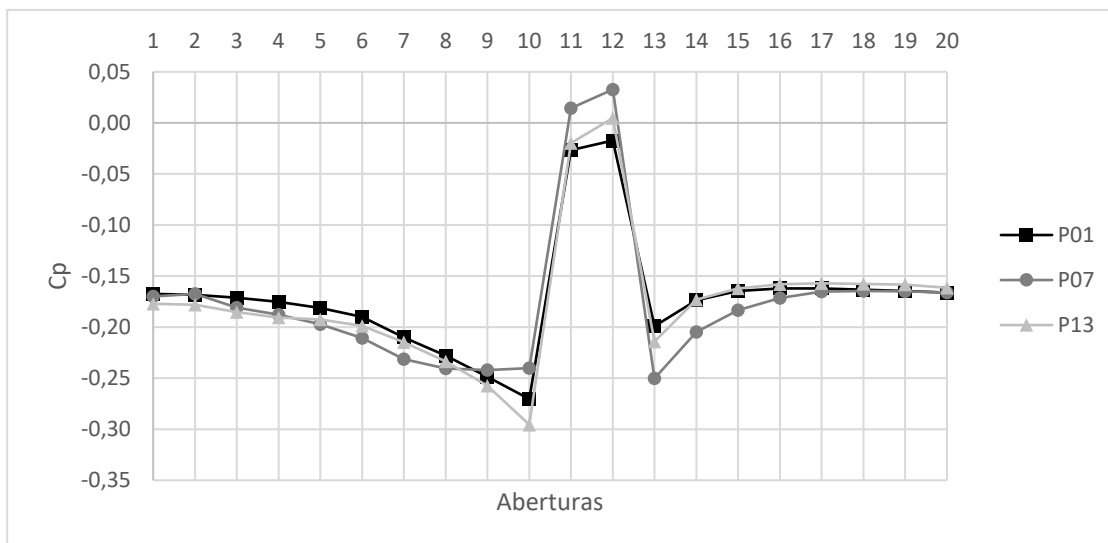
Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO A2.5: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura constante, $\theta = 225^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

GRÁFICO A2.6: Cp nas aberturas segundo os pavimentos. Altura variável, $\theta = 225^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor