

**UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE**

**SAMUEL BERTRAND MELO NAZARETH**

**IMPACTOS DA VERTICALIZAÇÃO NO MICROCLIMA EM CIDADE TROPICAL  
ÚMIDA: O CENTRO DA CIDADE DE FORTALEZA - CE**

**SÃO PAULO**

**2020**

SAMUEL BERTRAND MELO NAZARETH

IMPACTOS DA VERTICALIZAÇÃO NO MICROCLIMA EM CIDADE TROPICAL  
ÚMIDA: O CENTRO DA CIDADE DE FORTALEZA - CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Augusta Justi Pisani

SÃO PAULO

2020

N335i Nazareth, Samuel Bertrand Melo.

Impactos da verticalização no microclima em cidade tropical úmida: o centro da cidade de Fortaleza – CE / Samuel Bertrand Melo Nazareth  
174 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

Orientadora: Maria Augusta Justi Pisani

Bibliografia: f. 163-175.

1. Planejamento urbano. 2. Ventilação urbana. 3. Simulação fluidodinâmica. 4 Microclima. 5. Simulação microclimática. I. Pisani, Maria Augusta Justi, *orientadora*. II. Título.

CDD 711

Bibliotecária responsável: Paola Damato CRB-8/6271

SAMUEL BERTRAND MELO NAZARETH

IMPACTOS DA VERTICALIZAÇÃO NO MICROCLIMA EM CIDADE TROPICAL  
ÚMIDA: O CENTRO DA CIDADE DE FORTALEZA - CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

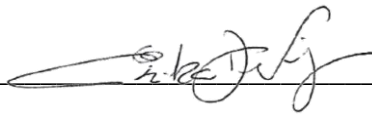
BANCA EXAMINADORA



---

Prof.ª Dr.ª Maria Augusta Justi Pisani

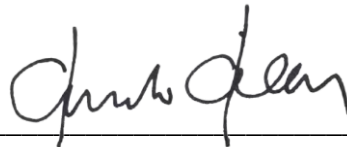
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie



---

Prof.ª Dr.ª Erika Ciconelli de Figueiredo

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie



---

Prof. Dr. Amando Candeira Costa Filho

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Fortaleza

A minha mãe Telma, meu pai Márcio, e meus  
irmãos Bruno Bertrand e Márcio Filho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela coragem e discernimento dados em todos os momentos. A minha família, meu alicerce, onde mesmo que distantes, sempre se fizeram presentes, me auxiliando em cada passo. A minha companheira Isabelle Carvalho, por ser tão compreensiva e presente neste tempo que estamos distantes, pelas conversas e conselhos, sempre me auxiliando a me tornar uma pessoa e pesquisador melhor.

A professora Dr.<sup>a</sup> Maria Augusta Justi Pisani, por ter me acolhido de forma calorosa e pela confiança em mim depositada, por sua presença e trabalho constante no processo de produção desta dissertação, pelas conversas e conselhos sempre muito valorosos.

Ao professor e amigo Renan Leite, Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo empréstimo de equipamentos para a produção desta pesquisa, por acompanhar a minha caminhada desde o início da graduação, por ter nutrido a minha vontade de estudar arquitetura e urbanismo por outras perspectivas e por ter dividido suas experiências.

Ao professor e amigo Amando Costa Filho, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), pelo empréstimo de equipamentos para a produção desta pesquisa, por me acolher na graduação no seu grupo de pesquisa, por ter me incentivado a perseguir o magistério e pelas oportunidades oferecidas.

A professora Dr.<sup>a</sup> Erika de Figueiredo, por suas contribuições relevantes para a produção deste trabalho durante a qualificação deste trabalho e etapas anteriores. Ao Professor Dr. Adeildo Cabral da Silva, Instituto Federal do Ceará (IFCE), pelo empréstimo de equipamentos necessários para esta pesquisa e para trabalhos futuros, bem como ao laboratório de energias renováveis e conforto ambiental principalmente nas pessoas de Cícero Neves e Michael Silva.

Aos meus colegas da Universidade Presbiteriana Mackenzie, em especial a Natacha Seabra, amiga do café, pela ajuda e comprometimento empregados a finalização deste trabalho e a tantos outros. Aos meus amigos no entendimento da minha ausência.

Aos professores do programa de pós graduação da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Ao laboratório de conforto ambiental da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo pelo empréstimo de equipamentos. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio a este trabalho.

Você não pode mudar o vento, mas pode ajustar as velas do barco para chegar onde quer (Confúcio).

## RESUMO

O trabalho aqui apresentado estuda as mudanças microclimáticas ocasionadas por um possível aumento de edifícios altos na cidade de Fortaleza, especificamente, em partes do centro da cidade, face a mudança da Lei de Uso e ocupação do Solo em 2017. Entende-se que a modificação climática é um assunto importante para o desenvolvimento de políticas públicas que visam a criação de uma urbanidade sustentável. Considerando a intrínseca complexidade no estudo de aspectos climáticos, esta pesquisa versa na simplificação e simulação computacional de modelos urbanos e suas comparações. Sabendo que neste balanço diversos fatores são afetados, tais como eficiência energética e poluição do ar, neste estudo avaliou-se 3 áreas específicas no bairro Centro, cada uma com características distintas, com o intuito da comparação de diferentes condicionantes do espaço urbano. Objetiva-se averiguar como os possíveis padrões construtivos impulsionados pela legislação urbanística vigente, poderiam modificar este microclima. De forma específica, busca-se analisar o impacto da morfologia urbana no fluxo de ar dentro das cidades; avaliar os reflexos da densidade construída sobre a temperatura do ar nas áreas escolhidas; averiguar as influências dos corpos d'água e vegetação sobre o microclima e medir a influência da obstrução dos edifícios altos sobre a radiação solar direta e o clima no centro da cidade de Fortaleza. Com o uso de simuladores fluidodinâmicos digitais, considerou-se a simplificação da malha e geometria das construções urbanas, bem como materiais de revestimento de superfícies e dados microclimáticos colhidos pelo autor e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a criação dos cenários. Considera-se, que a verticalização proposta aumenta a velocidade no nível do pedestre e cria áreas de sombra para o mesmo, o que podem ser fatores positivos. Todavia, aumenta-se o efeito de recirculação de ar, intensifica a média diária da temperatura do ar e, potencialmente, intensificando o fenômeno de ilha de calor urbana.

**Palavras-chave:** Planejamento Urbano. Ventilação Urbana. Simulação Fluidodinâmica. Microclima. Simulação Microclimática.



## ABSTRACT

The work presented the intends to study the microclimate changes caused by a possible increase in tall buildings in the city of Fortaleza, specifically, in parts of the city center, in view of the change in the Land Use and Occupation Law in 2017. It is understood that climate change is an important issue for the development of public policies aimed at creating sustainable urbanity. Considering the intrinsic complexity in the study of climatic aspects, this research deals with the simplification and computational simulation of urban models and their comparisons. Knowing that in this balance several factors are affected, such as energy efficiency and air pollution, in this study three specific areas in the Centro neighborhood were evaluated, each one with different characteristics, in order to compare different conditions of the urban space. The objective is to find out how the possible construction patterns driven by the current urban legislation, could modify this microclimate. Specifically, it seeks to analyze the impact of urban morphology on airflow within cities; evaluate the reflexes of the built density on the air temperature in the chosen areas; to investigate the influences of water bodies and vegetation on the microclimate and to measure the influence of the obstruction of tall buildings on direct solar radiation and the climate in the city center of Fortaleza. With the use of digital fluid dynamic simulators, simplification of the mesh and geometry of urban buildings was considered, as well as surface coating materials and microclimate data collected by the author and the National Meteorological Institute (INMET) for the creation of the scenarios. It is considered that the proposed verticalization increases the speed at the pedestrian level and creates shadow areas for the pedestrian, which can be positive factors. However, the air recirculation effect increases, intensifies the daily average of the air temperature and, potentially, intensifies the phenomenon of urban heat island.

**Keywords:** Urban Planning. Urban Ventilation. Fluid Dynamics Simulation. Microclimate. Microclimate Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Súmula metodológica.....	26
Figura 2 -	Esquema da camada limite atmosférica e sub-regiões.....	33
Figura 3 -	Fluxo laminar.....	39
Figura 4 -	Fluxo turbulento.....	39
Figura 5 -	SVF > 0.....	44
Figura 6 -	SVF = 0.....	44
Figura 7 -	Localização de Fortaleza.....	46
Figura 8 -	Localização centro de Fortaleza e áreas de estudo.....	49
Figura 9 -	Região 1 de estudo.....	49
Figura 10 -	Região 2 de estudo.....	50
Figura 11 -	Região 3 de estudo.....	50
Figura 12 -	Zoneamento do bairro Centro, Fortaleza, Ceará e áreas de estudo.....	51
Figura 13 -	Fluxograma do método.....	55
Figura 14 -	Localização das áreas de análise.....	56
Figura 15 -	Projeto Piloto.....	57
Figura 16 -	Esquema estação de coleta.....	57
Figura 17 -	Pavimento tipo WSTC.....	60
Figura 18 -	Implantação WSTC.....	60
Figura 19 -	Washington Soares Trade Center.....	61
Figura 20 -	Pavimento tipo maior.....	62
Figura 21 -	Implantação BS design.....	62
Figura 22 -	BS Design.....	62
Figura 23 -	Pavimento tipo Centurion Business Center.....	63
Figura 24 -	Implantação Centurion Business Center.....	63
Figura 25 -	Centurion Business Center.....	63
Figura 26 -	Pavimento tipo Humberto Santana Business.....	64
Figura 27 -	Implantação Humberto Santana Business.....	64
Figura 28 -	Humberto Santana Business Center.....	64
Figura 29 -	Modelos normatizados para simulação.....	67
Figura 30 -	Metodologia simulação ANSYS CFX.....	68
Figura 31 -	Dimensões domínio retangular.....	69

Figura 32 -	Dimensões domínio circular.....	70
Figura 33 -	Domínio circular com delimitação do corte.....	71
Figura 34 -	Corte no domínio circular e discriminação de malha.....	71
Figura 35 -	Denominação das partes simuladas.....	72
Figura 36 -	Representação domínio e perfil do vento.....	73
Figura 37 -	Perfil do vento.....	74
Figura 38 -	Etapas de análise Fator de visão de céu: a) preparação dos pontos de análise; b) simulação individual em cada ponto do fator de visão de céu; c) tratamento dos dados em gráfico.....	77
Figura 39 -	Metodologia simulação ENVI-met.....	78
Figura 40 -	Esquema geometrias ENVI-met.....	79
Figura 41 -	Licania Tomentosa e modelo digitalizado.....	82
Figura 42 -	Mapa de zonas especiais e pontos de análise - Região 1.....	88
Figura 43 -	Volumetria região 1 - Não verticalizado.....	88
Figura 44 -	Volumetria região 1 - Verticalizado.....	88
Figura 45 -	Mapa altura das edificações região 1 - Não verticalizado.....	89
Figura 46 -	Mapa altura das edificações região 1 - Verticalizado.....	89
Figura 47 -	Mapa hipsométrico - Região 1.....	90
Figura 48 -	Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1.5 m, região 1 - Não verticalizado.....	92
Figura 49 -	Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1.5 m, região 1 - Verticalizado.....	93
Figura 50 -	Simulação fluidodinâmica sentido leste, 45 metros, região 1 - Não verticalizado.....	94
Figura 51 -	Simulação fluidodinâmica sentido leste, 45 metros, região 1 - Verticalizado.....	94
Figura 52 -	Corte B - Não verticalizado.....	95
Figura 53 -	Corte B - Verticalizado.....	95
Figura 54 -	Corte A - Não verticalizado.....	96
Figura 55 -	Corte A - Verticalizado.....	96
Figura 56 -	Detalhe 1 - Verticalizado.....	97
Figura 57 -	Corte C - Não verticalizado.....	97
Figura 58 -	Corte C - Verticalizado.....	97

Figura 59 -	Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, região 1 - Não verticalizado.....	98
Figura 60 -	Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, região 1 - Verticalizado.....	99
Figura 61 -	Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 45 metros, região 1 - Não verticalizado.....	100
Figura 62 -	Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 45 metros, região 1 - Verticalizado.....	101
Figura 63 -	Corte A - Não verticalizado.....	101
Figura 64 -	Corte A - Verticalizado.....	102
Figura 65 -	Corte B - Não verticalizado.....	102
Figura 66 -	Corte B - Verticalizado.....	103
Figura 67 -	Corte C - Verticalizado.....	103
Figura 68 -	Corte C - Não verticalizado.....	103
Figura 69 -	Mapa de zonas especiais e pontos de análise - Região 2.....	105
Figura 70 -	Volumetria Região 2 - Não verticalizado.....	105
Figura 71 -	Volumetria região 2 - Verticalizado.....	105
Figura 72 -	Mapa alturas das edificações Região 2 - Não verticalizado.....	106
Figura 73 -	Mapa alturas das edificações Região 2 - Verticalizado.....	106
Figura 74 -	Mapa hipsométrico - Região 2.....	106
Figura 75 -	Simulação fluidodinâmica sentido leste, 1.5 metros, região 2 - Não verticalizado.....	109
Figura 76 -	Simulação fluidodinâmica sentido leste, 1.5 metros, região 2 - Verticalizado.....	110
Figura 77 -	Simulação fluidodinâmica sentido leste, 45 metros, região 2 - Verticalizado.....	111
Figura 78 -	Detalhe 1 - Verticalizado.....	111
Figura 79 -	Corte A - Não verticalizado.....	112
Figura 80 -	Corte B - Verticalizado.....	112
Figura 81 -	Detalhe 2 - Verticalizado.....	113
Figura 82 -	Detalhe 3 - Verticalizado.....	113
Figura 83 -	Corte B - Não verticalizado.....	114
Figura 84 -	Detalhe 4 - Não verticalizado.....	114

Figura 85 -	Corte B - Verticalizado.....	115
Figura 86 -	Corte C - Não verticalizado.....	115
Figura 87 -	Corte C - Verticalizado.....	116
Figura 88 -	Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 1.5 metros - Não verticalizado.....	117
Figura 89 -	Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 1.5 metros - Verticalizado.....	117
Figura 90 -	Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 45 metros - Verticalizado.....	118
Figura 91 -	Corte A - Verticalizado.....	119
Figura 92 -	Detalhe 1 - Verticalizado.....	119
Figura 93 -	Detalhe 2 - Verticalizado.....	120
Figura 94 -	Mapa de zonas especiais e pontos de análise - Região 3.....	121
Figura 95 -	Volumetria Região 2 - Não verticalizado.....	122
Figura 96 -	Volumetria Região 2 -Verticalizado.....	122
Figura 97 -	Mapa alturas das edificações Região 3 - Não verticalizado.....	122
Figura 98 -	Mapa alturas das edificações Região 2 - Verticalizado.....	122
Figura 99 -	Hipsométrico da área 3.....	123
Figura 100 -	Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1.5 metros, região 3 - Não verticalizada.....	126
Figura 101 -	Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1.5 metros, região 3 - Verticalizada.....	126
Figura 102 -	Corte A - Não verticalizado.....	127
Figura 103 -	Corte B - Não verticalizado.....	127
Figura 104 -	Fluxo Leste a 45 metros do solo da área 3, cenário hipotético.....	128
Figura 105 -	Corte A - Verticalizado.....	128
Figura 106 -	Detalhe 1 - Verticalizado.....	129
Figura 107 -	Detalhe 2 - Verticalizado.....	129
Figura 108 -	Corte B -Verticalizado.....	130
Figura 109 -	Detalhe 3 - Verticalizado.....	130
Figura 110 -	Detalhe 4 - Verticalizado.....	131
Figura 111 -	Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste, 1.5 metros, região 3 - Não verticalizada.....	132

Figura 112 - Fluxo Sudeste a 1.5 metros do solo da área 3, cenário hipotético.....	132
Figura 113 - Simulação fluidodinâmica Sudeste, 1.5 metros, região 3 - Verticalizada.....	133
Figura 114 - Corte A - Não verticalizado.....	134
Figura 115 - Corte A - Verticalizado.....	135
Figura 116 - Detalhe 5 - Verticalizado.....	135
Figura 117 - Pontos de coleta de dados in loco - Região 3.....	137
Figura 118 - Ponto de coleta 1.....	138
Figura 119 - Ponto de coleta 2.....	138
Figura 120 - Tempo de insolação - Cenário 3.....	139
Figura 121 - Tempo de insolação - Cenário 3.1.....	139
Figura 122 - Fator visão de céu - Cenário 3.....	140
Figura 123 - Fator visão de céu - Cenário 3.1.....	140
Figura 124 - Modelagem simplificada da situação real produzida para simulação ENVI-met cenário 3.....	141
Figura 125 - Modelagem simplificada da situação hipotética produzida para simulação ENVI-met cenário 3.1.....	141
Figura 126 - Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1.35 m, Região 3 - Não verticalizado.....	142
Figura 127 - Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1.35 m, Região 3 - Verticalizado.....	142
Figura 128 - Temperatura do ar às 9h a 1,35 metros do solo, cenário 3.....	143
Figura 129 - Temperatura do ar às 18h a 1,35 metros do solo, cenário 3.1.....	144
Figura 130 - Temperatura do ar as 09:00 da manhã a 1,35 metros do solo, cenário 3.1.....	145
Figura 131 - Temperatura do ar as 18:00 da manhã a 1,35 metros do solo, cenário 3.1.....	146
Figura 132 - Pontos de coleta de dados in loco - Região 2.....	149
Figura 133 - Ponto de coleta 1.....	150
Figura 134 - Ponto de coleta 2.....	150
Figura 135 - Tempo de insolação - Cenário 2.....	151
Figura 136 - Tempo de insolação - Cenário 2.1.....	151
Figura 137 - Fator de visão de céu - Cenário 2.....	152

Figura 138 - Fator de visão de céu - Cenário 2.1.....	152
Figura 139 - Pontos de coleta de dados in loco - Região 1.....	153
Figura 140 - Ponto de coleta P1 e P2.....	154
Figura 141 - Tempo de insolação - Cenário 1.....	155
Figura 142 - Tempo de insolação - Cenário 3.1.....	155
Figura 143 - Fator de visão de céu - Cenário 1.....	156
Figura 144 - Fator de visão de céu - Cenário 1.1.....	156

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Mudanças na área construída, população, uso de energia em edificações e emissões de dióxido de carbono mundialmente.....	22
Gráfico 2 -	Comparação do consumo de energia elétrica entre indústria, edificações e transporte.....	27
Gráfico 3 -	Estoque de Ar-condicionado no mundo.....	30
Gráfico 4 -	Gradiente de vento urbano.....	40
Gráfico 5 -	Sentido e direção vento em ano modelo (2018) .....	48
Gráfico 6 -	Gráfico de resíduos ANSYS.....	75
Gráfico 7 -	Comparação temperaturas do dia 16/01/2020 e arquivos climáticos TMY.....	84
Gráfico 8 -	Comparação temperaturas do dia 20/01/2020 e arquivos climáticos TMY.....	84
Gráfico 9 -	Comparação temperaturas do dia 20/12/2019 e arquivos climáticos TMY.....	85
Gráfico 10 -	Discriminação das características morfológicas - Região 1.....	90
Gráfico 11 -	Teste independência de malha área 2 - Não verticalizado.....	91
Gráfico 12 -	Teste independência de malha área 2 - Verticalizado.....	91
Gráfico 13 -	Comparação velocidades do ar - Cenário 1 e 1.1 Leste.....	93
Gráfico 14 -	Comparação velocidades do ar - Cenário 1 e 1.1 Sudeste.....	99
Gráfico 15 -	Discriminação das características morfológicas - Região 2.....	107
Gráfico 16 -	Teste independência de malha área 3 - Não verticalizado.....	107
Gráfico 17 -	Teste independência de malha área 3 - Verticalizado.....	108
Gráfico 18 -	Comparação velocidades do ar - Cenário 2 e 2.1 Leste.....	110
Gráfico 19 -	Comparação velocidades do ar - Cenário 2 e 2.1 Sudeste.....	118
Gráfico 20 -	Discriminação das características morfológicas - Região 3.....	124
Gráfico 21 -	Teste independência de malha área 3 - Não verticalizado.....	124
Gráfico 22 -	Teste independência de malha área 2 - Verticalizado.....	125
Gráfico 23 -	Comparação velocidades do ar - Cenário 3 e 3.1 Leste.....	127
Gráfico 24 -	Comparação velocidades do ar - Cenário 3 e 3.1 Sudeste.....	133
Gráfico 25 -	Temperatura e umidade do ar 20/01/2020.....	136
Gráfico 26 -	Dados do aeroporto x média coletada - 20/01/2020.....	137
Gráfico 27 -	Comparação ponto 1 e 2 - Região 3.....	138



Gráfico 28 - Regressão dos dados simulados x dados coletados - Ponto de coleta 1.....	146
Gráfico 29 - Regressão dos dados simulados x dados coletados - Ponto de coleta 2	146
Gráfico 30 - Comparação dados de temperatura do ar do Aeroporto Pinto Martins e os dois pontos de coleta.....	147
Gráfico 31 - Comparação dados temperatura do ar região 3 - Cenários 3 e 3.1.....	148
Gráfico 32 - Temperatura e umidade do ar 20/12/2019.....	149
Gráfico 33 - Dados aeroporto x média coletada - 20/12/2019.....	150
Gráfico 34 - Comparação ponto 1 e 2 - Região 2.....	151
Gráfico 35 - Temperatura e umidade do ar 16 de janeiro de 2020.....	153
Gráfico 36 - Dados aeroporto x média coletada - 16/01/2020.....	154
Gráfico 37 - Comparação ponto 1 e 2 - Região 1.....	155

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Escalas de tratamento no clima urbano.....	35
Tabela 2 -	Classificação UCZ.....	42
Tabela 3 -	Normais climatológicas de Fortaleza 1961-2010.....	47
Tabela 4 -	Número mínimo de vagas.....	52
Tabela 5 -	Recuos Residenciais.....	52
Tabela 6 -	Recuos Comerciais e Serviços Múltiplos.....	52
Tabela 7 -	Índices urbanísticos ZEDUS Centro.....	53
Tabela 8 -	Normais da temperatura do ar entre 1961 - 2010.....	57
Tabela 9 -	Equipamentos utilizados no levantamento de dados.....	58
Tabela 10 -	Cenários de estudo.....	59
Tabela 11 -	Capacidade construtiva máxima.....	66
Tabela 12 -	Relação das simulações produzidas no ANSYS.....	70
Tabela 13 -	Coeficientes de rugosidade do terreno.....	73
Tabela 14 -	Equações de correção perfil de vento.....	73
Tabela 15 -	Relação das simulações produzidas no ENVI-met.....	79
Tabela 16 -	Materiais construtivos utilizados.....	80
Tabela 17 -	Albedo e emissividade dos materiais simulados.....	82
Tabela 18 -	Dados de entrada simulação ENVI-met, 20/12/2019.....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAIN	Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias
ACM	<i>Aluminium Composite Material</i>
AIP	Instituto Americano de Física
BRE	<i>Building Research Establishment</i>
CE	Ceará
CFD	Dinâmica dos Fluídos Computacional
CIU	Camada Intraurbana
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLU	Camada Limite Urbana
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CSM	Comércio e Serviços Múltiplos
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IA	Índice de aproveitamento
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Agência Internacional de Energia
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LAD	<i>Densidade de Área Folar</i>
LUOS	Lei de Uso e Ocupação do Solo
NBR	Normas Brasileiras
NURBS	<i>Non Uniform Rational Basis Spline</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PGV	Polo Gerador de Viagens
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
RIST	Relatório de Impacto Sobre o Sistema de Tráfego
SECULT	Secretária da Cultura
SECULTFOR	Secretária de Cultura de Fortaleza
SEUMA	Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente
SVF	<i>Sky View Factor</i>

TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
TRY	<i>Teste Reference Year</i>
UCZ	<i>Urban Climate Zones</i>
UNFPA	<i>United Nations Population Fund</i>
ZEDUS	Zonas Especiais de Dinamização Urbanística e Socioeconômica
ZEPH	Zonas Especiais de Preservação do Patrimônio, Paisagístico, Histórico, Cultural e Arqueológico
ZU-1	Zona de Urbanização Prioritária 1

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
1.1	OBJETIVOS.....	25
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>25</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>25</b>
1.2	SÚMULA METODOLÓGICA.....	26
<b>2</b>	<b>CONCEITUAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>27</b>
2.1	CLIMA.....	31
2.2	CLIMA URBANO.....	32
2.3	CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA E MICROCLIMA URBANO.....	33
2.4	ILHA DE CALOR URBANA.....	36
2.5	GRADIENTE DE VELOCIDADE DE VENTO URBANO.....	38
2.6	EFEITOS AERODINÂMICOS.....	40
2.7	CÂNION URBANO E ZONAS CLIMÁTICAS URBANAS.....	42
2.8	FATOR DE VISÃO DE CÉU.....	43
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>46</b>
3.1	LEI DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO 2017.....	51
<b>4</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>55</b>
4.1	VISITAS A CAMPO.....	55
4.2	CENÁRIO VERTICALIZADO.....	60
<b>4.2.1</b>	<b>Edificações corporativas em Fortaleza.....</b>	<b>60</b>
4.2.1.1	Washington Soares Trading Center.....	60
4.2.1.2	BS Design.....	61
4.2.1.3	Centurion Business Center.....	62
4.2.1.4	Humberto Santana Business.....	64
4.3	PARÂMETROS DE MODELAGEM.....	65
<b>4.3.1</b>	<b>Simulação da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).....</b>	<b>67</b>
<b>4.3.2</b>	<b>ANSYS CFD.....</b>	<b>68</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Modelagem para o ANSYS.....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Meshing.....</b>	<b>70</b>
<b>4.3.5</b>	<b>CFX-Pre.....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.6</b>	<b>CFX-Solver e CFX-Post.....</b>	<b>74</b>

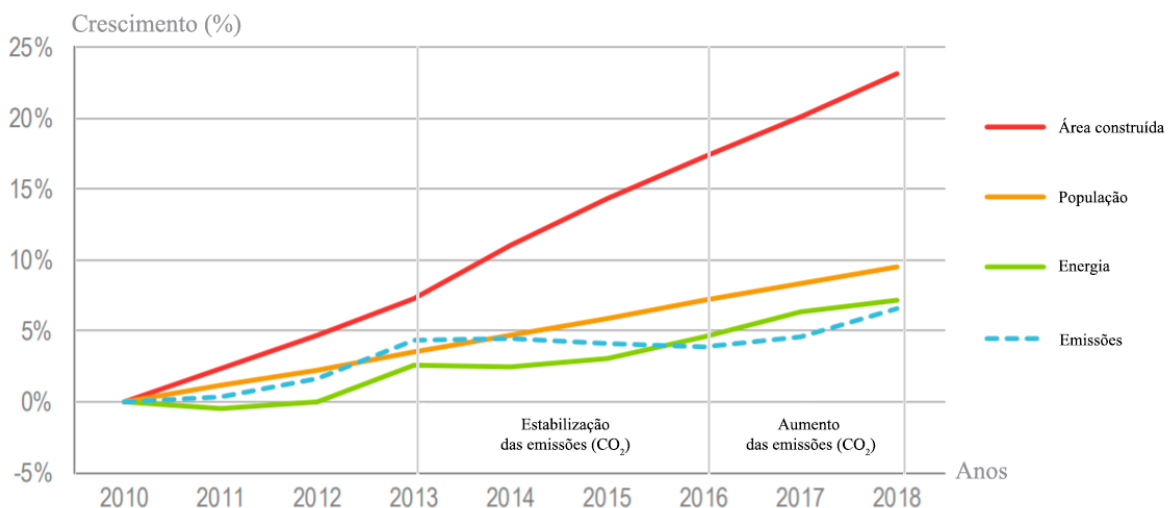
4.3.7	<b>Fator de visão de céu.....</b>	<b>76</b>
4.3.8	<b>ENVI-met.....</b>	<b>77</b>
4.3.8.1	Modelagem.....	78
4.3.8.2	Dados de entrada da simulação.....	85
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....</b>	<b>87</b>
5.1	REGIÃO 1 - VENTILAÇÃO.....	87
5.1.1	<b>Simulação ANSYS.....</b>	<b>91</b>
5.1.2	<b>Cenário ventilação Leste.....</b>	<b>91</b>
5.1.3	<b>Cenário ventilação Sudeste.....</b>	<b>98</b>
5.1.4	<b>Súmula das simulações da região 1.....</b>	<b>104</b>
5.2	REGIÃO 2 - VENTILAÇÃO.....	104
5.2.1	<b>Simulação ANSYS.....</b>	<b>107</b>
5.2.2	<b>Cenário ventilação Leste.....</b>	<b>108</b>
5.2.3	<b>Cenário ventilação Sudeste.....</b>	<b>116</b>
5.2.4	<b>Súmula das simulações da região 2.....</b>	<b>120</b>
5.3	REGIÃO 3 - VENTILAÇÃO.....	121
5.3.1	<b>Simulação ANSYS.....</b>	<b>124</b>
5.3.2	<b>Cenário ventilação Leste.....</b>	<b>125</b>
5.3.3	<b>Cenário ventilação Sudeste.....</b>	<b>131</b>
5.3.4	<b>Súmula das simulações da região 3.....</b>	<b>135</b>
5.4	INSOLAÇÃO, FATOR DE VISÃO DE CÉU E TEMPERATURA DO AR.....	136
5.4.1	<b>Região 3.....</b>	<b>136</b>
5.4.2	<b>Região 2.....</b>	<b>148</b>
5.4.3	<b>Região 1.....</b>	<b>152</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÃO FINAIS.....</b>	<b>157</b>
6.1	LIMITAÇÕES DE PESQUISA E PROSPECÇÕES A TRABALHOS FUTUROS.....	159
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>161</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a Nações Unidas (2017), entre os anos de 2010 a 2016, as emissões de gás carbônico no setor da construção civil aumentaram e cerca de 76 gigatoneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) foram liberadas na atmosfera. Este segmento necessita de uma melhora de 30% de sua eficiência energética até 2030 para manter as metas do Acordo de Paris (2015), no qual os países signatários se comprometeram a diminuir a produção dos gases do efeito estufa. Este mesmo estudo revela ainda, que o setor da construção civil é responsável por 39% das emissões de gás carbônico associadas ao consumo e à produção de energia.

Em 2018 houve um aumento de 2% da produção de CO<sub>2</sub> pelo segundo ano consecutivo - cerca de 9,7 gigatoneladas - sugerindo um aumento na poluição causada por esse setor (IEA, 2020). Este estudo apresenta que a consequência da poluição se deve principalmente em função do aumento da população e, conseqüentemente, da área construída nas cidades. O gráfico 1 revela o aumento da produção das emissões de CO<sub>2</sub>, em comparação ao crescimento da produção da área construída, do aumento da população e da demanda por produção de energia.

Gráfico 1 - Mudanças na área construída, população, uso de energia em edificações e emissões de dióxido de carbono mundialmente



Fonte: Adaptado de IEA (2020).

Acioly e Davidson (1998) comentam que o aumento da densidade urbana é um assunto controverso, complexo e por muitas vezes confuso. Assim, as decisões tomadas no âmbito urbano podem ter impactos significativos no meio ambiente, no processo de desenvolvimento da cidade, na saúde e na produtividade de seus cidadãos em cada microclima. Sobre a densidade urbana, a concentração cidadina possibilita a criação de espaços de interação social e cultural e,

ao mesmo tempo, alivia as pressões do crescimento populacional sobre as zonas rurais, indicando que a vida em cidades mais adensadas é uma tendência para o desenvolvimento dos centros urbanos (UNFPA, 2011).

Em virtude da complexa morfologia verificada nestes centros, fatores como a incidência ventilativa no interior da malha urbana e no interior de unidades habitacionais se tornam imprevisíveis de se determinar. Assim, fazendo com que o diagnóstico do impacto da morfologia urbana seja um processo complexo. Verifica-se, por exemplo, que edifícios mais altos, situados em determinados contextos, desviam fluxos e elevam a turbulência gerando zonas de recirculação do ar e criando condições mais favoráveis à ventilação natural - se comparadas à trechos nos quais os edifícios possuem a mesma altura, afetando o plano no nível do pedestre e as aberturas de edifícios no sotavento (GOLANY, 1996; GIVONI, 1994; DUARTE; SERRA, 2003; GONÇALVES, 2003; BRANDÃO, 2010; PENG *et al.*, 2018).

Desse modo, é válido ressaltar que a relação entre densidade construída e o conforto térmico em edifícios é um complexo equilíbrio entre parâmetros climáticos locais, organização espacial urbana e características arquitetônicas. Ainda que sejam consideradas as reconhecidas vantagens da maior concentração urbana, é preciso atentar para o fato de que o adensamento é determinante para a qualidade ambiental dos edifícios. Em grandes centros urbanos, a temperatura tende a ser mais elevada em função da alteração no balanço radiativo e o comportamento dos fluxos de ar é significativamente alterado.

Por outro lado, ao reduzir parcelas visíveis de céu e sol, devido à presença de obstáculos no entorno imediato, diminui-se, também, a radiação solar incidente e absorvida por superfícies horizontais e verticais. Strømman-Andersen e Sttrup (2011) apontam que no nível do edifício, construções com fachadas viradas a cânions urbanos, podem promover um aumento no consumo de energia total em prédios comerciais superior a 30% e em habitações acima de 19% em relação ao consumo de climatizadores artificiais. Todavia, Ruiz *et al.* (2015), em um estudo realizado na Argentina, apontam que o planejamento urbano pode utilizar o cânion urbano como ferramenta para a modificação do comportamento térmico das cidades de forma positiva, como por exemplo, diminuindo a necessidade de calefação em cidades frias.

Com isso, o planejamento criterioso da verticalização da paisagem urbana pode determinar, inclusive, maiores velocidades aos fluxos que ocasionará maior intensidade ao campo de pressões devido ao vento sobre as fachadas, aumentando as taxas de renovação do ar e contribuindo para a qualidade do ar em edifícios (ALLARD; GHIAUS; SZUCS, 2010). Entretanto, quando não se realiza um planejamento urbano integrado aos estudos de impacto ambiental é possível criar, por exemplo, regiões com baixa renovação de ar e precária



capacidade de penetração solar no nível do pedestre. Este fato, somadas à umidade e resíduos sólidos, tende a aumentar os riscos e susceptibilidades a doenças infecciosas a população bem como a patologias urbanas como intensificação da ilha de calor e inversões térmicas (LANDSBERG, 1981; ACIOLY; DAVIDSON, 1998; MAKVANDI *et al.*, 2019). Ou seja, a urbanização é responsável pela mudança do comportamento climático em regiões urbanas, haja vista a relação de reciprocidade entre o microclima e a forma do edifício (CHANDLER, 1976; SHARAG, 1998). Sendo assim, Katzchener (1997) corrobora em seu estudo que o planejamento urbano possui um papel fundamental no conforto ambiental. Já Zhao *et al.* (2011), comenta que o respeito às condições climáticas eleva a qualidade de vida dos habitantes de uma cidade, promovendo o aumento no conforto ambiental.

Em relação a área de estudo desta pesquisa, o centro da cidade de Fortaleza – Ceará, observa-se um processo de degradação física nos últimos anos. Em um breve panorama legislativo, observa-se que a LUOS de 1996, consolidada em 2006, configura o centro como uma zona de urbanização prioritária 1 (ZU-1), que permite a verticalização de até 12 metros de altura sem a necessidade de afastamentos, mas não considera o afastamento gradual em função da verticalização dos edifícios. De forma peculiar, nesta época a lei de uso e ocupação do solo permitia edifícios com altura até 95 metros de altura e com o índice de aproveitamento máximo em 3. Contudo, não foi apresentado nenhum edifício desta altura construída nesta época. Verifica-se também, a não apresentação explícita na lei para as demarcações específicas das áreas de preservação ambiental e histórica.

E de forma anterior a legislação atual, houve um estudo de compatibilização do Plano Diretor Participativo (2015) com a Lei de Uso e Ocupação do Solo (2009), com a modificação da demarcação das Zonas Especiais de Preservação do Patrimônio, Paisagístico, Histórico, Cultural e Arqueológico (ZEPH) e as Zonas Especiais de Dinamização Urbanística e Socioeconômica (ZEDUS). Essa lei caracteriza a maior parte da zona central de Fortaleza, como zona de ocupação preferencial (ZOP). Esta zona é identificada por disponibilizar infraestrutura e serviços urbanos, além da presença de imóveis não utilizados e/ou subutilizados, os quais podem ser destinados à intensificação e dinamização do uso do solo. Os principais índices que configuraram esta área são: a taxa de ocupação com o índice 3 e o gabarito máximo de 72 metros. No entanto, até o momento, a região central não apresentou a expressiva verticalização para atender na totalidade da área os índices máximos em suas construções.

A partir da LUOS de 2017, utilizada como um instrumento de renovação do espaço central, intensificou-se na a área central a ZEDUS, que caracteriza o território à implantação

e/ou intensificação de atividades sociais e econômicas com respeito a diversidade local e visando o atendimento dos princípios da sustentabilidade. Os principais índices urbanísticos modificados foram: aumento do gabarito edificado para 95 metros e índice de aproveitamento com 4. Entretanto, este aumento da capacidade construtiva do centro pode ocasionar problemas estruturais urbanos e climáticos para região, uma vez que se trata de um tecido urbano pouco vascularizado, com pequenas dimensões. O ordenamento urbano deve ser seguido de modificações estruturais na malha, uma vez que se não considerado as condicionantes microclimáticas urbanas corre-se o risco de a legislação não ser adequada ao contexto citadino (GONÇALVEZ; BODE, 2015).

Com o possível aumento da densidade construtiva no meio urbano e, conseqüentemente, do bloqueio solar no nível do pedestre, a região central terá potencial de produzir resistências aerodinâmicas. O que pode diminuir a qualidade da circulação de ar, bem como intensificar o efeito de ilha de calor.

Portanto, este estudo tem o intuito de verificar como o ordenamento urbano afeta o microclima no centro da cidade de Fortaleza no âmbito comparativo entre as LUOS de 2009 e 2017. Observando-se especificamente a área definida, considera-se como parâmetros de análise: a quantidade de área verde; área livre; gabarito das edificações e possibilidade de elevadas diferenças entre a largura do eixo carroçável atual com a altura dos empreendimentos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Averiguar como os possíveis padrões construtivos, impulsionados pela legislação urbanística, poderiam modificar o microclima urbano no centro da cidade de Fortaleza, Ceará.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Elencou-se os seguintes objetivos específicos para a construção deste trabalho:

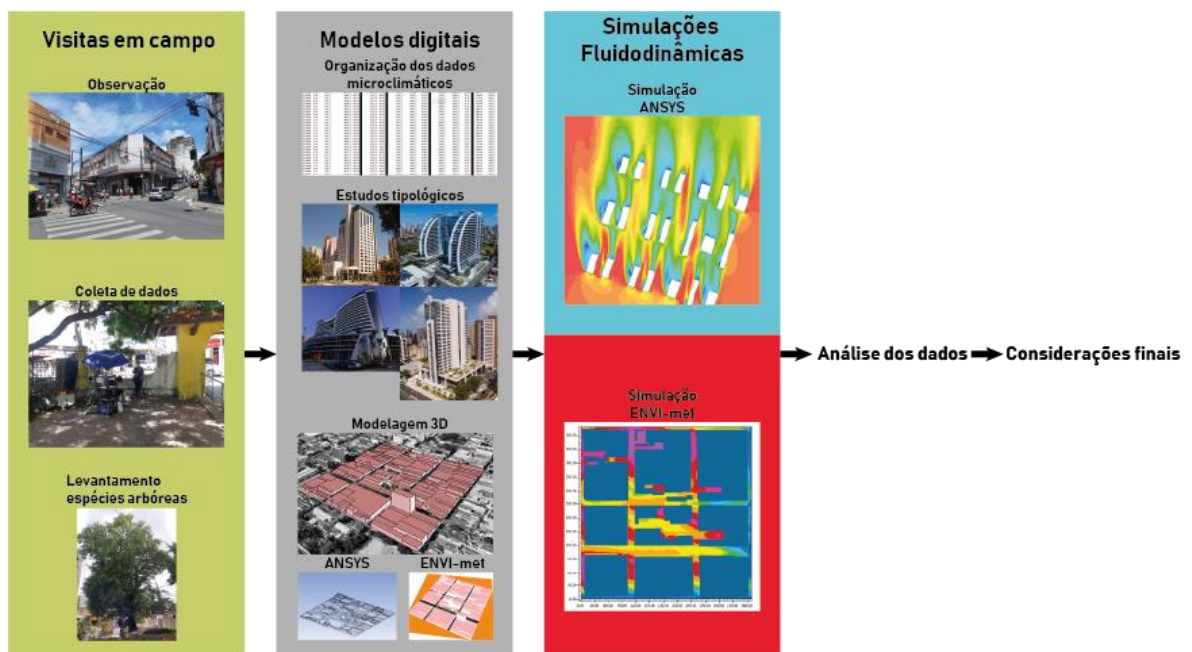
- a) Analisar o impacto da morfologia urbana no fluxo do ar, considerando somente a velocidade e o direção do vento;
- b) Avaliar os reflexos da densidade construída sobre a temperatura do ar em 3 estudos de caso;

- c) Aferir a influência dos corpos d'água e vegetação arbórea de grande porte no microclima urbano na região estudada;
- d) medir a possível influência da obstrução dos edifícios altos no centro de Fortaleza sobre a radiação solar direta no nível do pedestre e seus impactos no microclima.

## 1.2 SÚMULA METODOLÓGICA

O método desta dissertação foi dividido em quatro eixos, ora consecutivos, ora concomitantes. Essa divisão ocorre em função da extensão das etapas produzidas em cada eixo, portanto, constituiu-se o capítulo 4, no qual foi discutido em minúcia os procedimentos realizados nesta pesquisa. Primeiramente foram realizadas revisões bibliográficas, visitas a campo, coletas de dados microclimáticos e de espécies arbóreas da região. Posteriormente, iniciou-se a etapa de condensação e tratamento dos dados microclimáticos e modelagem digital dos objetos de estudo. Com isso, simulou-se em dois softwares de estudos fluidodinâmicos distintos. Por fim, foram validados e analisados os dados simulados. A figura 1 elucida de maneira geral a trajetória:

Figura 1 - Súmula metodológica



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

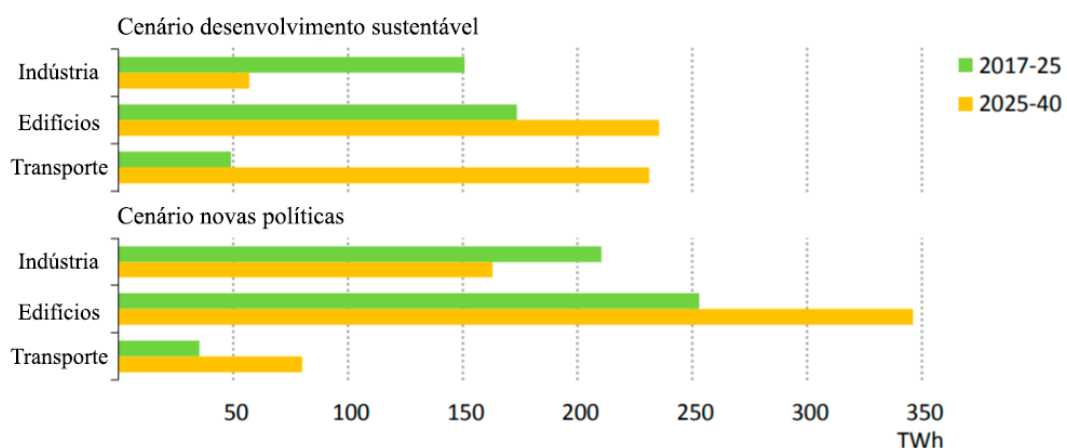
## 2 CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

Como principal espaço de concentração humana, a cidade comporta cerca de 2% do espaço terrestre e abriga mais da metade da população mundial consumindo entre 60% a 80% de energia produzida no mundo (UNITED NATIONS POPULATION FUND, 2010). O *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia - IEA) (2018), produz projeções de gastos para 2040 a partir de 3 cenários de políticas relacionadas ao consumo de energia no planeta, sendo elas denominadas: a) novas políticas (implementação plena do acordo de Paris); b) políticas atuais (utilização plena das leis e regulações ambientais vigentes até 2018); c) desenvolvimento sustentável (acesso universal a energia até 2030, o comprometimento do acordo de Paris e a redução das mortes relacionadas a poluição do ar causada pela produção de energia).

Com isso, considerando o prospecto ilustrado pelo cenário das novas políticas, o mundo crescerá uma média de 45% na demanda por energia. Na América do Sul, é apontado um crescimento próximo a 40 % entre 2017 e 2040. Já no Brasil, os dados disponíveis estimam um aumento na demanda de energia para 2040 de 212,5% em comparação ao ano 2000.

O gráfico 2 ilustra o consumo de energia em dois cenários distintos, dos três principais consumidores de energia em uma estimativa entre 2017 a 2025. Os principais consumidores de energia elétrica identificados no IEA (2018) foram a indústria, os edifícios e os transportes. Todavia, os edifícios são os maiores consumidores de energia em ambos os cenários.

Gráfico 2 - Comparação do consumo de energia elétrica entre indústria, edificações e transporte



Fonte: Adaptado de IEA (2018).

O IEA (2018) associa o aumento da demanda de energia no mundo a fatores como: aumento populacional, urbanização e ao crescimento econômico. Neste sentido, Hui (2001) corrobora com esta ideia afirmando que o aumento populacional e novos parâmetros

econômicos direcionam a um acréscimo da densidade de pessoas na região urbana, a fim de reduzir custos de serviços públicos.

Considerando cidades em climas quentes, a diminuição da quantidade de radiação solar absorvida pelas superfícies de edificações pode ser válida para a melhoria das condições ambientais internas, bem como a diminuição da temperatura do ar nos espaços públicos. Monteiro (1976) aponta que a morfologia urbana pode ser um fator decisivo para a eficiência energética no interior de edificações, assim como no conforto do pedestre. Gupta (1987) investigou a relação entre a forma urbana mais protegida em comparação à ocupação mais aberta em clima quente e seco, enfatizando os benefícios da primeira. E, Li e Wong (2007) realizaram em Hong Kong estudos semelhantes e verificaram que o aumento nos ângulos de obstrução do céu é acompanhado pela redução na carga térmica interna nestas edificações.

Santamouris *et al.* (2001), em um estudo realizado em Atenas, em clima quente e temperado, apontam pico de consumo energético no verão em função da necessidade de resfriamento das edificações no centro da cidade. Os mesmos autores constataam a diminuição significativa da velocidade do ar em consequência da morfologia urbana. Leite, Frota e Nazareth (2019) apontam um aumento no tempo de conforto térmico em edificação situadas em clima quente e úmido em função da mitigação da radiação solar direta, mas indicam a necessidade da ventilação natural como critério fundamental para sua manutenção. Baseado em estudos citados anteriormente, pode-se considerar que as obstruções provocadas pelas verticalizações propostas em cidades densas podem ser indicadores de anomalias microclimáticas, chegando a afetar também as unidades habitacionais.

Desta forma, a otimização do espaço urbano passa, necessariamente, pela questão do adensamento dos centros das cidades e os impactos ambientais consequentes. Considerando que a qualidade ambiental das edificações é reflexo da qualidade ambiental urbana, as variáveis e os processos climáticos devem ser considerados na adequação climática das edificações como forma de otimizar o conforto térmico e reduzir o consumo energético de climatização artificial (BARBIRATO; SOUZA; TORRES, 2007).

Miana (2010) avalia que o impacto ambiental causado por qualquer construção pode ser resumido nos seguintes fatores: influências sobre a ventilação ao redor dos edifícios; a dispersão da poluição; a ventilação natural das edificações; a insolação e iluminação natural; o acúmulo de radiação solar e o ruído urbano. Tais aspectos têm implicações diretas sobre a saúde, no conforto térmico, acústico, luminoso e no desempenho termoenergético das edificações. Com relação à ventilação natural, a qual será abordada neste trabalho, a presença de obstáculos no entorno constitui uma séria restrição ao potencial da pressão incidida pelo ar nas fachadas de

edifícios, uma vez que num ambiente adensado comumente ocorre a sua redução desta por obstáculos verticais, assim, mitigando a capacidade ventilativa e perturbando o fluxo de ar urbano.

Do ponto de vista do uso de condicionantes passivos como a ventilação e insolação, as mudanças geradas pela urbanização sobre as cidades tropicais são consideradas mais severas gerando situação de estresse bioclimático pelo aumento da temperatura do ar, diminuição da umidade relativa. Além disso, há um decréscimo da ventilação natural o que eleva o consumo energético para condicionamento ambiental dos edifícios (FREITAS, 2005). Assim, Romero (2001) observa que dentre todos os componentes do clima, as condições de ventilação sofrem as maiores alterações durante o processo de urbanização.

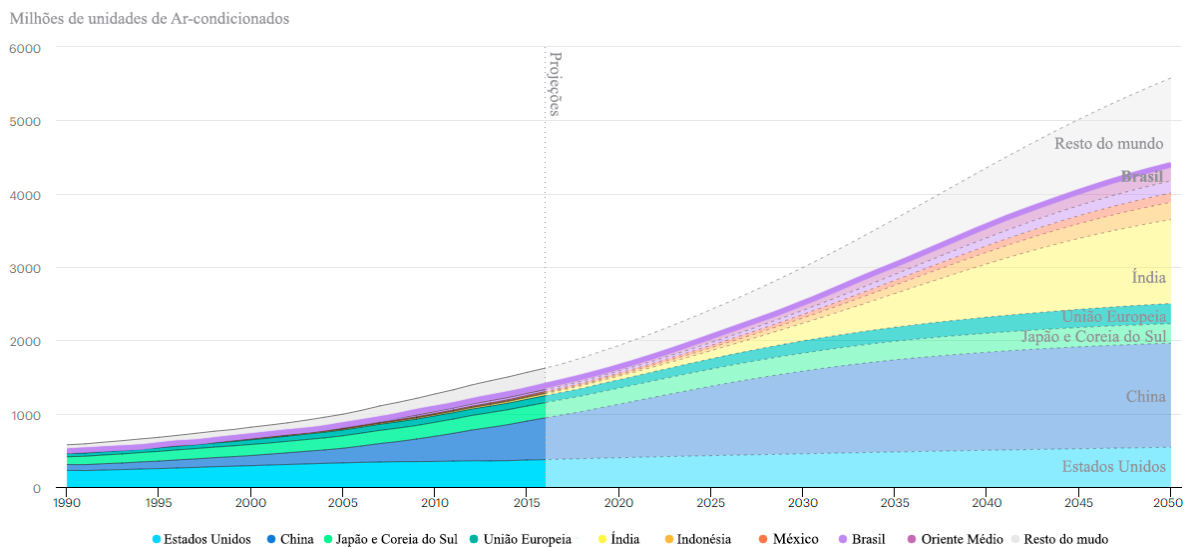
Em determinados contextos, os edifícios altos provocam o desvio do fluxo de vento e elevam a turbulência na região além de potencialmente criar zonas de recirculação de ar promovendo condições favoráveis à ventilação natural (GOLANY, 1996; GIVONI, 1994; DUARTE; SERRA, 2003; GONÇALVES, 2003; BRANDÃO, 2010; LEITE, 2015). Com isso, um planejamento criterioso da verticalização da paisagem urbana é um fator determinante no conforto dos usuários e na eficiência energética dos edifícios, pois edifícios altos podem estar relacionados a regiões com baixa renovação de ar e ao aumento da inércia térmica de uma região.

Oke (1973) explica que fatores como o tamanho da cidade, a velocidade do vento e a geometria dos vales e dos prédios podem auxiliar no incremento da temperatura intraurbana. Além desses fatores, pode-se inferir que a falta de vegetação das grandes cidades implica em menor evapotranspiração se comparadas as áreas rurais e as propriedades térmicas dos pavimentos intensificam a temperatura nas cidades. Assim, grandes metrópoles tendem a serem suscetíveis e a gerar um gradiente de temperatura que se irradia de um centro muito edificado até áreas menos urbanizadas no entorno da cidade. Essa diferença de temperatura é conhecida como ilha de calor.

Com o aumento do fenômeno ilha de calor - por consequência de uma urbanização que não considera os fatores naturais de ventilação, insolação e capacidade térmica dos materiais - o uso artificial de condicionamento térmico é imprescindível para a habitabilidade das edificações. A IEA (2018) aponta que em 2050, o gasto energético das edificações com resfriamento irá aumentar cerca de 37% do total do consumo das habitações. A mesma pesquisa revela ainda que países com clima quente e menos desenvolvidos serão os maiores utilizadores de sistemas de condicionamento artificial.

Em uma visão geral sobre a capacidade de compra do cidadão brasileiro, a partir deste estudo, aponta-se que o país estando em desenvolvimento econômico, projeta que parte do aumento da capacidade de compra da população menos assistida será remetida para a compra de condicionantes térmicos. O gráfico 3 aponta a comparação de estoques de ar-condicionado no mundo, destacando o Brasil como o país possuindo a maior quantidade prevista de estoque em comparação com os Estados Unidos, China, Japão, Coreia do Sul, União Europeia, Índia, Indonésia, México e Oriente médio.

Gráfico 3 - Estoque de Ar-condicionado no mundo



Fonte: Adaptado de IEA (2020).

De acordo com Fialho (2012), países de clima tropical demonstram um aumento na população urbana em decorrência do processo de urbanização e industrialização tardia. Somados a estes fatores, o déficit habitacional no país chegou a patamares de 7,17 milhões de unidades habitacionais em 2017 (ABRAIN, 2019); a produção de projetos urbanos para construção de habitações sociais é um importante aspecto para a constituição dos espaços urbanos. Considerando a maior política de habitação no país e um importante impulsionador da produção urbana é o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), auxiliando na construção e distribuição de habitações a famílias com renda de até 1,8 mil reais.

Ribeiro, Rufino e Moraes (2019) analisam a implantação de um conjunto do PMCMV e constatarem diminuições substanciais na velocidade do ar entre blocos, dentro das unidades habitacionais e no entorno imediato. Além disso, apontam que as simples estratégias de projeto poderiam mitigar esses efeitos. Já Irabi, Silva e Vieira (2019), em um estudo sobre políticas públicas em Minas Gerais, constatarem problemas como: implantação distante do centro da

cidade, patologias construtivas pós-ocupação e desconforto térmico no interior das unidades habitacionais.

Portanto, este panorama ilustra a necessidade de um planejamento urbano de qualidade, visto que os diversos fatores climáticos e construtivos podem interferir e afetar escalas distintas que vão desde o usuário no interior das unidades habitacionais a transeuntes; do consumo de energia; a produção de poluentes ocasionando a diminuição da qualidade de vida nas cidades.

## 2.1 CLIMA

O clima do planeta é consequência do movimento de translação em torno do sol, bem como o de rotação no próprio eixo da Terra. A diferença barométrica causada pelo aquecimento da radiação direta do sol no período do diurno e a ausência dele no período noturno, propicia a movimentação das massas de ar. Assim, as correntes marítimas são produzidas em conjunto com a inércia do planeta e as movimentações das massas de ar, como elementos fundamentais para a vida (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Com isso, são produzidos efeitos previsíveis que podemos chamar de clima. Este pode ser conceituado como os diferentes estados da atmosfera em um longo período, que se repetem de maneira previsível (AYOADE, 1991). Em relação a escala menor e o impacto no ser humano, Freitas (2005) caracteriza o clima como um conjunto de elementos meteorológicos, que agindo de forma recíproca entre si são os responsáveis pelas sensações de conforto ou não e pelas sensações de frio e de calor.

Deste modo, a interação da terra e o sol são os principais responsáveis por diversas mudanças climáticas em escalas diferente, causando resfriamento ou aquecimento. Conforme o Instituto Americano de Física (AIP) (2020), relacionou-se as principais datas para o entendimento da intensificação do aquecimento global a partir da ação antropogênica, as quais foram dispostas no quadro 1.

Quadro 1 - Linha do tempo de marcos na história da mudança climática

1800-1870	Primeira revolução industrial intensifica a urbanização e o aumento populacional.
1879	John Tyndall demonstra como gases bloqueiam a radiação infravermelha e que poderia levar a uma mudança climática a doravante.
1896	Svante Arrhenius é um dos pioneiros no cálculo do aquecimento global em consequência da emissão de CO <sub>2</sub> por ação antropogênica.
1870-1910	Segunda revolução industrial intensificando a urbanização e aumento populacional.
1930	Aquecimento Global começa a ser notícia em consequência a sensível mudança de temperatura mundial.
1945	É intensificado pelo governo Estadunidense pesquisas que foram uteis ao entendimento da mudança climática.
1955	É criado o primeiro modelo computacional convincente da atmosfera do planeta Terra.



1960	Aumento perceptível na quantidade de CO <sub>2</sub> na atmosfera com o aumento da média de temperatura global.
1972	Desastres naturais causados pelas mudanças climáticas na África, Ucrânia e Índia causa crise de suprimentos alimentares.
1985	Pesquisas anunciam que o aquecimento global pode ser intensificado em até duas vezes em consequência do aumento do gás metano e outros gases que intensificam este efeito.
1987	Convenção de Viena impõem restrições internacionais de emissão dos gases que destroem a camada de ozônio.
1988	Painel intergovernamental sobre as mudanças climáticas é estabelecido (IPCC).
1995	IPCC anuncia assinatura humana sobre os gases relacionados ao efeito estufa e esclarece possibilidade de um sério aquecimento no próximo século.
1998	O fenômeno do <i>El Niño</i> produz um ano excepcionalmente quente, sendo recorde de temperatura até o ano de 2014.
2007	IPCC evidencia os sérios efeitos relacionados ao aquecimento global.
2015	A produção e energia solar e eólica se tornam economicamente competitivas com energias produzidas por combustível fóssil.
2019	Temperatura global chega a médias de 14,8°C, maior temperatura em dezenas de milhares de anos e níveis de CO <sub>2</sub> na atmosfera são os maiores em milhões de anos.

Fonte: Adaptado de AIP (2020).

A partir da linha do tempo é possível traçar uma correlação entre o aumento populacional e a necessidade da produção de energia. Todavia, sendo esta produção de energia baseada no combustível fóssil, a emissão de gases que agravam o efeito estufa tendem a intensificar este fenômeno. Assim, como já visto anteriormente, as cidades incrementam a temperatura do ar para além das mudanças climáticas, portanto o projeto urbano é decisivo no condicionamento natural dos recursos ambientais.

## 2.2 CLIMA URBANO

Esta escala específica do clima urbano, revela o conjunto de modificações topológicas locais que constituem alterações em condicionantes climáticas como: temperatura do ar, pluviosidade, umidade e ventilação (FREITAS, 2005). Geiger (1961) comenta sobre os determinantes do clima urbano:

A causa das características peculiares do clima urbano está na alteração dos balanços térmico e hídrico, e é ocasionada, em primeiro lugar, pela substituição do solo natural pela pedra, sobre a qual, ainda por cima, a água da chuva se escoar rapidamente; e pelos seus edifícios que em conjunto aumentam a rugosidade da superfície. Acrescente-se a estes fatos a fonte de calor constituída pelos lumes caseiros e pela indústria, e finalmente o aumento das poeiras na atmosfera urbana e a sua poluição com os gases de escape dos motores dos veículos, dos fogos das habitações e da indústria (GEIGER, 1961, p. 503).

Segundo a teoria do clima urbano apresentada por Monteiro (1976), no clássico “Teoria e Clima Urbano”, o autor evidencia uma preocupação do emprego holístico de ideias

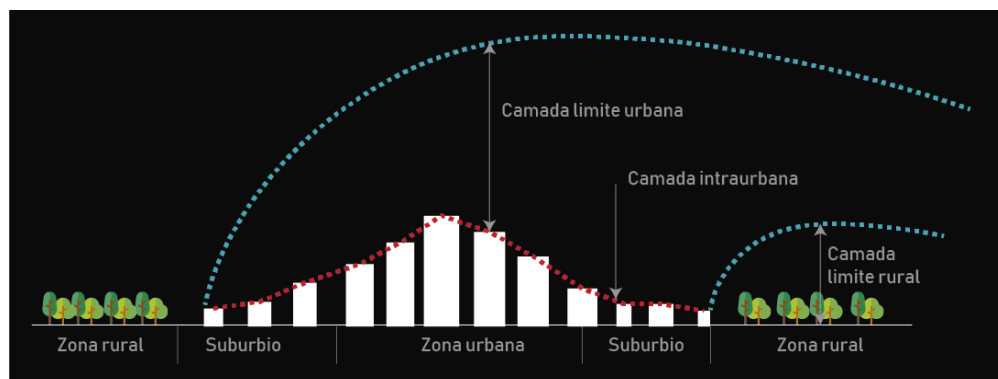
fundamentais com diferentes ordens de grandeza, organização e hierarquias. O mesmo autor apresenta que o clima urbano é o sistema que abrange o clima de um espaço urbano específico, sendo o núcleo de um sistema interrelacionado com o ambiente regional e maiores escalas climáticas. Com isso, entende-se que Monteiro (1976) estrutura a abordagem dos principais fatores climáticos a elementos da geografia, para a compreensão das intempéries no ambiente urbano e formula a organização climática da cidade como: aberto, evolutivo, dinâmico, adaptativo, auto regulável e único.

Logo, essa caracterização da cidade como um sistema aberto, ou seja, sempre recebendo novas condicionantes, as fazem ser dinâmicas e necessariamente solicitando que o sistema permaneça se adaptando e se auto regulando, uma vez que cada cidade possui condicionantes únicas. Nesta perspectiva, Chandler (1976) entende que o clima urbano, como os efeitos da interferência da ocupação dos sistemas naturais, altera as características do ar no interior e acima das cidades. Assim, as modificações do clima natural constituem a composição da paisagem urbana.

### 2.3 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA E MICROCLIMA URBANO

Segundo Garratt (1992), a Camada Limite Atmosférica (CLA) é definida como área afetada em função das propriedades morfológicas na superfície terrestre, as quais até uma determinada altura geram turbulência e produzem recirculação do ar. Oke (1987) divide a CLA em duas camadas menores: uma com abrangência regional denominada Camada Limite Urbana (CLU) e uma segunda, com impacto local na região abaixo da linha das edificações nos centros urbanos, a Camada Intraurbana (CIU). A figura 2 ilustra as demarcações destas camadas:

Figura 2 - Esquema da camada limite atmosférica e sub-regiões



Fonte: Adaptada de Oke (1987).

Dentre os efeitos produzidos próximos em função da superfície terrestre, a rugosidade aerodinâmica do ambiente construído, a porosidade em relação a permeabilidade dos ventos e a sua cobertura arbórea são fatores determinantes para a produção do gradiente de vento urbano (OKE, 1987). Assim, Izard (1997) comenta que a necessidade de se conhecer o clima precede da identificação do método projetual, observando a influência de cada decisão sobre a performance do objeto construído. A partir disso, entende-se que a compreensão do clima é essencial para a produção de projetos arquitetônicos e urbanísticos.

Nesta perspectiva, ao trazer a ideia climatológica, a matéria da arquitetura e urbanismo é essencial para a compreensão das variáveis climatológicas. Com isso, Mascaró (1996) versa sobre a delimitação do microclima ao explicitar que

Microclima é um conceito impreciso, porém significativo. Pode-se usar a palavra como referência a fenômenos atmosféricos próprios de um vale profundo, abrigado dos elementos climáticos como a radiação solar ou os ventos, de uma baía rodeada por montanhas, mas também de uma rua ou uma praça. Equivale a um desvio climático de características singulares e reconhecíveis – um recinto atmosférico de limites físicos identificáveis, como uma rua por exemplo (MASCARÓ, 1996, p. 39).

Assim, para melhor delimitar o objeto de estudo, Monteiro e Mendonça (2003) classificam as hierarquias das escalas climáticas. A configuração dos sistemas menores influencia diretamente nos sistemas maiores, através das trocas radiativas das camadas limites em cada domínio. Desse modo, a tabela 1 evidencia as diferentes escalas de estudo, onde se delimita a escala trabalhada, neste trabalho, bem como suas particularidades:

Tabela 1 - Escalas de tratamento no clima urbano

Ordens de Grandeza	Unidades de Superfície	Escalas cartográficas de tratamento	Espaços Climáticos	Espaços urbanos	Estratégias de abordagem		
					Meios de observação	Fatores de Organização	Técnicas de análise
I	Milhões de Km	1:45.000.000 1:10.000.000	Zonal	-	Satélites, nefanâçoses	Latitude	Caracterização geral comparativa
III	Milhões de Km	1:5.000.000 1:2.000.000	Regional	-	Cartas sinóticas, sondagens aerológicas	Centro de ação atmosférica	Rede transectos
IV	Centenas de Km	1:1.000.000 1:500.000	Sub-Regional	Metrópole, Grande área metropolitana	Rede meteorológica de superfície	Fatores geográficos	Mapeamento sistemático
V	Dezenas de Km	1:250.000 1:100.000	Local	Área metropolitana	Posto meteorológico	Integração geológica	Análise espacial
-	Centenas de metros	1:50.000 1:25.000	Mesoclima	Cidade grande, bairro ou subúrbio de metrópole	Registros móveis	Urbanismo	Especial
-	Dezenas de metros	1:10.000 1:25.000	Topoclima	Pequena cidade, fâcias de bairro	Detalhe	Arquitetura	
-	Metros	1:2.000	Microclima	Grande edificação, habitação, setor de habitação	Baterias de instrumentos especiais	Habitação	

Fonte: Monteiro e Mendonça (2003).

O estudo a ser desenvolvido neste trabalho se concentra na menor escala, relacionada a metros em seu nível de grandeza, o microclima. Esta escala é necessária para o entendimento das demais escalas maiores de análise, já que o desenvolvimento urbano e seu impacto é um fator decisivo na compreensão da mudança climática na escala global (LEITE, 2012). Conseqüentemente, os centros urbanos modificam o microclima e, assim, tornando necessária sua análise para o atendimento das necessidades projetuais.

## 2.4 ILHA DE CALOR URBANA

A complexidade dos assentamentos urbanos promove distintas modificações na atmosfera. Tais configurações, para além da modificação da superfície, provocam alterações na temperatura do ar. Por isso, as cidades condicionam seus próprios climas em função do balanço térmico criado com o seu desenvolvimento (OKE *et al.*, 1999). Neste sentido, sendo a ilha de calor conceituada como a diferença entre a temperatura interurbana, em comparação a temperatura intraurbana, Oke (1978) relata que a ilha de calor é um dos fenômenos mais bem documentados da mudança do clima pela ação do homem. Uma das primeiras documentações produzidas do fenômeno de modificação do clima em função da urbanidade é datado por Luke Howard em 1833, na qual o autor evidencia uma nuvem de fuligem industrial que levou ao desconforto térmico e à formação da ilha de calor em Londres.

Uma vez que a densidade urbana é um fator fundamental para a produção da ilha de calor e dos demais fenômenos aerodinâmicos, Oliveira (1988) discorre sobre o processo de verticalização e conclui que o mesmo deve ser analisado tanto em relação à carga térmica recebida quanto em como as atividades antrópicas ali são desempenhadas. Já que não é somente a verticalização, mas a impermeabilização e o aumento do albedo pelo asfalto que produzem uma maior capacidade de armazenamento térmico, que por sua vez, incrementam a temperatura do ar (IZARD *et al.*, 1997; MOHAJERANI; BAKARIC; JEFFREY- BAILEY, 2017; HALIPAH *et al.*, 2018).

De tal modo, a diferença entre os albedos dos materiais pode ser observada principalmente no período noturno, onde as superfícies de baixo albedo rapidamente se resfriam com as trocas convectivas pelo ar. Todavia, materiais de alto albedo demoram para dissipar seu calor, aumentando a temperatura do ar. Lombardo (1985, p. 28), em um dos estudos pioneiros no Brasil, aponta que:

O fenômeno ilha de calor da metrópole enquadra-se no contexto da ecologia urbana e, mais especificamente, na climatologia urbana. Na avaliação da ação antrópica sobre as condições climáticas é imprescindível uma observação meteorológica para ajustar às escalas inferiores de abordagem. Nesse sentido, a pesquisa, em níveis micro, topo e mesoclimáticos, pode revelar o grau de interferência da ação do homem nas condições ambientais [...].

Conforme Monteiro (1976), os efeitos da ilha de calor em altas latitudes possuem consequências positivas, pois no inverno, em consequência do albedo e de uma possível proximidade das edificações, o calor do sol que é armazenado pelas superfícies da cidade por mais tempo, diminuindo a necessidade de gasto energético de aquecimento no interior das edificações. Contudo, Freitas (2005) identifica que em climas tropicais e em estações quentes, a ilha de calor propicia a retenção de poluição no ar intensificando o fenômeno de inversão térmica.

Acerca do efeito de poluição do ar causado pela ilha de calor, visualiza-se que ele ocorre concomitante ao aumento da temperatura do ar e sua tendência é permanecer em locais mais urbanizados em função das obstruções verticais e a dificuldade de penetração de ventilação na malha urbana dificultando a dissipação da poluição do ar (ROMERO, 2011). Já o fenômeno da inversão térmica é conceituado como uma camada de ar quente sobreposta a uma fria, impedindo seu natural movimento ascendente e fazendo com que poluentes em suspensão no ar se mantenham na superfície (GALVANI, 2010).

O impacto exato das mudanças climáticas no efeito da ilha de calor urbana ainda é incerto, visto a quantidade de variáveis desconhecidas que o afetam (CHAPMAN *et al.*, 2017). No entanto, é sabido que os efeitos de exposição prolongada a particulados em suspensão no ar e a altas temperaturas causam problemas como desconforto térmico e respiratórios, e em alguns casos podendo se agravar levando a hospitalizações e mortes (KHAN *et al.*, 2020). De tal modo, Heaviside, Vardoulakis e Cai (2016) conjecturam a possibilidade do aumento da mortalidade relacionada ao incremento da temperatura da terra, em consequência das mudanças climáticas.

Desse modo, como forma de demonstrar as consequências do alto adensamento urbano, Galdies e Lau (2020) analisaram duas ondas de calor ocorridas em Hong Kong, em agosto de 2013 e maio de 2018, e seus impactos em diferentes áreas urbanas. Neste estudo, constatou-se que os cidadãos localizados em regiões residenciais de alta densidades são mais propensos a problemas de saúde ocasionados por este efeito (efeito ilha de calor) por um período prolongado. O mesmo autor adiciona que em função do aquecimento global, é estimado um aumento de até 4,3°C na temperatura do ar, para o fim do século na área urbana de Hong Kong. Todavia, foi proposto pelo governo o projeto de planejamento estratégico de Hong Kong 2030,

o qual aponta mudanças da cobertura da cidade, criação de novos centros urbanos, desenvolvimento de áreas antigas e a potencialização da paisagem urbana com áreas de cobertura natural. Já que a cidade mais densa construída do mundo (NICHOL; HANG; NG, 2014; CHAPMAN *et al.*, 2017), se estimativas forem confirmadas e a temperatura intraurbana aumentar patamares de  $0.08^{\circ}\text{C}$  por década, será possível afirmar que eventos climáticos como ondas de calor serão mais sérios no futuro (GALDIES; LAU, 2020).

Neste sentido, ao extrapolar as cidades menos densas e urbanizadas como pode ser visto em Hong Kong, foi possível constatar que há a necessidade da realização de estudos e planejamento integrado do espaço urbano. Tal procedimento é fundamental e imprescindível para a construção sustentável das cidades em climas tropicais.

## 2.5 GRADIENTE DE VELOCIDADE DE VENTO URBANO

Para melhor abranger o comportamento do ar em meio urbano, considerando de forma simplificada sua inerente modificação aerodinâmica, se faz necessário compreender sobre o escoamento de fluidos podendo ser caracterizados como laminar ou turbulento. O dito escoamento laminar, advindo do latim *lāmina*, significa que as linhas de decorrência permanecem paralelas entre si não havendo mistura entre os fluidos (CÓSTOLA, 2006). De forma prática, este tipo de escoamento é observado em fluidos viscosos, geralmente em escoamento de tubos e motores (CÓSTOLA, 2006).

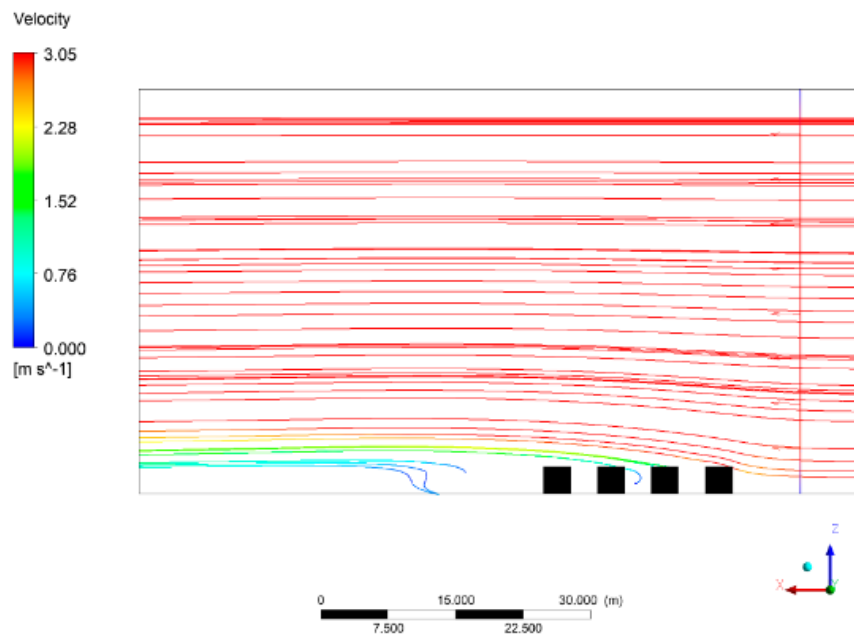
O escoamento turbulento, no entanto, é o oposto do efeito anterior, onde as partículas se movimentam de maneira aleatória e velocidades distintas. Este escoamento turbulento é regido pela inércia, ou seja, como parte constituinte da chamada Camada Limite Atmosférica (CLA), que ocorre em decorrência da interação entre a topografia, obstruções verticais, outros fluidos e trocas convectivas (CÓSTOLA, 2006). Com isso, o conceito de fluxo turbulento pode ser explicado como caótico de natureza aleatória e com variações espaço-temporais na propriedade do fluxo do fluído (PIQUET, 1999).

Assim, ao tratar sobre a altura máxima da camada limite urbana percebe-se que ela varia de acordo com a conformação da cidade, sendo determinada principalmente em função da rugosidade (LOPES, 2003). Com isso, Oke (1987) observa que esta altura é variável a partir da intensidade e direção do movimento das massas de ar. Pois, o vento, como um fluido em contato com um obstáculo, tem seu momento alterado em consequência da fricção produzida por esta interação. Portanto, dependendo das características morfológicas intraurbanas, a intensidade do vento é modificada no eixo vertical produzindo o gradiente de vento urbano (LANDSBERGER,

1981), sendo a camada acima da CLA a região com a capacidade de velocidade máxima desimpedida (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005).

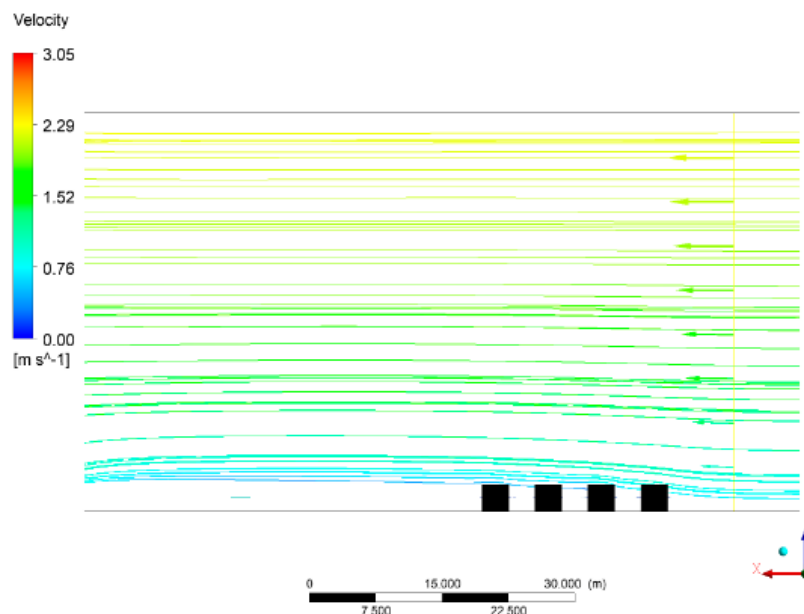
Dentro dessa perspectiva, a figura 3 configura o escoamento laminar em perfil no ambiente urbano e não representando uma interação próxima à realidade, pois promove a mesma velocidade mesmo em diferentes cotas no eixo vertical. Já a figura 4, apresenta o escoamento turbulento, que através de equações de correção é possível descrever uma possível movimentação de ar a partir da rugosidade do espaço analisado.

Figura 3 - Fluxo laminar



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 4 - Fluxo turbulento

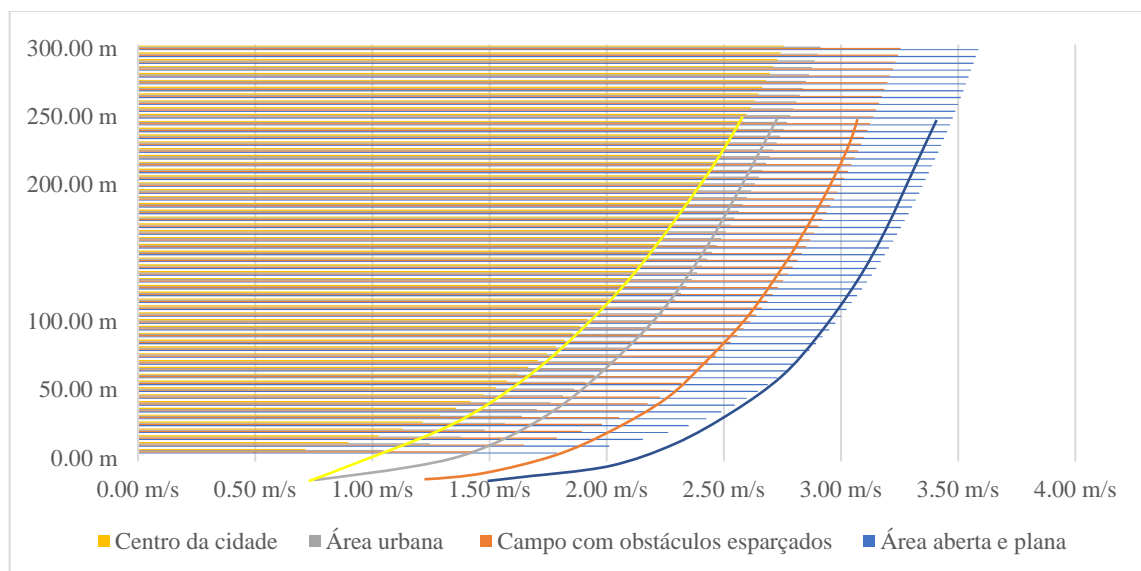


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).



Como manifestação física, o gradiente do vento possui diversas equações que propõem o seu comportamento em diferentes situações de ocupação de superfície. Em um estudo, Leite (2015) comparou as equações análogas da ASHRAE - 2003, The European Union (2005) e do *Building Research Establishment* (BRE) (Edifício de estabelecimento de pesquisa, em livre tradução) em 1978, para determinar suas diferenças em condições semelhantes, considerando velocidade média na estação meteorológica, índices de rugosidade e altura da camada limite. Ainda conforme o autor, a equação do BRE (1978)<sup>1</sup> possui uma modificação mais significativa do perfil do vento face à menor modificação de rugosidade, ou seja, o fator de modificação primário do meio urbano analisado nesta pesquisa. Portanto, entende-se que a equação supracitada é adequada para o uso. Assim, os possíveis perfis a partir de BRE (1978) estão apresentados no gráfico 4:

Gráfico 4 - Gradiente de vento urbano



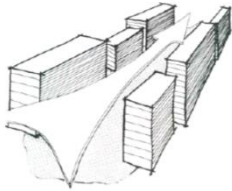
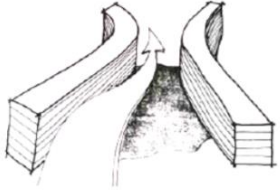
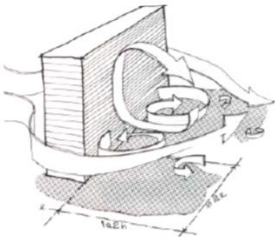
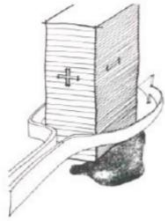
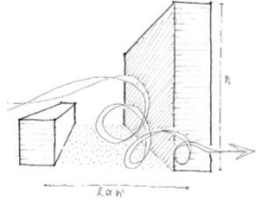
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

## 2.6 EFEITOS AERODINÂMICOS

A interação da ventilação com a malha urbana, para além dos impactos na camada limite, possui efeitos próprios em função da organização do espaço. Entende-se, assim, que todos os efeitos apresentados no quadro 2, desenvolvidos com base no estudo de Mascaró (1985), não ocorrem de maneira individual e exclusiva, mas sim de forma conjunta.

<sup>1</sup> Método de cálculo exemplificado no capítulo de método.

Quadro 2 - Efeitos aerodinâmicos

Efeito	Explicação	Figura
Efeito de canalização	Efeito relacionado ao caminhamento do fluxo de ar em função de obstruções, muitas vezes paralelas ao sentido do vento, concentrando em um cânion urbano.	
Efeito Venturi	Trata-se a diminuição da área de contribuição do fluxo de ar, assim, aumentando a pressão em função da diminuição da área, e por consequência, aumentando sua velocidade no barlavento.	
Efeito de esteira	A criação de redemoinhos no barlavento de uma obstrução. Portanto, criando regiões de baixa pressão e recirculação de ar. O tamanho desta região é proporcional à altura da obstrução.	
Efeito de canto	Os ângulos de uma dada obstrução a ventilação natural criam a diferença de pressão, com isso, a diferença barométrica produz o aumento da velocidade do ar em suas arestas. Sendo a velocidade acrescida proporcional à altura do edifício.	
Efeito de redemoinho	O vento incidente no sotavento promove a criação de regiões turbulentas na base da face incidente, sendo este efeito proporcional à altura da edificação.	

Fonte: Adaptado de Mascaró (1985).

Esses efeitos supracitados são observações físicas relacionadas à interação do ar com o ambiente urbano. O estudo desses efeitos auxiliou nas análises dos resultados das simulações fluidodinâmicas, uma vez que eles podem ser identificados de modo individual ou em conjunto a partir da interação com o meio urbano.

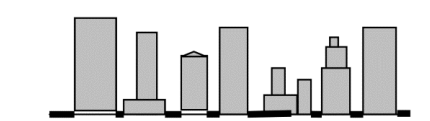

## 2.7 CÂNION URBANO E ZONAS CLIMÁTICAS URBANAS






Uma importante variável para o estudo do microclima urbano é encontrada dentro da CIU, o cânion urbano, considerado como unidade geométrica básica de pequena escala e que auxilia a compreensão do clima urbano (NÚÑEZ; OKE, 1977). A partir desta unidade, é possível analisar fatores como a perda ou ganho de calor nos edifícios, fluxo de ventilação urbana e poluição do ar (OKE, 1988). Com isso, Oke (1988) descreve quatro (4) considerações a respeito de prioridades a serem alcançadas em cidades de alta ou média latitude:

- 1) **Maximizar abrigos:** necessidade de prover proteção e conforto aos pedestres, não os expondo a ventos fortes, chuvas intensas ou neve;
- 2) **Maximizar dispersão de poluentes:** com os automóveis sendo um importante fonte de poluição nos cânions urbanos, deve-se mitigar o impacto destes nos cidadãos e na vegetação;
- 3) **Maximizar o calor urbano:** em clima frio, maximizar o efeito da ilha de calor urbana, assim, mitigando o desconforto por frio do pedestre e diminuindo o gasto com aquecimento nas construções; e
- 4) **Maximizar acesso solar:** fazer o melhor uso da radiação solar, seja de forma passiva ou ativa.

Para melhor organizar os importantes fatores no desenvolvimento urbano, Oke (2006) classifica o espaço urbano em 7 *Urban Climate Zones* (UCZ) (Zonas Climáticas Urbanas). Esta classificação auxilia na descrição da estrutura urbana de forma simplificada, juntamente com fatores como permeabilidade e rugosidade da região. Tal fator é relacionado com, por exemplo: o fluxo de ar, sombreamento solar e ilha de calor. Relaciona-se, assim, que para a classificação se faz necessária o entendimento da rugosidade do local, o cânion urbano e a permeabilidade do solo como relacionado na Tabela 2:

Tabela 2 - Classificação UCZ

Zona Climática urbana (UCZ)	Figura	Rugosidade	Largura via / Altura Edificação (H/W)	Permeabilidade do solo (%)
1. Intenso desenvolvimento urbano		8	> 2	>90
2. Alta densidade urbana com		7	1,0 – 2,5	>85

edificações de 2 - 5 pavimentos com nenhum ou pouco afastamentos entre si				
3. Alta ou média densidade com edificações com pouco afastamento		7	0,5 – 1,5	70 – 85
4. Alta, média ou baixa densidade suburbana com edificações de 1 - 2 pavimentos de edifícios largos		5	0,05 – 0,2	70 – 95
5. Média ou baixo/ desenvolvimento suburbano com edificações de 1 - 2 pavimentos de edifícios largos		6	0,2 – 0,6	35 – 65
6. Misto entre edifícios largos e grandes áreas abertas		5	0,1 – 0,5	<40
7. Desenvolvimento semirrural com edificações dispersas em ambiente natural ou áreas agrícolas		4	>0,05 dependend o da cobertura arbórea	<10

Fonte: Baseada em Oke (2006).

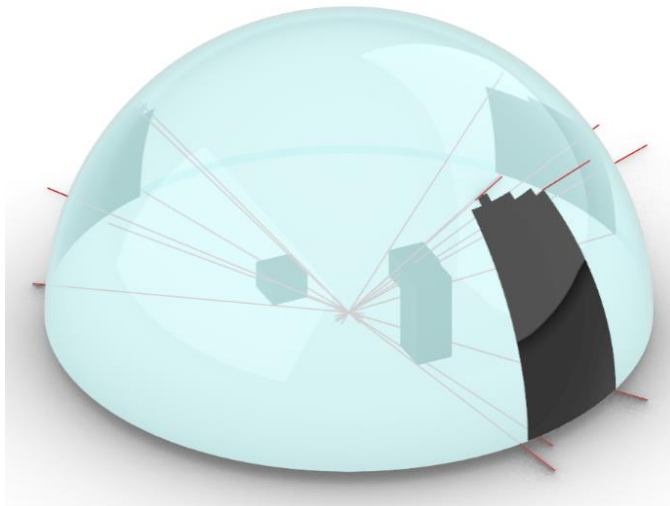
Utilizando o UCZ como uma ferramenta de caracterizar o espaço, Stewart e Oke (2009) acreditam que de forma resumida e confiável é possível normatizar as propriedades da superfície que interferem na camada intraurbana. Desse modo, identificam-se os fenômenos do clima urbano de forma mais clara como, por exemplo, o fenômeno da ilha de calor.

## 2.8 FATOR DE VISÃO DE CÉU

Outro indicador que está diretamente relacionado ao cânion urbano é o Fator de Visão de Céu, oriundo do termo em inglês *Sky View Factor* (SVF). Este índice é importante para o estudo paramétrico da radiação solar incidida em uma superfície e recebida em outra superfície plana a partir do céu, recebida de todo o ambiente radiante de um hemisfério, além do balanço

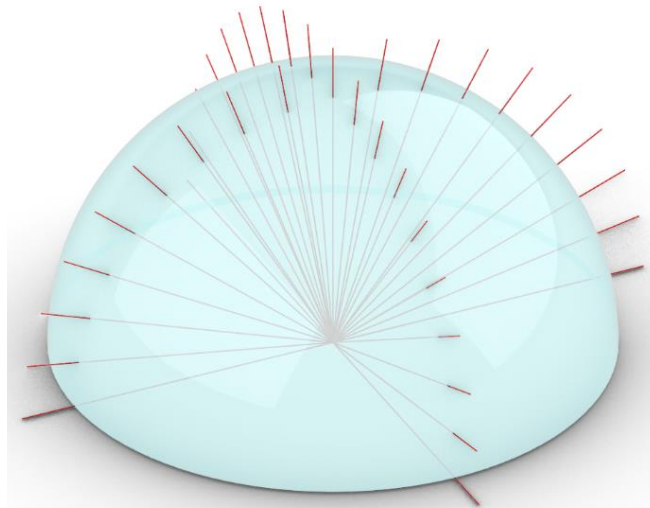
radiativo de uma superfície (OKE, 1981; JOHNSON; WATSON, 1984; ZENG *et al.*, 2018). Ou seja, dessa forma, refere-se ao bloqueio da visão em relação a uma vista hemisférica de 180°, variando entre 0 e 1, sendo  $SVF > 0$  a obstrução parcial do céu em um dado ponto (Figura 5) e  $SVF = 0$  se refere ao vislumbre completo do dado hemisférico hipotético (Figura 6):

Figura 5 -  $SVF > 0$



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 6 -  $SVF = 0$



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

O fator de visão de céu pode ser calculado de diversas formas e as mais comuns são advindas de fotos hemisféricas, onde são utilizadas câmeras *full frame*<sup>2</sup> com lentes do tipo grande angular, as quais possuem um campo de visão igual ou superior a 180°. Posteriormente, a imagem pode ser tratada com o auxílio de softwares específicos ou de modo analógico,

---

<sup>2</sup> Câmeras que possuem um sensor suficientemente grande para não perder parte da imagem capturada pela lente.

Baseado em fórmulas como proposto no método de Steyn (1980), em que se utiliza de gráficos de coordenadas polares sobrepostos a impressões fotográficas.

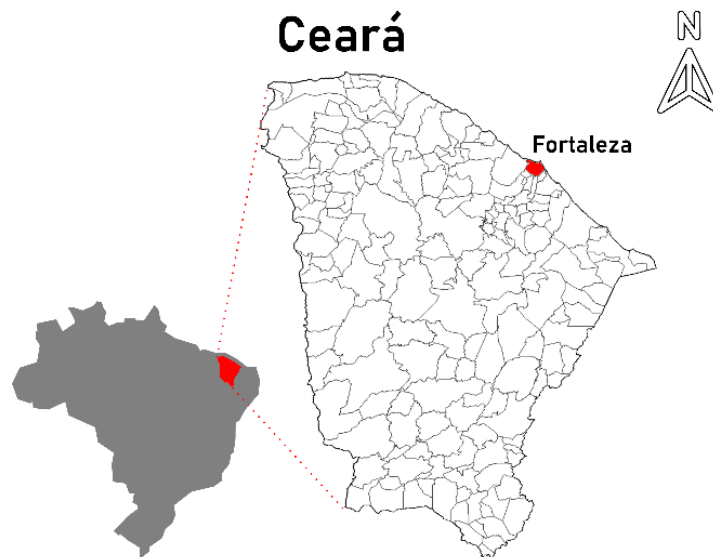
Com o incremento das capacidades de processamento dos computadores, o cálculo derivado de metadados com softwares *Geographic Information System* (GIS) (Sistema de Informação Geográfica) ou de seus derivados foram decisivos para o estudo em larga escala. Svensson (2006) considera a partir de fotos hemisféricas obtidas a partir do *GoogleEarth*, que o SFV possui correlação entre temperatura do ar em dias claros e noites calmas. Já Chen *et al.* (2020), com estudos de software GIS e fotografias hemisféricas, associam morfologias de edifícios e seus impactos na temperatura diurna, além de apontar o SVF como uma importante variável para o planejamento urbano.

Neste sentido, Middel *et al.* (2018), assinalam que o uso do estudo de fatores como SVF se populariza como métrica para parametrizar o estudo da morfologia urbana, como uma importante variável multidimensional a se considerar na modelagem do clima urbano. Por fim, Dirksen *et al.* (2019) afirmam que o fator de visão de céu é importante para a descrição climatológica urbana em escalas de até 100 metros. Dessa forma, os autores demonstram Baseado em cálculos e coleta de dados a importância da calibração dos cálculos de SVF para o estudo da ilha de calor urbana nos Países Baixos.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

Fortaleza possui uma população de 2.669.342 habitantes, e se apresenta como a quinta maior capital do País com 313,8 km<sup>2</sup> (IBGE, 2019). A cidade está situada nas coordenadas 3°43'6" Sul e 38°32'36" Oeste em uma altitude média de 15 metros acima do nível do mar (Figura 7):

Figura 7 - Localização de Fortaleza



Fonte: Adaptada de *GoogleEarth* (2020).

A metrópole está inserida, a partir da classificação climática de Köppen-Geiger (1918), no clima tropical savânico (Aw), onde apresenta o período mais seco no inverno e chuvoso no verão. A cidade também está situada na Zona de Convergência Intertropical, região de encontro dos ventos alísios do nordeste e do sudeste, do hemisfério norte e sul respectivamente, fazendo parte essencial da circulação geral da atmosfera. No Brasil, este fenômeno normalmente promove chuvas volumosas no litoral brasileiro. Porém, durante o *El Niño*, o deslocamento das massas de ar é movido para o hemisfério norte causando seca no suposto período chuvoso.

A partir dos dados coletados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em (2009), entre os anos de 1961-2010 Fortaleza apresentou as maiores temperaturas e velocidades do ar entre os meses de setembro e janeiro. Com ventilação predominantemente leste e sudeste, os meses de agosto, setembro e outubro são os que possuem a maior intensidade de ventos, com médias mensais superiores a 3,7 m/s. A cidade também apresenta uma época chuvosa bem definida entre os meses de fevereiro e maio. Assim, a tabela 3 elucida de forma resumida as normais climatológicas da temperatura, sentido e intensidade do ar, umidade relativa e precipitação acumulada:

Tabela 3 - Normais climatológicas de Fortaleza 1961 - 2010

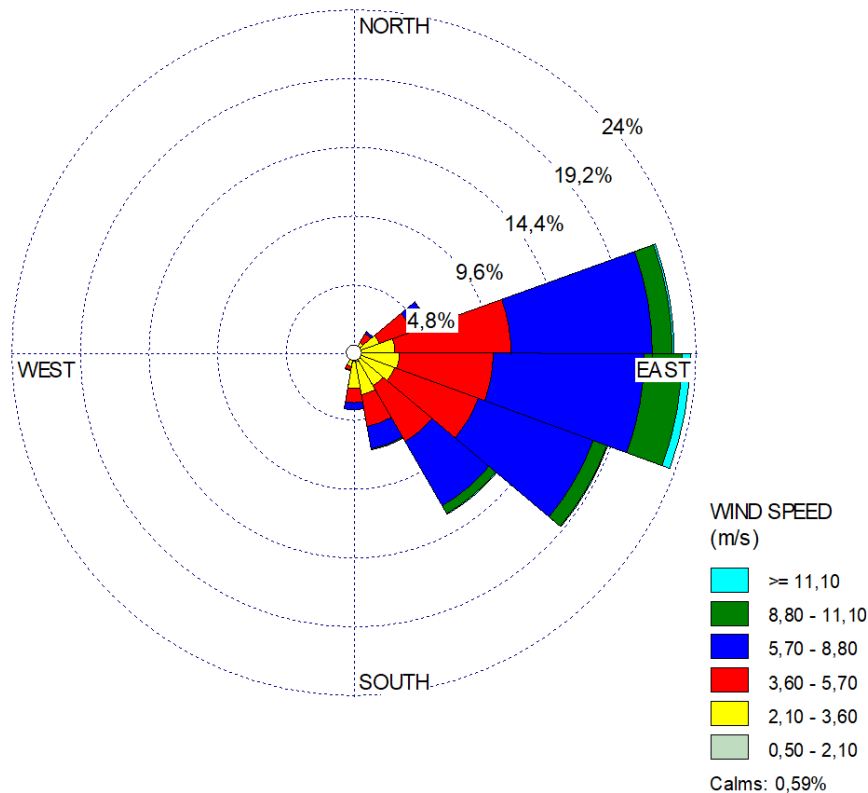
Normais climatológicas 1961-2010												
Variáveis	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
°C máxima	31,00 °C	30,90 °C	30,40 °C	30,30 °C	30,40 °C	30,10 °C	30,30 °C	30,80 °C	31,00 °C	31,20 °C	31,50 °C	31,50 °C
°C normal	27,75 °C	27,60 °C	27,15 °C	27,05 °C	27,05 °C	26,60 °C	26,50 °C	26,85 °C	27,25 °C	27,70 °C	28,10 °C	28,20 °C
°C mínimo	24,50 °C	24,30 °C	23,90 °C	23,80 °C	23,70 °C	23,10 °C	22,70 °C	22,90 °C	23,50 °C	24,20 °C	24,70 °C	24,90 °C
Umidade relativa do ar	78,20 %	79,60%	83,30%	85,10 %	83,00 %	80,60 %	77,30 %	73,40 %	71,10 %	71,50 %	72,50 %	74,20 %
Precipitação acumulada	134,60 mm	186,90 mm	349,40 mm	412,80 mm	255,10 mm	153,70 mm	70,10 mm	24,90 mm	17,80 mm	11,00 mm	9,10 mm	43,50 mm
Velocidade do ar	3,00 m/s	2,80 m/s	2,30 m/s	2,40 m/s	2,50 m/s	2,90 m/s	3,10 m/s	3,70 m/s	4,00 m/s	4,00 m/s	3,90 m/s	3,60 m/s
Sentido do vento	89,00 °	94,00 °	98,00 °	108,00 °	118,00 °	118,00 °	114,00 °	107,00 °	99,00 °	93,00 °	89,00 °	85,00 °

Fonte: Adaptada de INMET (2009).



Desta maneira mais detalhada, utilizou-se dados horários durante um ano modelo montado com os dados entre os anos de 2004 e 2018, que foi disponibilizado por organização acreditada do Departamento de Energia dos Estados Unidos a *Climate.OneBuilding*. O gráfico 5 apresenta a distribuição da intensidade e direção dos ventos em escalas:

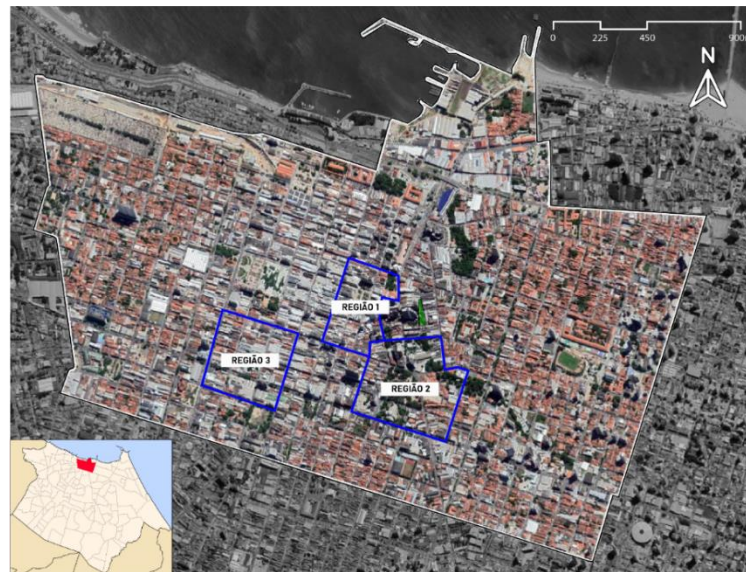
Gráfico 5 - Sentido e direção vento em ano modelo (2018)



Fonte: Adaptado de Climate (2020).

No período completo de análise, aponta-se 5,1 m/s como média de velocidade do ar a 100° (Leste) como sentido. Verifica-se que ela apresenta uma maior frequência de velocidade do ar com 4,1 m/s a 90° (Leste), sendo as maiores velocidades identificadas no período diurno. A área escolhida do centro de Fortaleza (Figura 7) detém 4,88 km<sup>2</sup>, pertencentes a Regional 1 da cidade (Figura 8). Por se tratar de um bairro expressivo (o centro de Fortaleza), selecionou-se locais de estudo que possuem características representativas e os motivos para tal escolha da região ocorre em função do extensivo aumento da capacidade construtiva no local e, da necessidade de poder propor melhorias morfológicas para a região em estudo.

Figura 8 - Localização centro de Fortaleza e áreas de estudo



Fonte: Adaptada de *GoogleEarth* (2020).

Os três locais elencados como significativos para análise do centro de Fortaleza (região 1, 2 e 3) possuem uma área média de 150.000 m<sup>2</sup>, com aproximadamente 9 quadras. Cada área revela uma morfologia diferente do Centro e foram selecionados com objetivo específico de verificar uma variável ambiental sendo elencadas como: livres e verdes, com relevante número de edificações tombadas, com corpos d'água e os que possuem baixa permeabilidade do solo.

A Região 1 (Figura 9), representa um perímetro histórico, possuindo 7 bens protegidos pelas esferas da União, Estado e Município (SECULT, 2013). Esta área é relevante haja vista o intenso comércio e escassas áreas verdes, ainda que se perceba a existência de áreas livres.

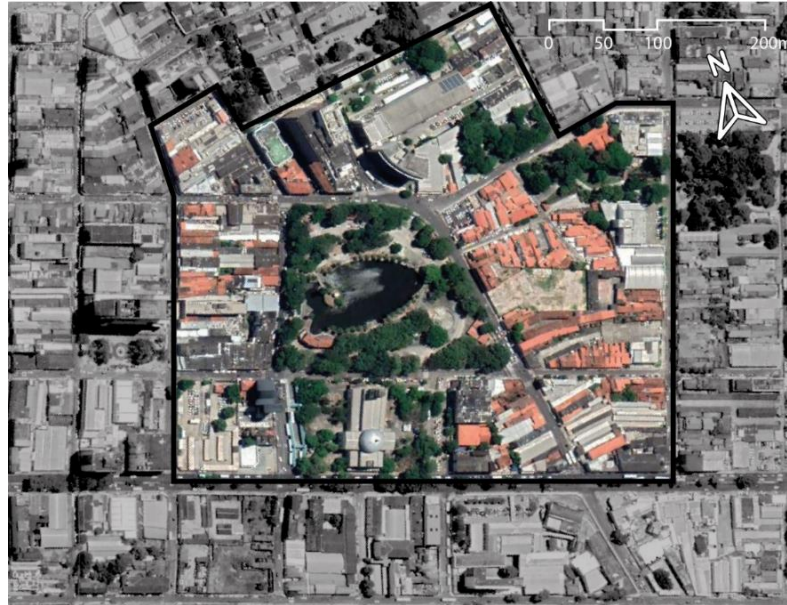
Figura 9 - Região 1 de estudo



Fonte: Adaptada de *GoogleEarth* (2020).

Já a Região 2 (Figura 10) representa um perímetro com grande concentração de áreas verdes e um corpo d'água perene, que juntos equivalem a 22% da área delimitada. Além disso, possui como características tipológicas edifícios religiosos e educacionais.

Figura 10 - Região 2 de estudo



Fonte: Adaptada de *GoogleEarth* (2020).

A figura 11 representa a Região 3, que foi selecionada a fim de ilustrar um fragmento da malha urbana, que atualmente possui um expressivo tráfego de veículos motorizados. Essa região caracteriza-se como representativa também, pela falta permeabilidade, ausência de áreas livres e verdes e estacionamentos abertos.

Figura 11 - Região 3 de estudo



Fonte: Adaptada de *GoogleEarth* (2020).

### 3.1 LEI DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO 2017

A Zona Especial de Desenvolvimento Urbanístico e Social do centro de Fortaleza (ZEDUS), faz parte da macrozona de ocupação prioritária 1 (Figura 12), destacada na lei complementar n° 236 de 11 de agosto de 2017 como: “Porções do território destinadas à implantação e/ou intensificação de atividades sociais e econômicas, com respeito à diversidade local, e visando ao atendimento do princípio da sustentabilidade” (FORTALEZA, 2017, não paginado).

Figura 12 - Zoneamento do bairro Centro, Fortaleza, Ceará e áreas de estudo



Fonte: Adaptada de Fortaleza (2017).

A partir das disposições apresentadas, foi utilizado o uso misto para as possíveis propostas futuras de empreendimentos para esta região corroborando com a ideia do artigo 8° desta mesma lei. Normatizou-se, também, o uso misto a partir da união dos subgrupos de Comércio e Serviços Múltiplos (CSM) e residencial (R). Todavia, utilizou-se os padrões urbanísticos direcionados à atividade de maior impacto ambiental, neste caso o CSM, como preconizado no artigo 73°.

No anexo 3, tabela 5.5 da Lei de Uso e Ocupação do Solo de 2017 (FOTALEZA, 2017), encontra-se um Relatório de Impacto Sobre o Sistema de Tráfego (RIST), para o cálculo da quantidade de vaga de veículos para qualquer Polo Gerador de Viagens (PGV) do subgrupo CSM acima de 2.500 m<sup>2</sup>. Enquanto residências multifamiliares, a partir da tabela 5.1 do mesmo anexo, solicita-se 1 (uma) vaga de garagem por unidade habitacional (Tabela 4). Configura-se, também, maiores afastamentos para o subgrupo comércio e serviços múltiplos do que para o residencial. Como ilustrado nas tabelas 4, 5 e 6, recortou-se somente os parâmetros para vias comerciais, pois não foi encontrada via de outra tipologia dentro dos perímetros de estudo, demonstrando, portanto, o maior impacto do subgrupo de comércio e serviços múltiplos em comparação ao residencial.

Tabela 4 - Número mínimo de vagas

<b>Código</b>	<b>Atividade</b>	<b>Classe</b>	<b>Porte</b>	<b>Nº mínimo de vagas de estacionamento de veículos</b>
00.00.10	Residência Multifamiliar (Prédio de apartamentos)	2	> 01 Unidade residencial	1 vaga / unidade
70.40.83	Centro Empresarial e de Serviços (prédio de salas)	PGV 1 PGV 2 PGV 3-EIV	2501 a 5000 m <sup>2</sup> 5001 a 10000 m <sup>2</sup> Acima de 10000 m <sup>2</sup>	Será definido pelo RIST

Fonte: Adaptada de Fortaleza (2017).

Tabela 5 - Recuos Residenciais

<b>Classe</b>	<b>Uso</b>	<b>Recuos (m)</b>		
		<b>Frontal</b>	<b>Lateral</b>	<b>Fundos</b>
1	A	4	2	3
2	A	5	3	3
3	A	4	2	3
PE	A	4	2	3
5	A	5	3	3
6PE	A	5	3	3
7	A	3	2	3
8PE	A	3	2	3
9	A	5	3	3
10PE	A	5	3	3

Fonte: Adaptada de Fortaleza (2017).

Tabela 6 - Recuos Comerciais e Serviços Múltiplos

<b>Classe</b>	<b>Uso</b>	<b>Recuos (m)</b>		
		<b>Frontal</b>	<b>Lateral</b>	<b>Fundos</b>
1	A	7	3	3
2	A	7	3	3
PGV1	A	10	5	5
PGV2	A	10	5	5
PGV3	A	10	5	5

Fonte: Adaptada de Fortaleza (2017).

O artigo 91, § 3º infere na necessidade de um acréscimo de 0,25 centímetros de afastamento a partir do quinto pavimento, obedecendo a seguinte equação<sup>3</sup>:

$$Rr = Re + (Tp - 3) * 0,25 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

- a) Rr = Recuo resultante;
- b) Tp = Total de pavimentos;
- c) Re = Recuo estabelecido mínimo.

Neste trecho de estudo, especificamente, de acordo com o artigo 156 da mesma lei, fica isento de afastamentos os três primeiros pavimentos até no máximo 12 metros de cota a partir do nível da calçada.

Por ser uma região central e com poucas modificações significantes em suas calçadas ao longo dos anos, elas possuem dimensionamentos inadequados para a atual movimentação de pedestres e possivelmente o futuro fluxo. Portanto, as próximas edificações construídas nesta região, com base no artigo 155, deverão construir calçadas de tamanho mínimo de 4 metros recuados até o pavimento térreo nos sentidos Norte-Sul e 3 metros no sentido Leste-Oeste. Assim, as áreas deduzidas em cumprimento a este disposto passam a integrar faixas de domínio público, assim mostrado no artigo 151 §1º.

Os índices urbanísticos para esta ZEDUS Centro estão elucidados na tabela 7:

Tabela 7 - Índices urbanísticos ZEDUS Centro

Zona de Ocupação		Centro
		1 e 2
Taxa de Permeabilidade (%)		30
Taxa de Ocupação (%)	Solo	60
	Subsolo	60
Índice de Aproveitamento	Básico	(1)
	Mínimo	0,20
	Máximo	4,00
Altura Máxima da Edificação (m)		95
Dimensões mínimas de lote	Testadas (m)	5
	Profundidade (m)	25
	Área (m <sup>2</sup> )	125
Fração de Lote		-

Fonte: Adaptada de Fortaleza (2017).

As áreas 2 e 4 apresentam duas zonas menores: a Zona de Preservação Ambiental 1 (ZPA 1) e a Zona de Preservação do Patrimônio Paisagístico, Histórico, Cultural e

<sup>3</sup> Equação produzida pelo autor com base do artigo 91, § 3º da lei complementar nº 236 de 11 de agosto de 2017.

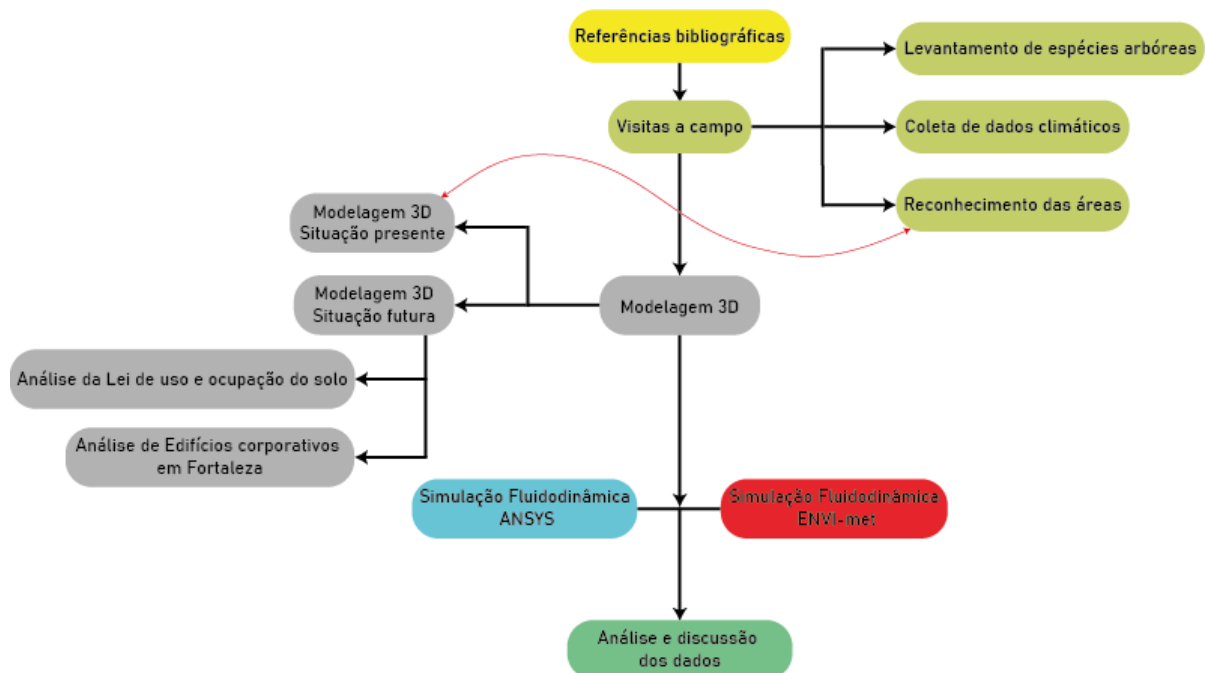
Arquitetônico (ZEPH). A ZPA 1 é delimitada nesta parte do centro para a preservação permanente dos recursos hídricos do riacho Pajeú, não permitindo, portanto, a construção de edificações nestas áreas. Já o Artigo 106 permite os seguintes usos e atividades nestas áreas: atividades de pesca e agricultura; silvicultura, plantio, replantio e manutenção de matas; floricultura; cultura de sementes e mudas; horticultura, cultura de condimentos aromáticos medicinais; fruticultura; apicultura; camping; parque urbano; horto florestal e aquário.

A ZEPH, segundo o artigo 165, proíbe a demolição até a definição dos parâmetros urbanos do solo para cada ZEPH. Para esta área também se prevê que os novos empreendimentos e/ou reformas deverão ser submetidos à Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente (SEUMA), devendo ser ouvida também pela Secretaria da Cultura de Fortaleza (SECULTFOR).

## 4 MÉTODO

Este trabalho foi produzido a partir de etapas sequenciais, desde a procura por referências bibliográficas, expedições a campo com medições dos dados microclimáticos, modelagem tridimensional das áreas estudadas, simulações fluidodinâmicas, tratamentos estatísticos e discussões dos dados. Na figura 13, apresenta-se um fluxograma das etapas da pesquisa:

Figura 13 - Fluxograma do método



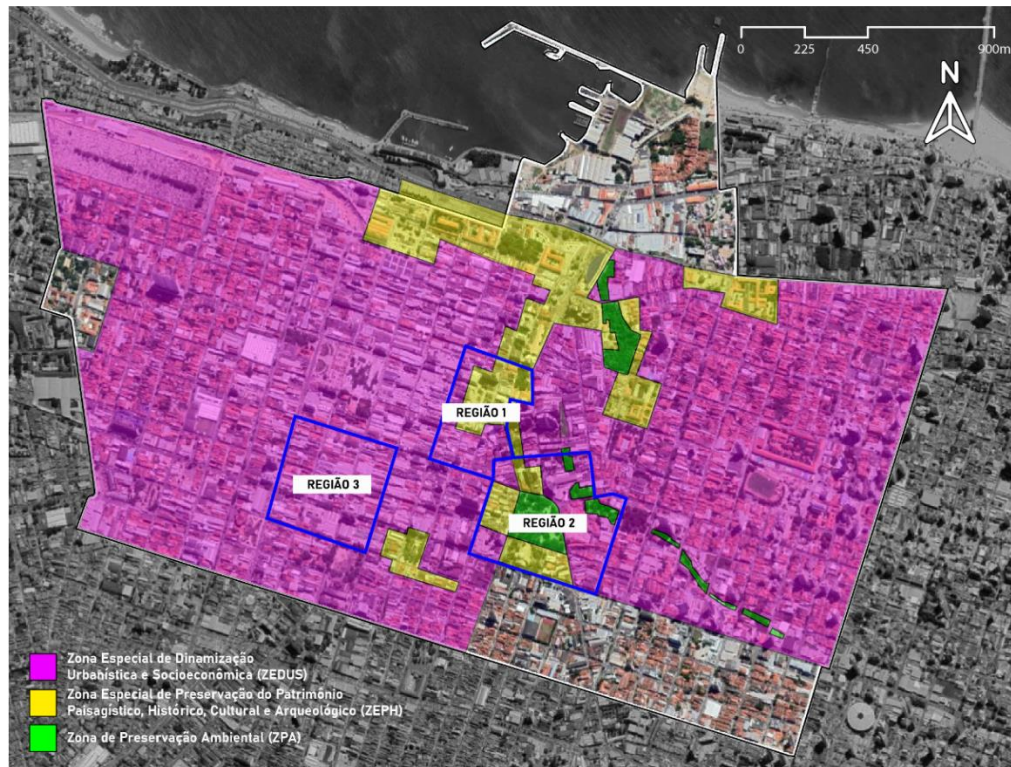
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

### 4.1 VISITAS A CAMPO

No primeiro semestre de 2019 foi realizada uma expedição a campo para analisar as características construtivas, materiais de revestimentos e alturas das edificações das 3 áreas distintas de estudo no bairro Centro, em Fortaleza, Ceará (Figura 14):



Figura 14 - Localização das áreas de análise

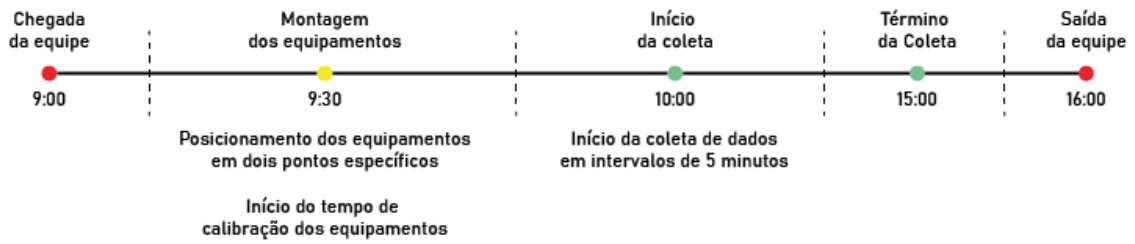


Fonte: Adaptada de *GoogleEarth* (2020).

Cada região de análise possui especificidades que foram decisivas para as escolhas de cada cenário. A região 1 foi escolhida por possuir uma parte inserida na ZEPH, a qual infere-se a identificar seu possível impacto no microclima, além de ser um ponto turístico icônico de Fortaleza, a praça do Ferreira. A região 2 foi selecionada em função de possuir uma expressiva densidade arbórea, a qual está inserida na ZPA 1, assim como o corpo d'água da praça da Liberdade. Além disso, parte da região também está enquadrada dentro de ZEPH. Com isso, a região 3 foi definida por possuir uma característica recorrente na área central da cidade, a falta de cobertura arbórea expressiva, alta recorrência de revestimento asfáltico e um considerável movimento de transeuntes.

Posteriormente, 6 expedições foram realizadas para a coleta de dados climáticos, posterior calibração e comparação com as simulações computacionais. Todavia, dois dias ficaram inutilizados em decorrência de precipitações pluviométricas. Portanto, as coletas foram realizadas nos dias: 16/01/2020 (Área 1); 20/12/2019 (Área 2); 20/01/2020 (Área 3). A realização da coleta obedeceu ao plano piloto (Figura 15). Com a chegada da equipe de coleta às 9h, houve a preparação e a montagem dos equipamentos até aproximadamente 9h30. Posteriormente, os dados começam a serem coletados das 10h às 15h. Deste modo, a saída da equipe ocorreu após a desmontagem dos maquinários por volta das 16h.

Figura 15 - Projeto Piloto



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Todas as coletas aconteceram entre os meses de dezembro de 2019 e janeiro de 2020, por se tratar de um dos períodos com maiores temperaturas médias mensais, ilustrado na tabela 10 (INMET, 2019). Essa tabela apresenta os equipamentos utilizados na coleta de campo, que foram montados em um estante plástica (Figura 16) para a utilização dos mesmos:

Tabela 8 - Normais da temperatura do ar entre 1961 - 2010

Temperatura do ar 1961 – 2010			
Mês	Máxima	Média	Mínima
Janeiro	30,75 °C	27,60 °C	24,45 °C
Fevereiro	30,50 °C	27,33 °C	24,15 °C
Março	30,05 °C	26,90 °C	23,75 °C
Abril	30,00 °C	26,80 °C	23,60 °C
Maió	30,15 °C	26,83 °C	23,50 °C
Junho	29,85 °C	26,40 °C	22,95 °C
Julho	29,90 °C	26,23 °C	22,55 °C
Agosto	30,35 °C	26,58 °C	22,80 °C
Setembro	30,60 °C	27,03 °C	23,45 °C
Outubro	30,85 °C	27,50 °C	24,15 °C
Novembro	31,10 °C	27,83 °C	24,55 °C
Dezembro	31,10 °C	27,93 °C	24,75 °C







Fonte: Adaptada de INMET (2019).

Figura 16 - Esquema estação de coleta



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Tabela 9 - Equipamentos utilizados no levantamento de dados

Item	Equipamento		Quantidade	Monitoramento	Precisão	Limites de coleta
1		Solar Radiation Shield	4 unidades	Utilizado para a proteção de sensores expostos a radiação direta ou indireta	-	-
		HOBO MX2301	4 unidades	Temperatura do ar (°C) Umidade relativa (%)	±0,2 °C ±2,5%	0 a 70 °C 10% a 90%
-		Testo 415 hot wire anemometer	2 unidades	Velocidade do Ar (m/s)	±0,05 m/s	0 a 10 m/s
				Temperatura do ar (°C)	±0,05 °C	0 a 50 °C
2		Protemp 4 Medidor de stress térmico	1 unidades	Temperatura do ar (°C)	±0,5 °C	-20 a 150 °C
				Temperatura de Globo (°C)	±0,5 °C	
				Umidade relativa (%)	±2,5%	0 a 85 %
3		Protemp 2 Medidor de stress térmico	3 unidades	Temperatura do ar (°C)	±0,5 °C	-20 a 100 °C
				Temperatura de Globo (°C)	±0,5 °C	
				Umidade relativa (%)	±2,5%	0 a 85 %
4		Model 804 - Handheld Particle Counter	1 unidades	Partículas sólidas em suspensão (μ)	-	0,3, a 10 μ

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Os equipamentos foram previamente calibrados de acordo com os critérios exigidos pela norma ISO 7726 (1988). O equipamento 1 é composto por um escudo de proteção solar que detém um HOBO em seu centro, a uma altura de 1,20 m do solo. O anemômetro, o qual não foi apontado na figura 16, foi utilizado a cada 4 minutos, estando ligado por 1 minuto para estabilização do sensor e coletando os dados manualmente a cada 5 minutos, com o sensor distante do corpo, em local sombreado e a uma altura de aproximadamente 1,2 metros.

Os equipamentos 2 e 3 foram instalados a 1,20 e 1,50 metros aproximadamente, respectivamente, em regime de coleta automática a cada 5 minutos. O item 4, contador de partículas sólidas, foi instalado a 1,10 m de altura do solo com coletas automáticas a cada 1 minuto. A estação foi protegida por um guarda-sol, haja vista a necessidade da não incidência de radiação solar direta nos sensores de temperatura do ar dos itens 2 e 3, por risco de coleta de dados adulterados em função da carga solar (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Por fim, durante 3 dias foi realizado o levantamento e geolocalização das árvores de médio e grande porte nas 3 áreas de estudo, a partir da utilização do GPS eTrex da empresa Garmin. Com ele, foi possível armazenar as coordenadas de cada árvores individualmente, com um erro aproximado de 3 metros de distância ao ponto real. Ao final do levantamento, os dados foram carregados no software *GoogleEarth* onde através de imagens de satélite os pontos coletados foram ajustados à localização próxima das árvores.

Para a produção dos modelos digitais, utilizou-se o software *Rhinoceros 3D* versão 6 SR23. Trata-se de um programa produzido pela Roberts McNeel & Associados, que utiliza tecnologia de *Non Uniform Rational Basis Spline* (NURBS) para o desenho e modelagem em ambiente digital (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2019).

A partir dos dados coletados foram desenvolvidos 2 cenários para simulação de cada área. O primeiro é a situação atual, considerando cobertura arbórea em ambiente público, edificações, forrações, revestimentos de calçadas e pavimentos asfálticos. No segundo cenário, tem-se as forrações, cobertura arbórea em ambiente público e revestimentos das calçadas, porém, as edificações foram modeladas a partir das capacidades máximas construtivas nas áreas, com base em observações realizadas das edificações corporativas construídas no últimos anos em Fortaleza.

Tabela 10 - Cenários de estudo

Região 1	Cenário 1	Cenário 1.1
Região 2	Cenário 2	Cenário 2.1
Região 3	Cenário 3	Cenário 3.1

Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Toda simulação computacional representa uma simplificação da complexidade da realidade (MARTINS *et al.*, 2009). Por causa das limitações computacionais, foi necessário a sintetização das geometrias reais da cidade, além da diminuição das áreas analisadas, com a finalidade de utilizar um padrão de quadras circunscritas. Assim, almejando um menor tempo de processamento de simulação para a modelagem desta etapa no software *Rhinoceros 3D* desconsiderou-se: árvores, coberturas para carros, muros divisórios, topografia e vãos menores que 5 metros. Todavia, preservou-se ao máximo as características dos trechos urbanos como fachadas curvas e chanfradas de pequena dimensão (PRATA, 2005; LEITE, 2015; COSTA FILHO, 2017; PRATA *et al.*, 2019; NAZARETH *et al.*, 2019).

## 4.2 CENÁRIO VERTICALIZADO

O cenário verticalizado foi construído a partir de observações dos novos lançamentos empresariais na cidade de Fortaleza, análise das máximas capacidades construtivas a partir da lei complementar n° 236 de 11 de agosto de 2017 (LUOS) e parâmetros construtivos de cidades que possuem uma verticalização consolidada em edifícios corporativos de alto padrão.

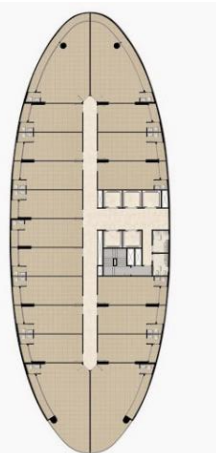
### 4.2.1 Edificações corporativas em Fortaleza

Para a modelagem do cenário hipotético, utilizou-se também o estudo e redesenho digital de plantas dos empreendimentos selecionados, a partir de 2013, na cidade de Fortaleza. Foi analisado o material de revestimento, implantação, área de laje e altura de piso a piso. Os dados aqui apresentados são derivados de informações disponibilizadas nos websites das construtoras e/ou do redesenho digital, onde escalonou-se as plantas técnicas disponíveis em folders digitais das construtoras no software *Rhinceros* para extração dos dados, bem como visitas *in-loco*.

#### 4.2.1.1 Washington Soares Trading Center

É um empreendimento lançado em 2018 pela construtora Dias de Sousa, na zona sul de Fortaleza, projetado pelos arquitetos Daniel Arruda e Luiz Deusdará. O empreendimento possui 21 pavimentos em 2 edifícios iguais, no qual: 12 pavimentos tipo (Figuras 17 e 18), com 3,3 metros de altura entre laje; 2 pavimentos corporativo; 3 sobressolo; 1 pavimento térreo comercial. Cada volume conta com 1 core de circulação vertical lateral.

Figura 17 - Pavimento tipo WSTC



Fonte: Adaptada de Dias de Sousa Construções ([20--]).

Figura 18 - Implantação WSTC



Fonte: Adaptada de *GoogleEarth* (2020).

A partir de redesenho produzidos pelo o autor, aproxima-se a área de laje em 750 m<sup>2</sup> e com uma altura total de aproximadamente 72 m. A implantação em lâmina desta edificação se caracteriza pelas maiores fachadas viradas ao sentido norte e sul e as menores leste e oeste, ver figura 20. Este edifício é caracterizado também por grandes fachadas envidraçadas, *Aluminium Composite Material* (ACM), de cor clara em um primeiro plano nas fachadas e cores mais escuras em um segundo plano de fachada (Figura 19) e ausência de arborizações com significativa copa arbórea para a projeção de sombras ao pedestre.

Figura 19 - Washington Soares Trade Center



Fonte: Adaptada de Dias de Sousa Construções ([20--]).

#### 4.2.1.2 BS Design

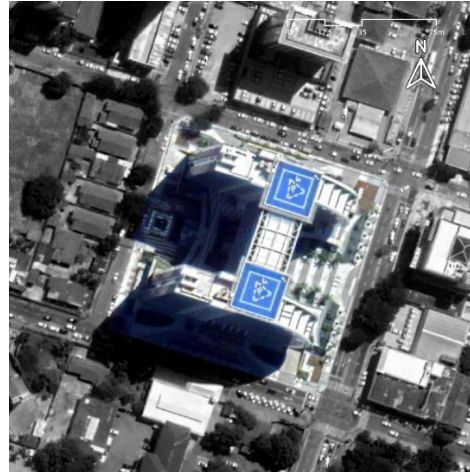
As torres empresariais BS Design foram lançadas em 2019 e estão situadas também no bairro Aldeota, em Fortaleza. Este empreendimento conta com lajes escalonáveis a partir do 7º pavimento, possuindo 10 mil m<sup>2</sup> de área construída que estão distribuídas em duas torres (Figura 20) com aproximadamente 65 metros de altura com 21 pavimentos cada, onde 2 pavimentos de embasamento são comuns as duas torres e com duas circulações verticais distintas. A partir do 8º pavimento, as duas torres se conectam a partir de lajes corporativas. Por serem torres com pavimentos escalonados, neste empreendimento as maiores lajes chegam a até 1.100 m<sup>2</sup> (Figura 21), lajes menores de aproximadamente 930 m<sup>2</sup> e lajes corporativas 350 m<sup>2</sup>, com aproximadamente 3,3 metros de altura entre pisos.

Figura 20 - Pavimento tipo maior



Fonte: Adaptada de BSPAR Incorporações ([2020]).

Figura 21 - Implantação BS design



Fonte: Adaptada de GoogleEarth (2020).

Com as maiores porções das fachadas viradas ao sentido norte sul e as menores ao sentido leste oeste, este empreendimento se caracteriza pelo volume espelhado destacado nas lajes empresárias no centro das torres, guarda-corpos em vidro e sua implantação em lâmina (Figura 22). Nota-se o uso de ACM de cor clara em um primeiro plano, e cores escuras no segundo plano das fachadas.

Figura 22 - BS Design

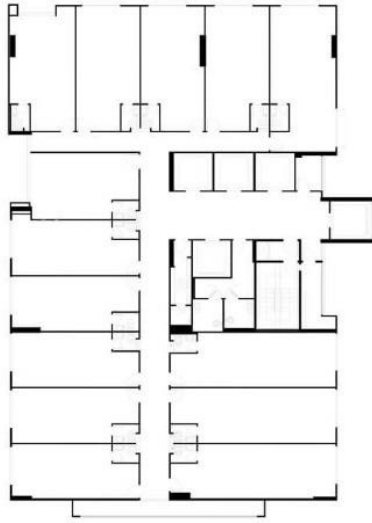


Fonte: Adaptada de BSPAR ([2020]).

#### 4.2.1.3 Centurion Business Center

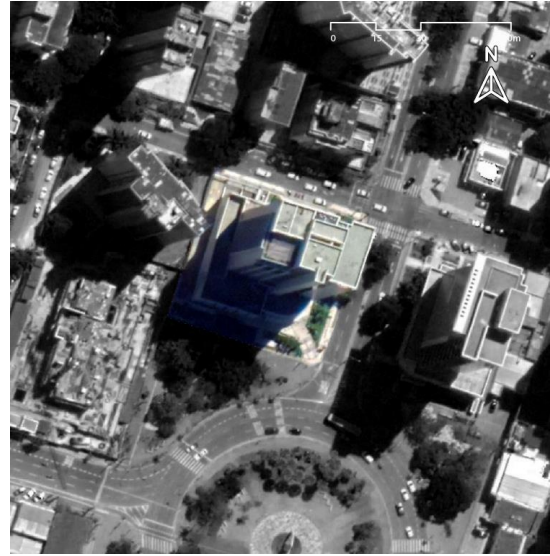
Este empreendimento foi inaugurado em 2013 e está inserido no bairro Aldeota, na cidade de Fortaleza. Ele possui aproximadamente 70 metros de altura, contendo 18 pavimentos tipo de aproximadamente 400m<sup>2</sup> de laje, 4 pavimentos de embasamento e circulação vertical lateral (Figuras 23 e 24):

Figura 23 - Pavimento tipo Centuion  
Business Center



Fonte: Galeria da arquitetura ([2016]).

Figura 24 - Implantação Centurion Business Center



Fonte: Adaptada de *GoogleEarth* (2020).

A torre única está inserida em forma de bloco no centro do terreno, com as maiores fachadas viradas ao sentido norte-sul e as menores fachadas no sentido leste-oeste. Os materiais de revestimento das fachadas são caracterizadas por porcelanatos brancos e vidros laminados verde (Figura 25):

Figura 25 - Centurion Business Center



Fonte: Porto ([2016]).



#### 4.2.1.4 Humberto Santana Business

Este projeto foi entregue em 2015 e possui 4 sobressolos, sendo o primeiro pavimento de lojas e recepção (Figura 26), 3 pavimentos de garagens e a laje do último pavimento um jardim habitável (Figura 27):

Figura 26 - Pavimento tipo Humberto Santana Business



Fonte: Adaptada de Construtora Colmeia (2015).

Figura 27 - Implantação Humberto Santana Business



Fonte: Adaptada de *GoogleEarth* (2020).

O edifício possui 21 pavimentos com 700m<sup>2</sup> de área e altura entre lajes de aproximadamente 3.3 m de altura. Ele possui revestimento cerâmico e ACM de cores claras, detém na torre detalhes verticais e o embasamento revestido principalmente em vidro (Figura 28). O Humberto Santana Business está inserido no bairro Aldeota em um lote poligonal. Todavia, sua implantação se faz em forma de lâmina, no centro do terreno, com as maiores fachadas no sentido norte-sul e as menores fachadas leste-oeste.

Figura 28 - Humberto Santana Business Center



Fonte: Construtora Colmeia (2015).

### 4.3 PARÂMETROS DE MODELAGEM

A partir das legislações edilícias e urbanísticas estudadas e as observações dos edifícios supracitados, convencionou-se a modelagem de edifícios em lâmina e bloco com um embasamento de 12 metros de altura e a implantação da torre no centro do terreno respeitando os afastamentos solicitados. A partir dos parâmetros das ZEDUS, convencionou-se os cálculos<sup>4</sup> a seguir para garantir a máxima capacidade construtiva para cada lote.

Cálculo para a área construtiva máxima:

$$Acm = At * IA \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

- a)  $Acm$  = Área construtiva máxima;
- b)  $At$  = Área total do terreno;
- c)  $IA$  = Índice de aproveitamento.

Cálculo para Área de Ocupação:

$$Ao = At * To \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

- a)  $Ao$  = Área de Ocupação;
- b)  $At$  = Área total do terreno;
- c)  $To$  = Taxa de ocupação.

Cálculo da área construtiva do embasamento:

$$Ace = Ao * Npe \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

- a)  $Ace$  = Área construtiva do embasamento;
- b)  $Ao$  = Área de Ocupação;
- c)  $Npe$  = Número de pavimento do embasamento.

Cálculo para área construtiva total da torre:

$$At = Acm - Ace \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

- a)  $At$  = Área construtiva total da torre;

---

<sup>4</sup> Equação produzida pelo autor com base a lei complementar n° 236 de 11 de agosto de 2017.

- b)  $A_{cm}$  = Área construtiva máxima;  
 c)  $A_{ce}$  = Área de construtiva do embasamento.

A partir dos levantamentos realizados, observou-se que a altura de piso a piso nos edifícios corporativos em Fortaleza está em torno de 3,3 metros de altura entre lajes. Contudo, Liu (2010) demonstra diretrizes de projetos a edifícios de escritórios de alto padrão com altura entre lajes entre 3,84 e 4,10 metros, haja visto o uso de piso elevado no andar para instalação elétrica e forros com a passagem de cabeamento elétrico, telefônico e lógico bem como instalação de centrais de refrigeração.

No presente estudo, o fator altura total dos edifícios é utilizado para compreender os seus impactos em uma possível verticalização do centro da cidade, induzindo, portanto, as construções a terem até 95 metros de altura total. Convencionou-se, assim, a altura de 4 metros de piso a piso para todas as modelagens de cenários hipotéticos com a quantidade de 24 pavimentos por edificação, sendo 3 de embasamento, adotando-se a equação 6 para o cálculo de área de laje por andar:

$$Al = \frac{At}{20} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

- a)  $A_t$  = Área construtiva total da torre;  
 b)  $A_l$  = Área total da laje;  
 c)  $A_t$  = Área da torre.

Sendo assim, em um terreno retangular hipotético de 5.000 m<sup>2</sup> temos a seguinte capacidade construtiva (Tabela 11):

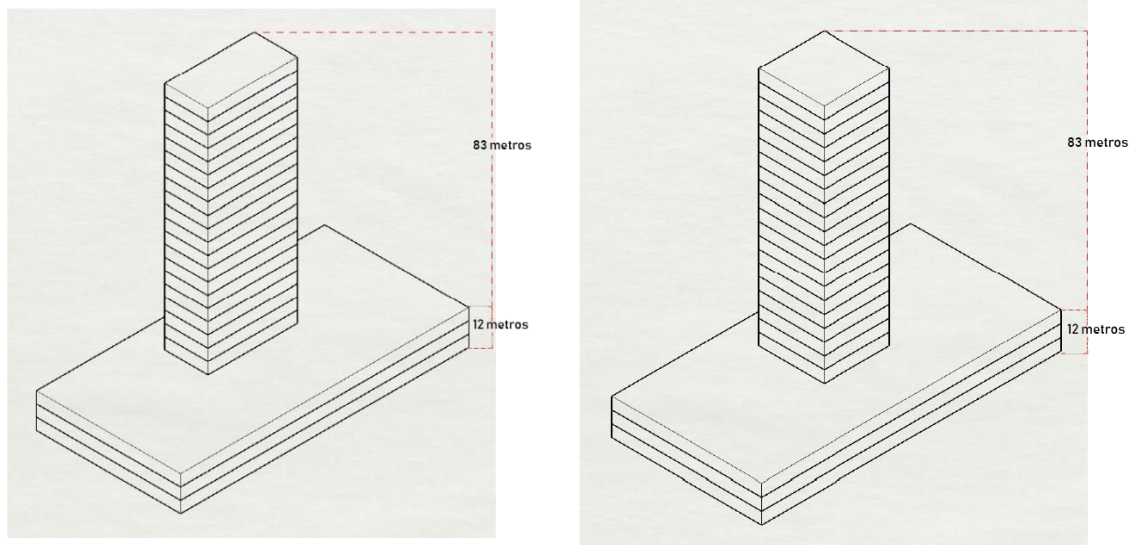
Tabela 11 - Capacidade construtiva máxima

Área construtiva máxima	20.000 m <sup>2</sup>
Área construtiva do Embasamento	9.000 m <sup>2</sup>
Área construtiva total da torre	11.000 m <sup>2</sup>
Área de laje por andar	478.26 m <sup>2</sup>

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A partir das observações das torres corporativas em Fortaleza, encontrou-se edificações implantadas em forma de lâmina e blocos com embasamentos de até 12 metros aproveitando o índice de ocupação. Portanto, as duas tipologias da figura 29 foram inseridas, de maneira aleatória, nos cenários hipotéticos como forma de dinamizar as formas construtivas que poderão vir a ser construídas no centro da cidade de Fortaleza.

Figura 29 - Modelos normalizados para simulação



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

#### 4.3.1 Simulação da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

O entendimento da dinâmica dos fluxos de ar, de maneira geral, é importante para a área da construção civil (PRATA, 2005). Com o avanço da tecnologia, hoje, é possível produzir simulações fluidodinâmicas em ambiente digital, de maneira relativamente rápida e prática. E, ainda, reproduzir um maior número de experimentos em comparação a forma prática em laboratório.

Em relação ao uso específico deste método de cálculo, Cóstola e Alucci (2009) demonstram que quando utilizado de maneira adequada, as simulações CFD possuem a capacidade de emular a realidade produzindo resultados plausíveis. Prata-Shimomura (2010), a partir de ensaios físicos comparativos entre simulações digitais, medições *in loco* e ensaios em túnel de vento, indica uma correspondência entre a velocidade do ar em uma dada altura e a velocidade máxima em um ponto. Já Leite (2015), a partir de simulações CFD e cálculos do desempenho térmico, demonstra o impacto das renovações de ar em ambiente residencial, face à verticalização da cidade em clima quente e úmido. Costa Filho (2017) elucida o método unindo a experiência empírica com a simulação da dinâmica dos ventos computacional, de diagnóstico urbano. E, Nazareth *et al.* (2019) demonstram a partir de simulações CFD, o impacto de um obstáculo na ventilação urbana no interior de unidades habitacionais.

Neste trabalho, utilizou-se dois programas de simulação de fluídos computacional diferentes, o ANSYS CFX e o ENVI-Met 4.4.4. O primeiro, trata de um pacote de simulação que a partir das equações fundamentais de conservação de massa, momento, energia, permite

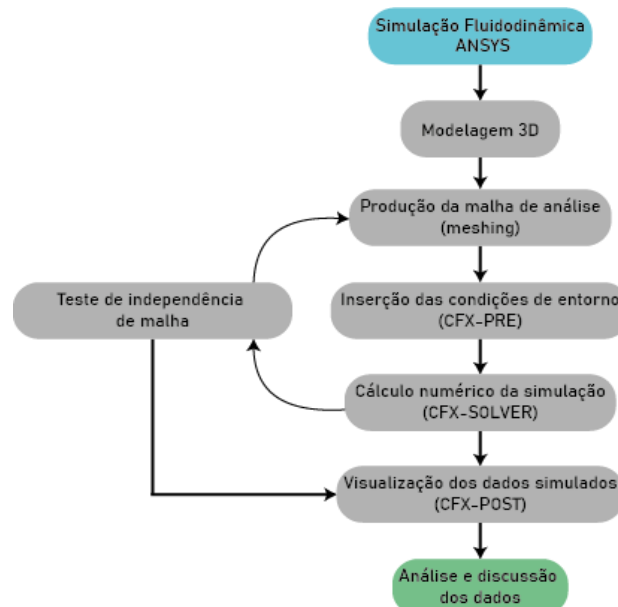
analisar quaisquer situações envolvendo a dinâmica dos fluídos. Todavia, por se tratar de um *software* comumente utilizado nas engenharias, o uso dele não é otimizado para as áreas de arquitetura ou urbanismo. Com ele é possível simular com o controle de dados de entrada único como: gradiente do vento urbano, intensidade e sentido do vento.

Com isso, o ENVI-Met, desenvolvido pelo professor Michael Bruse da Universidade de Brochum, Alemanha, considera variáveis como: radiação, reflexão, vegetação, materiais de revestimento, trocas de água e calor, temperatura e umidade (BRUSE, 2008). A partir dessas variáveis, entende-se que é possível a realização da simulação durante vários dias, considerando arquivos climáticos com variados dados climáticos espaçados por 30 minutos.

#### 4.3.2 ANSYS CFD

O uso deste *software* se justifica por sua acurácia em simulações gerais, sendo realizadas simulações em regime estacionário, isotérmico, incompressível, turbulento que são produzidas a partir de malha desestruturada com base no método de cálculo não-linear. Foram utilizados como dados de entrada, as médias de velocidade e sentido do ar entre os anos de 1961 e 2010 (INMET, 2019). A simulação neste *software* segue cinco passos sequenciais: modelagem, *meshing*, CFX-PRE, CFX-SOLVER e CFX-POST (Figura 30):

Figura 30 - Metodologia simulação ANSYS CFX



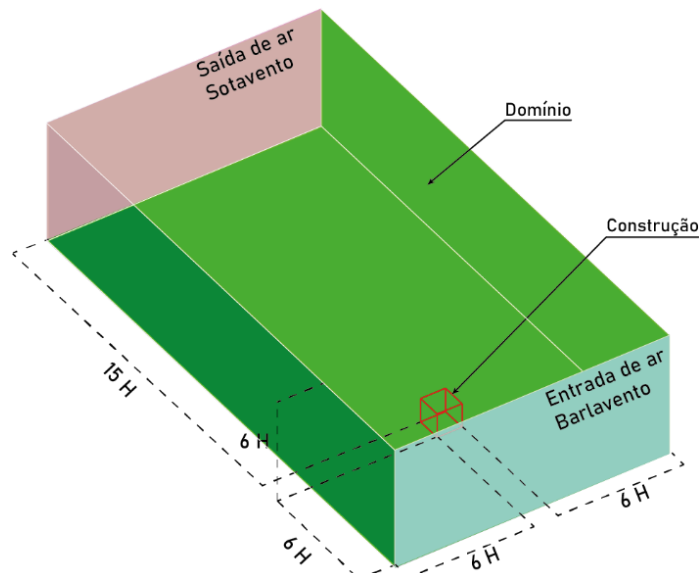
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

### 4.3.3 Modelagem para o ANSYS

Após a produção do modelo tridimensional no software *Rhinoceros 3D*, é necessário agregar todo o modelo como um bloco unificado, rígido no interior de um volume definido. Este volume possui o nome de domínio e, segundo Brandão (2009), deve ser estanque, sem aberturas e deve possuir o negativo volumétrico do modelo da cidade produzido.

Segundo Cost (2004), é aconselhável a relação de 3% entre a área de obstrução dos elementos modelados e a dimensão do domínio. O domínio pode ser de diversas geometrias, na qual a mais utilizada é a retangular, que segundo Harries (2005), deve ser seis vezes a maior altura encontrada do modelo até o topo do domínio e quinze vezes a distância no barlavento e laterais e 15 vezes no sotavento (Figura 31):

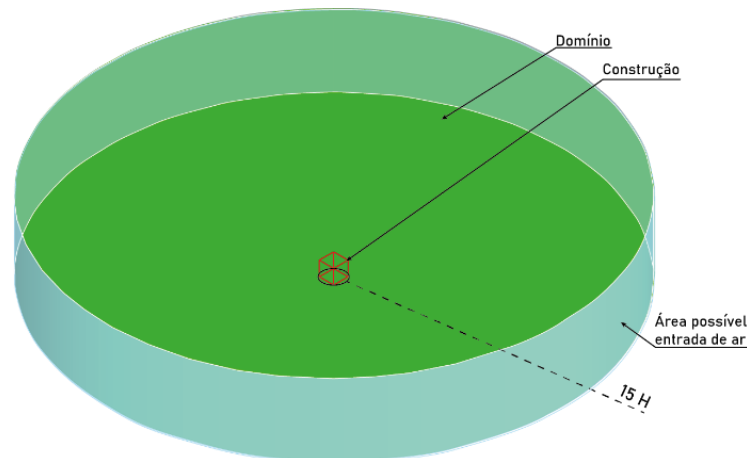
Figura 31 - Dimensões domínio retangular



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Entretanto, como elucidado por Cóstola (2006), o domínio também pode ser representado de maneira circular, proporcionando maior flexibilidade para o modelo e sendo possível calcular diferentes ângulos de incidência. Em vista desta propriedade, o domínio deve ser maior, pois qualquer local é possível de se tornar sotavento. Portanto, estabeleceu-se a distância de 15 vezes a maior altura encontrada do modelo como raio do domínio, a partir de um círculo circunscrito as construções e mantendo a altura como as diretrizes anteriores (Figura 32):

Figura 32 - Dimensões domínio circular



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Portanto, produziu-se, em todos os modelos simulados no ANSYS CFX domínios circulares, onde foram simuladas 2 incidências (leste e sudeste) para cada cenário, como explícito na tabela 12.

Tabela 12 - Relação das simulações produzidas no ANSYS

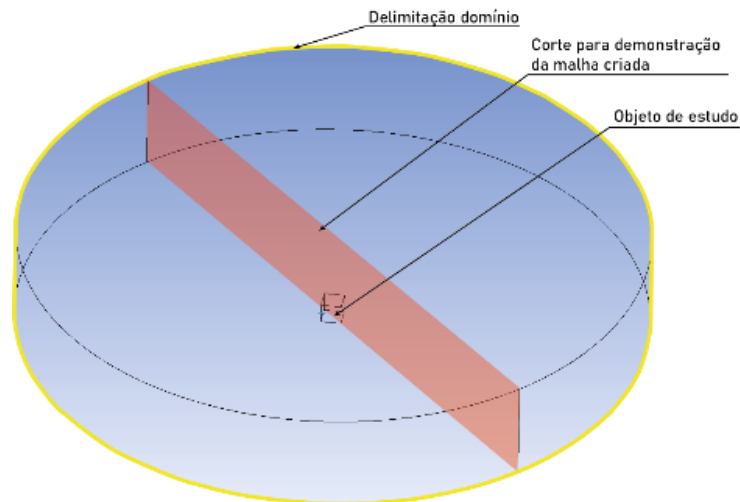
Área 1	Cenário 1 (leste)	Cenário 1.1 (sudeste)	Cenário 1.2 (leste)	Cenário 1.3 (sudeste)
Área 2	Cenário 2 (leste)	Cenário 2.1 (sudeste)	Cenário 2.2 (leste)	Cenário 2.3 (sudeste)
Área 3	Cenário 3 (leste)	Cenário 3.1 (sudeste)	Cenário 3.2 (leste)	Cenário 3.3 (sudeste)

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

#### 4.3.4 Meshing

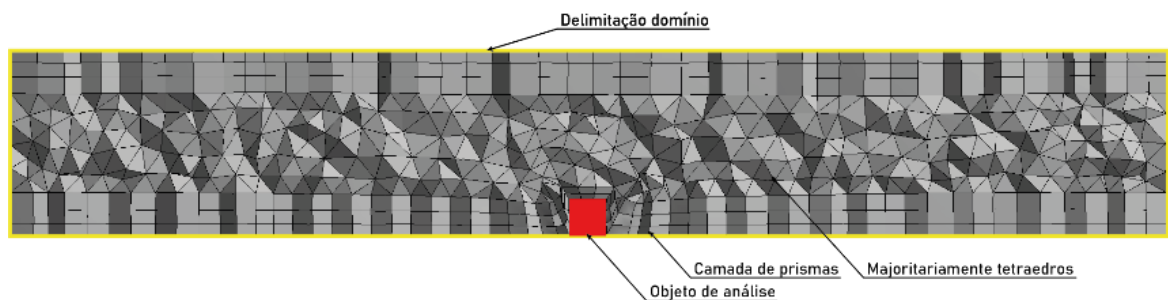
Com a modelagem realizada, faz-se necessário a produção de uma malha chamada *mesh*, onde o domínio é subdividido em diferentes formas geométricas menores (Figura 33). A malha no espaço tridimensional pode ser construída com tetraedros, hexaedros, pirâmides e prismas, vide a seção representada na figura 34. Nesse passo, é indicado a criação de prismas nos objetos de interesse da simulação, neste caso, as edificações e o solo, sendo assim, mais bem aferido o desprendimento da camada limite (Figura 34). Ademais, o programa constrói o volume do domínio com as outras geometrias, com suas dimensões controladas pelo usuário, comumente relacionando o maior número de geometrias com simulações mais apuradas e mais demoradas (BRANDÃO, 2009).

Figura 33 - Domínio circular com delimitação do corte



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 34 - Corte no domínio circular e discriminação de malha



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

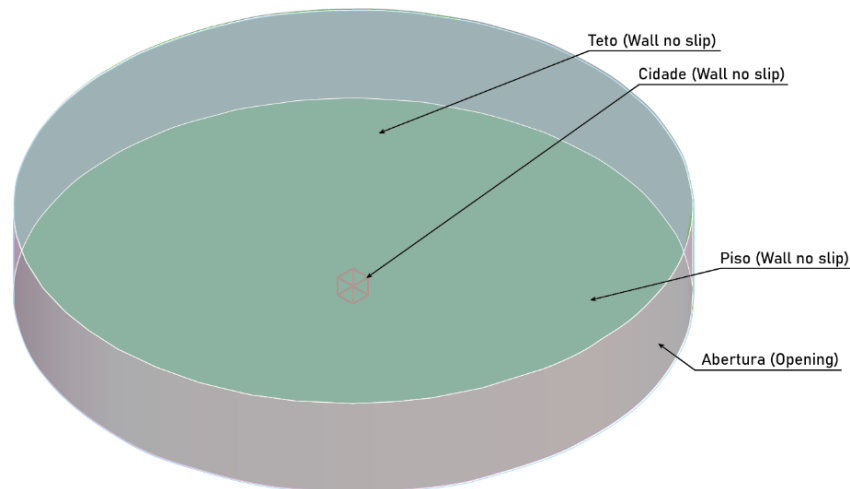
A qualidade da malha pode ser dada a partir de diversos parâmetros. Nestas simulações, foram considerados os valores de qualidade ortogonal e assimetria (*Skewness*), as quais não devem ser maiores que 0,1 e menores que 0,95, respectivamente (CFX, 2003).

#### 4.3.5 CFX-Pre

Neste momento, com as geometrias produzidas e a malha criada, é necessária a inserção das condições iniciais para a simulação, apropriando, assim, de cada elemento da simulação a um caráter físico, construindo o perfil de ventos a ser simulado, bem como sua intensidade e sentido do vento. Em todas as simulações, as geometrias foram inseridas conforme a figura 35.



Figura 35 - Denominação das partes simuladas



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

O “teto”, “cidade” (objeto ou objetos de estudo) e “piso” denominados *wall*, significando dizer que são fronteiras sólidas que não permitem a entrada ou saída de ar. Sendo possível aderir a uma rugosidade específica de um dado material a cada área de parede. Brandão (2009) esclarece que a escala da simulação é grande e que, portanto, a rugosidade dos materiais se torna algo secundário. Desse modo, é dada a qualidade de *smooth wall*, como critério genérico de paredes suaves.

Por fim, configura-se a “abertura” como *opening*, ou seja, em qual direção o vento irá permear sendo programado pelo usuário. Todas as simulações foram realizadas a 3,05 m/s nas direções de 90° (leste) e 135° (Sudeste), dados relacionados as médias a partir dos valores das normais climatológicas do INMET entre os anos de 1961 e 2010.

Por ser um recorte de um centro urbano, contudo, é necessário utilizar-se de equações, de modo a corrigir o gradiente de ventos. Contudo, utilizou-se a equação do *Building Research Establishment* (1978) para fazer esta correção, onde são considerados a rugosidade e a porosidade do meio inserido.

$$V = V_M \times k \times Z^a \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

- $V$  = velocidade média do vento à determinada altura;
- $V_m$  = velocidade inicial de referência do estudo;
- $Z$  = altura determinada;
- $k, a$  = coeficientes de rugosidade do terreno.

Sendo os coeficientes escolhidos de “centro de cidade” ( $k = 0,21$ ;  $a = 0,33$ ) elucidado por Jackman (1980 *apud* BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005) na tabela 13.

Tabela 13 - Coeficientes de rugosidade do terreno

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: Jackman (1980 *apud* BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005).

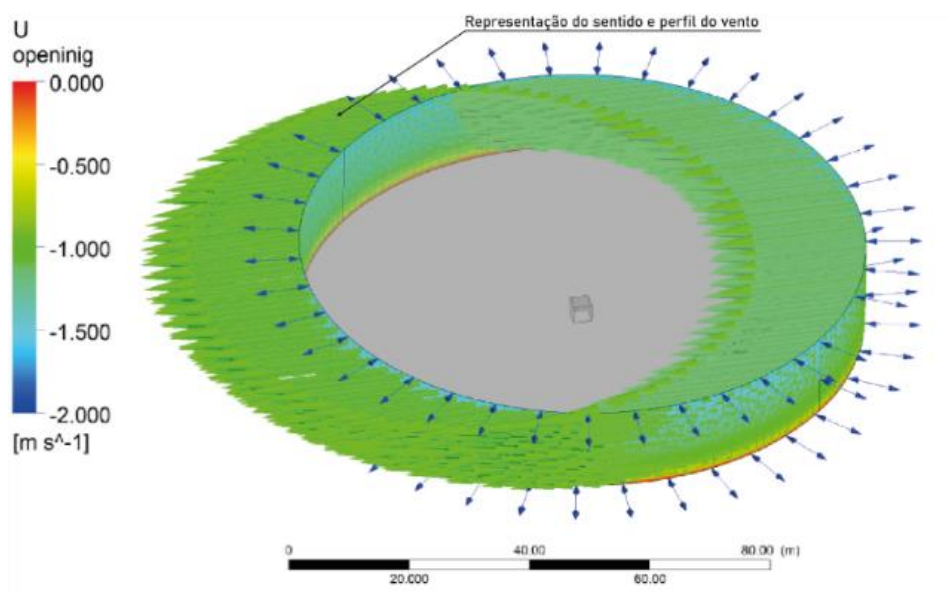
Para a inserção dos parâmetros de velocidade e sentido no programa, utilizou-se as seguintes fórmulas da tabela 14. Assim, criou-se o seguinte perfil, variando a velocidade em função da altura (Figuras 36 e 37).

Tabela 14 - Equações de correção perfil de vento

Expressões	Valores
A	0.33
Dir	90
Dirá	$(180+dir) * \pi/180$
Kref	0.21
pi180	$\pi/180$
Speed	$velref * kref * zref^a$
Thetaa	Dirá
u1	$speed * \sin(thetaa)$
v1	$speed * \cos(thetaa)$
Velref	3.05 [m <sup>1</sup> s <sup>-1</sup> ]
Zinf	1 [m]
Zref	$abs(z)/zinf$

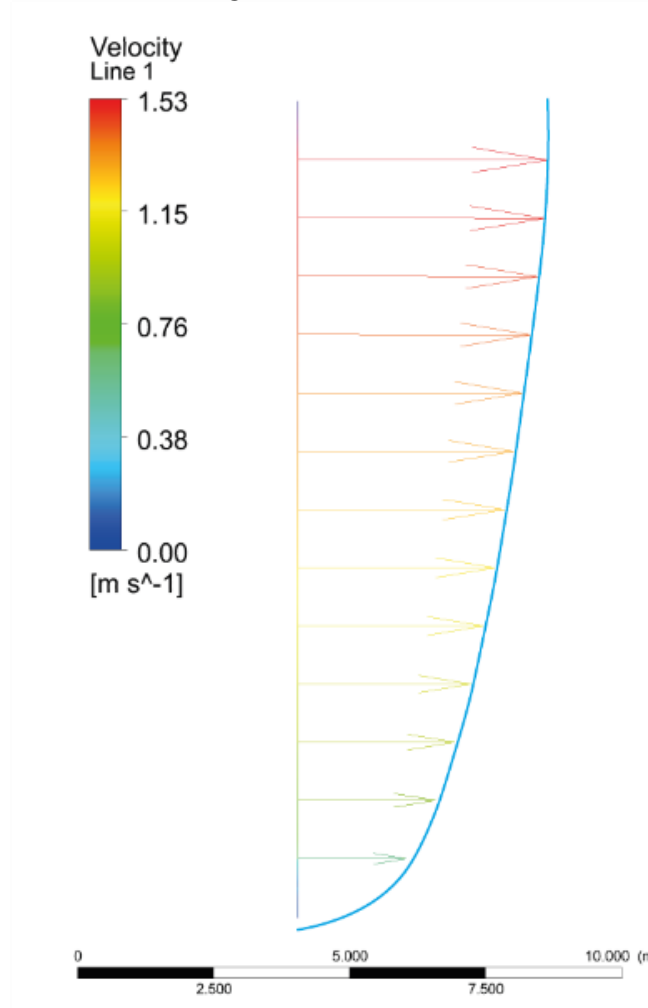
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 36 - Representação domínio e perfil do vento



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 37 - Perfil do vento



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

#### 4.3.6 CFX-Solver e CFX-Post

Neste momento, a simulação está pronta para o início dos cálculos aplicando os parâmetros previamente delimitados na etapa CFX-Pre, a partir do modelo de estresse de Reynolds e com o modelo de turbulência  $k-\epsilon$ . A cada simulação é criado um gráfico, no qual é possível se analisar um primeiro indicador de confiabilidade da simulação e os resíduos. O resíduo é a magnitude do erro das equações a cada interação, ou seja, a cada cálculo. O valor agregado a ele é a diferença entre o resultado anterior e o resultado atual. Com menos erros, significa dizer que os resultados estão decrescendo a uma magnitude menor, ou seja, estão convergindo. Entretanto, quando os erros tendem a aumentar é dito que a solução é divergente (CFX, 2003). No gráfico 6 é possível visualizar os resíduos com valores menores que  $1 \times 10^{-4}$ , concluindo que a simulação foi finalizada convergindo abaixo do valor mínimo de resíduos que é relacionada como meta para simulações aceitáveis (CÓSTOLA, 2006; LEITE, 2010).

Gráfico 6 - Gráfico de resíduos ANSYS



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Além dos resíduos, faz-se necessário olhar se o modelo físico calculado está estabilizado em relação a densidade da malha produzida (quantidade de elementos). Cost (2004) infere que essas duas variáveis devem ser independentes uma da outra. Logo, nas simulações produzidas no software ANSYS, para as regiões de estudo, realizou-se séries de simulações indicando pontos de interesse no modelo digital, onde é possível monitorar a sua estabilidade física. A condicionante selecionada para análise foi a pressão, assim foram escolhidos 4 pontos aleatórios em cada cenário para fins de monitoramento.

A análise de independência de malha é realizada a partir do monitoramento da física do modelo simulado a cada rodada de simulação, onde se aumenta a densidade da malha durante o CFX-Pre e se analisa as respostas dos pontos no CFX-Solver. Esta prática é realizada até conseguir valores abaixo de 10% de diferença entre as simulações com densidades distintas.

Após a convergência dos resíduos a valores inferiores a  $1 \times 10^{-4}$  e a constatação da independência de malha, o modelo está pronto para a retirada dos dados para análise em seu módulo CFX-Post. Neste momento, é possível retirar toda as informações produzidas pela

simulação através de texto e figuras, onde nesta pesquisa retirou-se planos horizontais da velocidade do ar em diferentes alturas (1,5, 45 e 90 metros de altura).

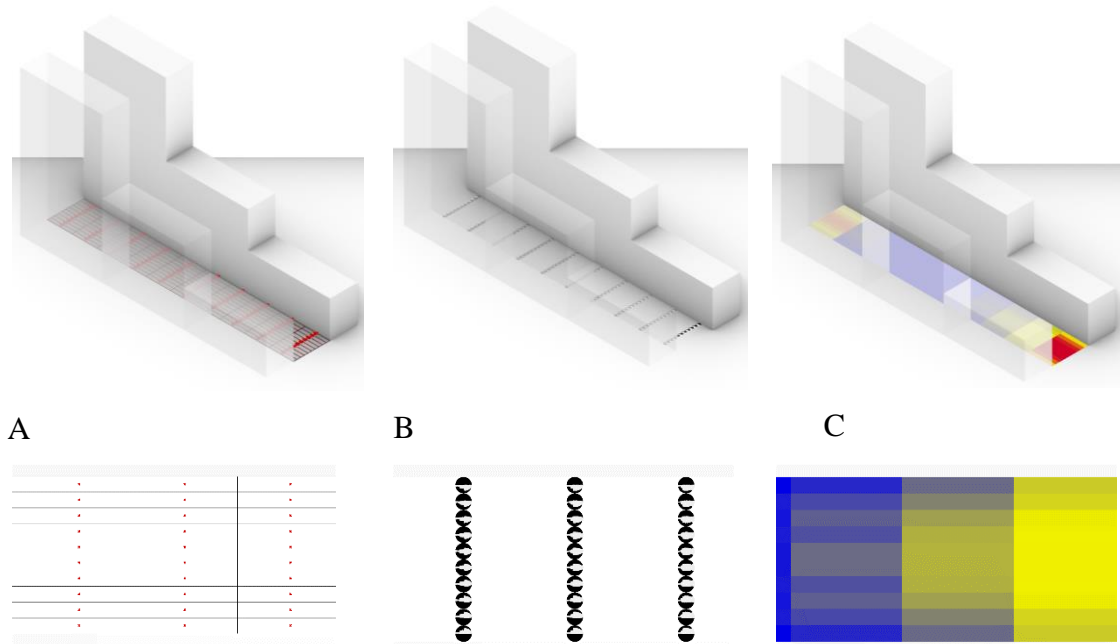
#### 4.3.7 Fator de visão de céu

Para esta etapa, utilizou-se uma extensão do *software Rhinoceros*, o *Grasshopper*. Trata-se de um algoritmo gráfico integrado ao sistema de modelagem do *Rhinoceros*. Com ele, é possível produzir algoritmos de maneira facilitada. Esta extensão permite o uso de algoritmos feitos pela comunidade. Neste trabalho, dentre os plug-in utilizados, o *LadyBug* foi utilizado e adaptado para o cálculo em maior escala do fator de visão de céu.

A superfície de análise, que neste caso são as ruas e calçadas, é transformada em malhas quadrangulares as quais obedecem à distribuição vertical e horizontal (U e V, respectivamente) (Figura 39a). Assim, quanto maior o valor de UV menor esta malha é, e mais detalhado será o resultado da simulação. Posteriormente, a malha é analisada com vários elementos quadrangulares com o intuito de se coletar o centro da geometria, onde será o ponto de análise individual.

O componente “*LadyBug\_Shading Mask*”, validado seguindo as teorias de Oke (1987), simula cada um dos pontos de acordo com suas obstruções em um ângulo de 180 graus, calculando, assim, o fator de visão de céu (Figura 38b). Por fim, esses valores são transformados em uma escala entre 0 e 1: quanto maior o valor, menor a obstrução do céu (mais próximo ao vermelho) e; quanto menor o valor, maior será a obstrução do céu (o valor ficará mais próximo a cor azul) (Figura 38):

Figura 38 - Etapas de análise Fator de visão de céu: a) preparação dos pontos de análise; b) simulação individual em cada ponto do fator de visão de céu; c) tratamento dos dados em gráfico



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

#### 4.3.8 ENVI-met

ENVI-met é um *software* utilizado para simular interações entre superfície, vegetação e atmosfera, além de dispersão de poluentes em ambiente urbano (TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODASIOU, 2018). Este programa, desenvolvido por Michael Bruse, é capaz de simular interações no microclima urbano a partir de modelos atmosféricos que consideram a velocidade média, temperatura e umidade do ar, turbulência, trocas convectivas, radiação solar, cobertura arbórea, vegetação de forração, umidade do solo e as propriedades físicas dos materiais construtivos (BRUSE; FLEER, 1998).

Esse *software* é amplamente utilizado em relevantes estudos como o de Jacobs (2020), o qual revela o pouco impacto térmico dos corpos d'água pequenos no clima urbano. Maciel (2014) utiliza o *software* para o estudo de estratégias de mitigação do efeito da ilha de calor, onde comprovou a consonância entre os resultados gerados através da ferramenta e os cenários real. Desse modo, Huttner, Bruse e Dostal (2008) ilustram a necessidade da manutenção das áreas verdes dentro dos centros urbanos europeus, demonstrando que estas regiões, se bem mantidas, auxiliam na mitigação do aquecimento global na escala do clima urbano, caso o contrário pode intensificar este efeito.

Neste sentido, o uso da ferramenta é dividido em passos sequenciais, e para a produção do modelo tridimensional faz-se necessário a inserção de árvores e forrações e os dados de entrada, conforme esquema apresentado na figura 39:

Figura 39 - Metodologia simulação ENVI-met

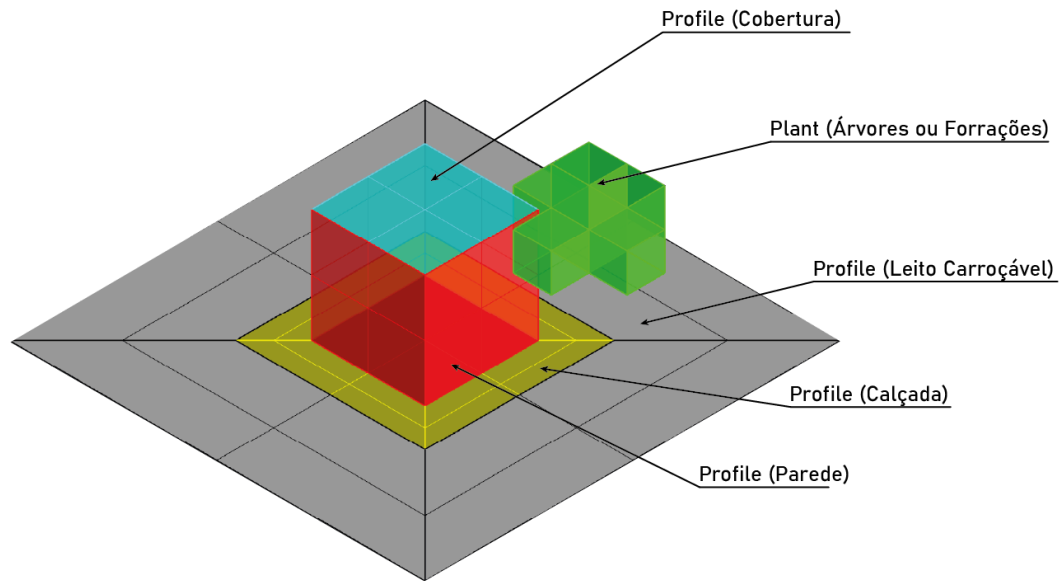


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

#### 4.3.8.1 Modelagem

Assim como na etapa de produção dos estudos do fator de visão de céu, foi utilizado um algoritmo da mesma empresa que o *LadyBug*, o *Dragonfly* em desenvolvimento por Nunzio (2019). Este algoritmo permite a configuração dos materiais construtivos dentro do ambiente *Grasshopper*, sem a necessidade de retrabalho de dentro da ferramenta *SPACES* do ENVI-met. Todavia, é preciso realizar ajustes ao modelo, pois neste *software* tem que indicar as superfícies e seus materiais. Sendo assim, para todas as simulações produzidas neste software, fez-se o uso das seguintes geometrias ilustradas na figura 40:

Figura 40 - Esquema geometrias ENVI-met



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Diferentemente das simulações produzidas anteriormente, a região 3 foi utilizada para a produção deste cálculo, uma vez que é a área com maior densidade, com menor cobertura arbórea e com menor área impermeável. Para além disso, não foi simulado as demais áreas em função do extenso tempo de processamento demandando pelo programa. A tabela 15 apresenta os cenários simulados da área 3 e suas divisões.

Tabela 15 - Relação das simulações produzidas no ENVI-met

Área 3	Cenário 3	Cenário 3.1
--------	-----------	-------------

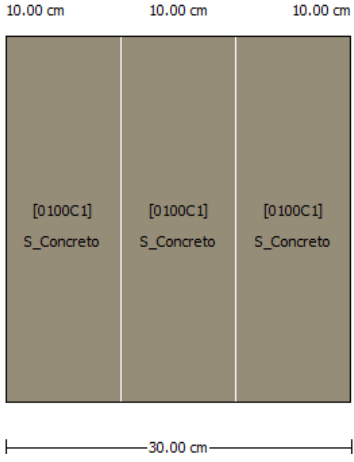
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Apesar de possuir as geometrias idênticas a das simulações anteriores, o ENVI-met possui a capacidade de aumentar a complexidade das simulações. Utilizou-se os levantamentos de campo para normalizar os materiais para a simulação. Foi observado que as calçadas são compostas de material cimentício; o leito carroçável de asfalto; as paredes de tijolo cerâmico com argamassa em cores claras e; os telhados fabricados em telha cerâmica. Portanto, convencionou-se a partir da NBR 15.220 (ABNT, 2003) Parte 2 os métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações e de Oke (1978) os seguintes materiais para simulação, ver tabela 16.



Tabela 16 - Materiais construtivos utilizados

Componente	Espessuras	Materiais	Reflexão	Absorção	Calor específico	Condutividade térmica	Densidade
Parede	<p>2.50 cm      9.00 cm      2.50 cm</p> <p>Outside [000002] [000001] [000002] Inside S_Reboco S_Tijolo e Telhado S_Reboco</p> <p>14.00 cm</p>	Reboco	0.5	0.5	1000 J/Kg*K	1.15 W/m*k	2100 Kg/m <sup>3</sup>
		Cerâmica	0.20	0.80	920 J/Kg*K	0.90 W/m*k	1600 Kg/m <sup>3</sup>
Cobertura cerâmica	<p>1.00 cm      8.00 cm      1.00 cm</p> <p>Outside [00000] [000001] [000001] Inside S_Tijolo e Telhado S_Tijolo e Telhado S_Tijolo e Telhado</p> <p>10.00 cm</p>	Cerâmica	0.20	0.80	920 J/Kg*K	0.90 W/m*k	1600 Kg/m <sup>3</sup>

Cobertura Com reto	 <p>10.00 cm    10.00 cm    10.00 cm</p> <p>Outside    [0100C1]    [0100C1]    [0100C1]    Inside</p> <p>S_Concreto    S_Concreto    S_Concreto</p> <p>30.00 cm</p>	Concreto	0.20	0.80	1000 J/Kg*K	1.75 W/m*k	2400 Kg/m <sup>3</sup>
-----------------------	--	----------	------	------	-------------	------------	------------------------

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

O albedo e a emissividade são outras importantes variáveis construtivas aqui consideradas. O primeiro é definido como a razão entre o fluxo solar dela refletido em relação a radiação incidente no mesmo plano (PEREIRA *et al.*, 2000). O albedo faz parte do vital equilíbrio climático do planeta Terra, influenciando a temperatura média do planeta, bem como a quantidade de vapor na atmosfera, afetando, assim, o regime de nuvens (PERKINS, 2019). A emissividade é baseada no princípio de Perrier Prévost (1751-1839), implicando que todo corpo acima de 0 Kelvin emite e absorve radiação. Define-se, assim, o conceito como a razão entre a emitância monocromática de um dado corpo em relação a outro dado corpo negro a mesma temperatura. Com isso, Oke (1978) colabora com as propriedades radiativas dos materiais, utilizando o albedo e a emissividade do concreto e do asfalto (Tabela 17).

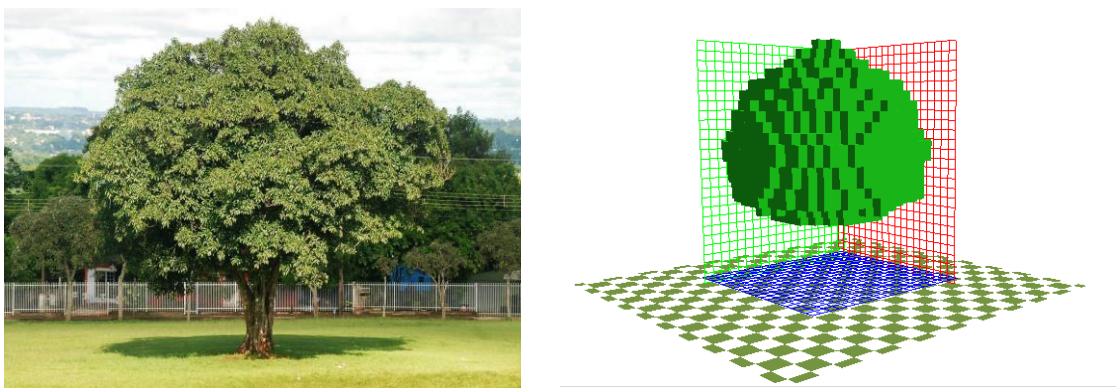
Tabela 17 - Albedo e emissividade dos materiais simulados

Material	$\alpha$ Albedo (%)	E Emissividade (%)
Asfalto	5	95
Concreto	10	71

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Após esta etapa de caracterizar os materiais construtivos, é necessário a discretização de árvores e forrações a partir das espécies e porte levantados. Para a simulação das árvores encontradas no local, foram utilizados os próprios dados oferecidos pelo próprio software “Esférica, com tronco médio, densa e larga (15 metros de altura)”, com a Densidade de Área Foliar (LAD, sigla em inglês) de 2 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, apresentando uma copa circular, com o diâmetro de 10 metros, representando a árvore *Licania tomentosa*, ou Oiti em nome popular, conforme a figura 41. Segundo Lorenzi (2016), esta espécie possui alturas que variam entre 6 a 15 metros de altura, com copa frondosa e troncos largos, entre 30 e 50 cm de diâmetro. Para todas as áreas verdes normatizou-se um albedo de 20 %.

Figura 41 - *Licania Tomentosa* e modelo digitalizado



Fonte: Lorenzi (2016) e ENVI-met (2019).

Foram consideradas as árvores circunscritas e em região pública, na quadra central da área de análise, com a finalidade de diminuir o tempo de simulação. Todas as árvores encontradas com estas características, nesta simulação, eram de tipologia *Licania Tomentosa* de porte pleno.

A produção de arquivos climáticos para a simulação energética de edificações começou em meados de 1976, com o arquivo chamado Teste do Ano de Referência (*Teste Reference Year - TRY*) (CRAWLEY, 1998). Todavia, este tipo de arquivo carece de dados de radiação solar, em qual o próprio software de simulação precisa calcular esta variável a partir da nebulosidade e geolocalização. Além disso, o método de construção deste arquivo também é limitado, sendo a interação entre dados microclimáticos de anos coletados, excluindo anos com meses de temperaturas extremas, para calor ou frio, tendendo a criar um arquivo climático com dados regulares. Porém, um ano não é representativo suficientemente para padrão típico de um clima a longo termo.

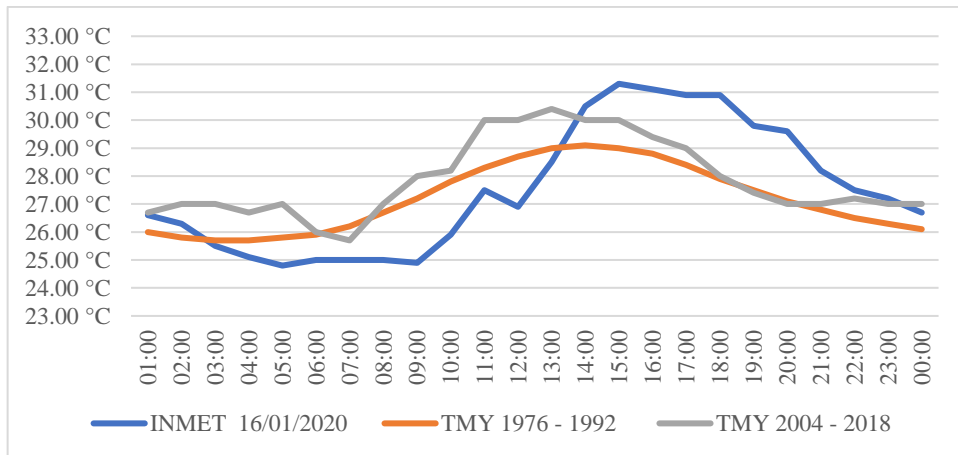
Assim, criou-se o Ano Típico Meteorológico (*Typical Meteorological Year - TMY*), que trata das dificuldades encontradas no arquivo climático anterior. Este possui os dados de radiação solar horizontal direta, além de produzir anos mais representativos, constituídos de meses e dias. Com uma metodologia semelhante ao TRY, o TMY é criado a partir da análise de dados climáticos dos anos disponíveis. Assim, um ano é montado a partir de um conjunto de meses de anos diferentes.

Neste sentido, a Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-condicionado (ASHRAE, 1998), aponta que o uso mais indicado para simulações computacionais é o TMY. Para este trabalho, analisou-se os arquivos climáticos disponíveis<sup>5</sup> para Fortaleza nos dias de coleta (Gráficos 7 a 9).

---

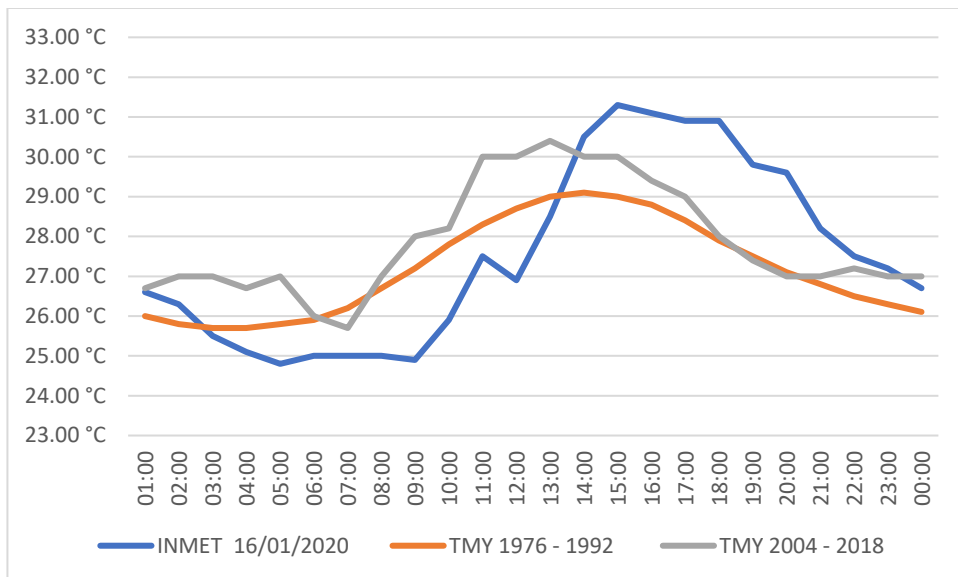
<sup>5</sup> Foi utilizado um site recomentado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) (<http://climate.onebuilding.org/> acesso em: 02/04/2020) bem como os dados disponíveis no Instituto Nacional de Meteorologia (<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>). Ambos com acesso em: 02/04/2020.

Gráfico 7 - Comparação temperaturas do dia 16/01/2020 e arquivos climáticos TMY



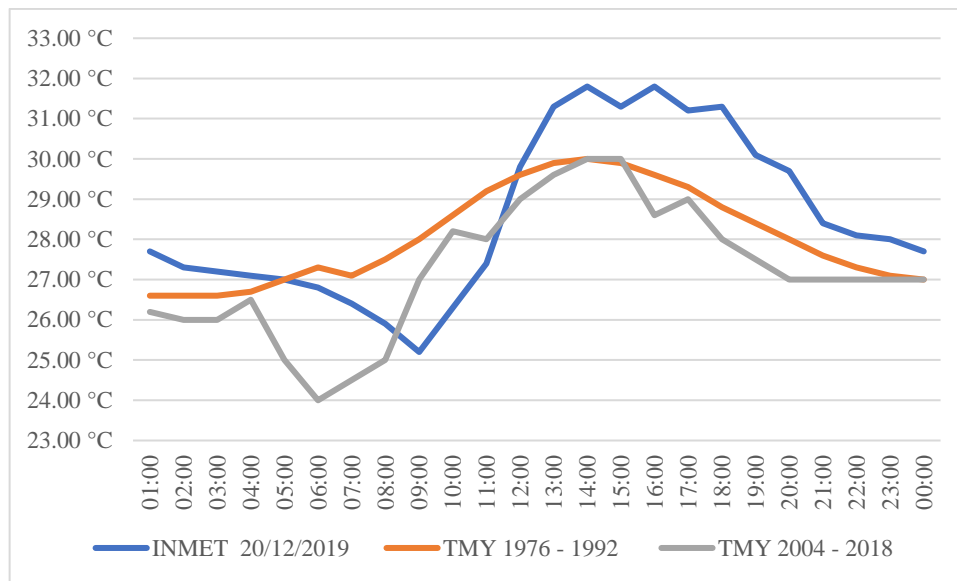
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 8 - Comparação temperaturas do dia 20/01/2020 e arquivos climáticos TMY



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 9 - Comparação temperaturas do dia 20/12/2019 e arquivos climáticos TMY



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Moura (2008) identifica que a ilha de calor de Fortaleza ultrapassa valores de 5°C, acontecendo no período diurno entre as 7h e 15h, sendo esta última o pico de maior temperatura podendo se prolonga até as 17h e, em que as temperaturas vespertinas são consequência da radiação solar incidente no período matutino. Este fenômeno foi observado nos dados analisados como esperado. Tais dados dos dias de coleta são superiores, haja visto que são dados brutos e não foram confrontados para a criação de um arquivo climático. A partir desta análise, percebeu-se que os dados do arquivo climático TMY 2004 - 2018 possui uma distribuição de temperaturas do dia proporcional às datas coletadas em estações automáticas. Portanto, utilizou-se parte dos dados disponíveis neste arquivo para a produção do arquivo climático para a posterior simulação.

#### 4.3.8.2 Dados de entrada da simulação

Os cálculos das simulações foram realizados no modelo de *Simple Force*, utilizando-se os dados disponíveis da estação automática do INMET. As condicionantes utilizadas foram a de temperatura do ar e umidade, as quais estão dispostas na tabela 18. Por se tratar do módulo *Simple Force*, só simula-se em uma direção e intensidade do vento as quais foram realizadas a 3,05 m/s na direção de 90° (leste), dados relacionados as médias a partir dos valores das normais climatológicas do INMET entre os anos de 1961 e 2010.

Tabela 18 - Dados de entrada simulação ENVI-met, 20/12/2019

<b>HORÁRIO</b>	<b>TEMPERATURA °C</b>	<b>RH%</b>
00:00	26.60 °C	77.00 %
01:00	26.30 °C	78.00 %
02:00	25.80 °C	81.00 %
03:00	25.10 °C	85.00 %
04:00	25.50 °C	84.00 %
05:00	26.10 °C	80.00 %
06:00	25.00 °C	85.00 %
07:00	24.80 °C	86.00 %
08:00	24.50 °C	88.00 %
09:00	24.40 °C	88.00 %
10:00	27.00 °C	83.00 %
11:00	27.00 °C	79.00 %
12:00	28.40 °C	69.00 %
13:00	29.80 °C	57.00 %
14:00	30.90 °C	57.00 %
15:00	30.80 °C	58.00 %
16:00	30.70 °C	60.00 %
17:00	30.80 °C	57.00 %
18:00	31.00 °C	58.00 %
19:00	30.30 °C	58.00 %
20:00	29.30 °C	61.00 %
21:00	28.00 °C	68.00 %
22:00	27.70 °C	72.00 %
23:00	27.50 °C	74.00 %

Fonte: INMET (2020).

Por fim, assim como realizado no ANSYS, é necessário analisar se os resultados obtidos são plausíveis. Desse modo, foi realizado o cruzamento dos dados simulados com os dados coletados nos pontos de análise em cada região a partir do método de coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Neste cálculo, mede-se dois conjuntos: uma variável independente (temperatura do ar coletada) com uma variável dependente (temperatura do ar simulada). O Coeficiente varia entre -1 e +1, demonstrando uma maior agregação com a correlação positiva (valores próximos a +1), ou seja, valores positivos e factíveis, ou menor associação com valores negativos (valores próximos a -1).

## 5 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Em um primeiro momento, foram feitas análises das regiões a partir da ventilação urbana simulada através do *software* ANSYS. Nesta primeira ocasião, organizou-se as regiões na ordem de menor capacidade construtiva para a maior apontando os possíveis efeitos aerodinâmicos derivados das modificações da morfologia urbana aqui proposta no capítulo de método. Em um segundo momento, utilizou-se a região de maior capacidade construtiva a partir das simulações de tempo de insolação, fator de visão de céu, velocidade do ar considerando trocas convectivas e temperatura potencial do ar. Com esta área analisada, de forma empírica, disserta-se sobre a possibilidade de modificação microclimática nas demais regiões de forma decrescente de densidade construída e da cobertura arbórea, a partir das simulações de insolação e o fator de visão de céu.

### 5.1 REGIÃO 1 - VENTILAÇÃO

A região 1 de estudo, encontra-se circunscrita entre a rua São Paulo (a Norte), rua Barão do Rio Branco (a Leste), rua Pedro Pereira (a Sul) e as ruas General Bezerril e Edgar Borges (a Oeste). De acordo com a Legislação de Uso e Ocupação do Solo vigente (FORTALEZA, 2017), esta região se caracteriza como ZEDUS, encontrando também, circunscrita a ela, a ZEPH, conforme a figura 42.

Para posteriores análises comparativas entre velocidades do ar, indica-se uma malha de 18 pontos equidistantes no nível do pedestre (1,5 metros em relação ao solo) como ilustrado na figura 43. A figura 42 foi produzida a partir dos dados disponibilizados pela mesma lei em seu Anexo 2 – MAPA 2.4/A4. Por falta de especificidade da legislação, considerou-se as quadras que interseccionam a delimitação da ZEPH como sendo área de preservação igualmente. Portanto, seguindo ainda a mesma legislação, em seu artigo 165, § 2º, essas quadras não foram demolidas para uma possível verticalização a qual foi aplicada os índices edifícios da ZEDUS.



Figura 42 - Mapa de zonas especiais e pontos de análise - Região 1



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

As figuras 43 e 44 ilustram a modelagem tridimensional produzida, onde a 43 representa a situação atual e a 44 a verticalização possível na região conforme os padrões definidos pela metodologia.

Figura 43 - Volumetria região 1 - Não verticalizado



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

Figura 44 - Volumetria região 1 - Verticalizado

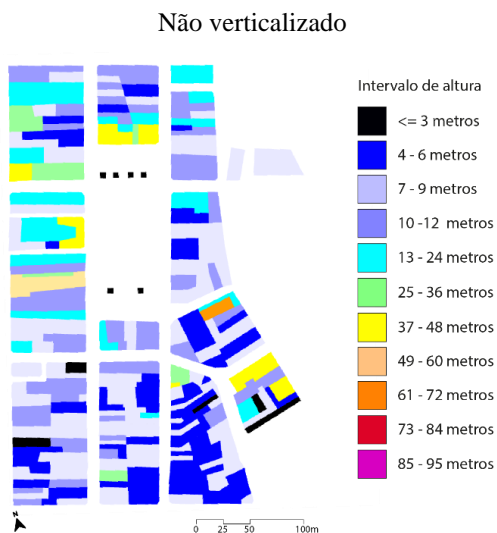


Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

De forma mais específica, as figuras 45 e 46 indicam as alturas por edificação nesta região, onde anteriormente possuía majoritariamente edificações de até 6 metros de altura e

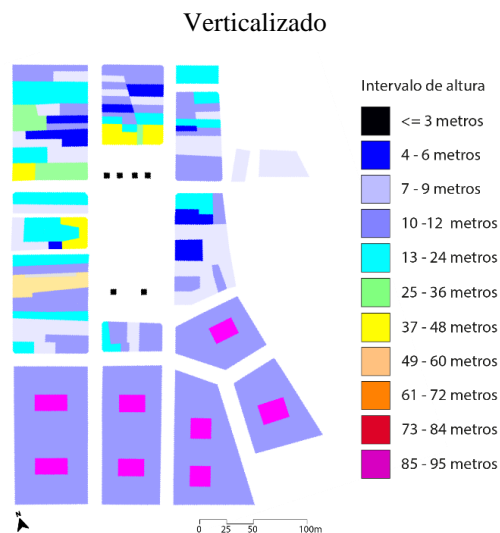
uma com até 60 metros. A figura 47 demonstra a nova morfologia urbana com a capacidade máxima de construção proporcionada pela legislação.

Figura 45 - Mapa altura das edificações região 1 -



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

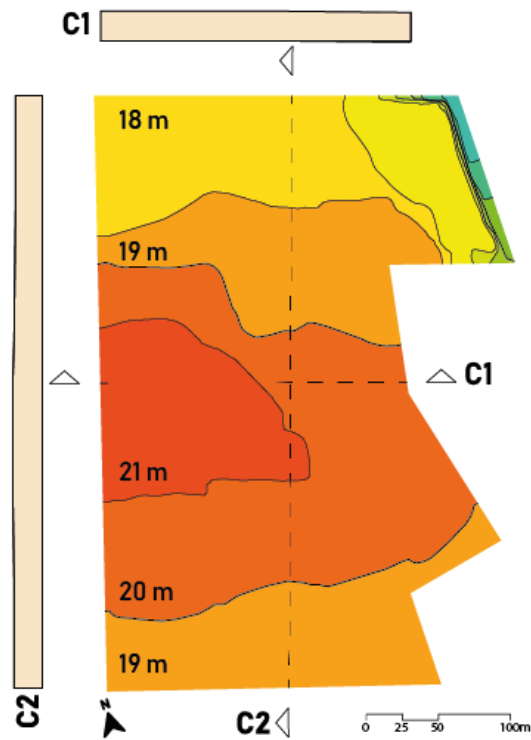
Figura 46 - Mapa altura das edificações região 1 -



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A região possui uma topografia pouco acidentada como indicada no mapa hipsométrico (Figura 47), com uma diferença de até 4 metros de altura em uma distância de 400 metros. Assim, para fins de simulação, considerou-se a topografia plana, uma vez que a topografia pouco interferiria como *barreira a ventilação urbana*.

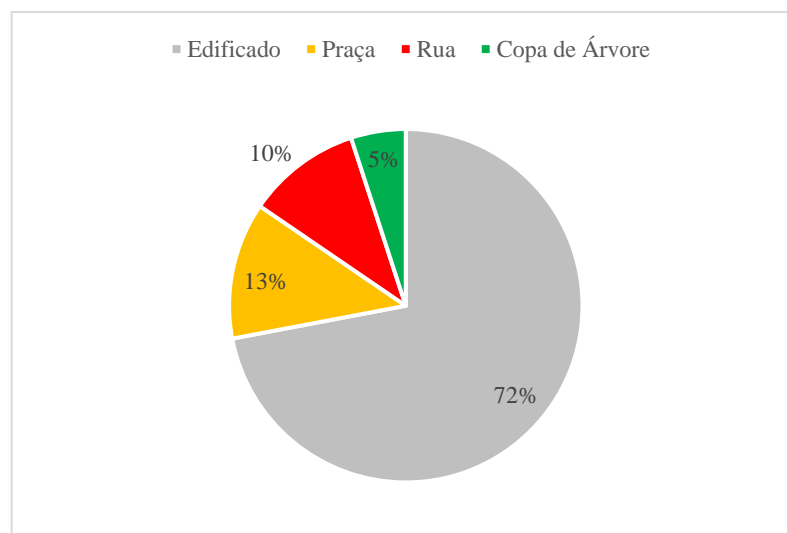
Figura 47 - Mapa hipsométrico - Região 1



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Em relação as características morfológicas, nesta região são encontradas duas grandes praças, áreas arborizadas e passeios largos. Baseado em imagens de satélite foram calculadas as seguintes áreas: total de 101.302,210 m<sup>2</sup>; 72,959.13 m<sup>2</sup> de área para edificações; 12,678.59 de área de praça; 10.586,89 m<sup>2</sup> de área de rua e 5.083,60 m<sup>2</sup> de área arborizada, conforme o gráfico 11.

Gráfico 10 - Discriminação das características morfológicas - Região 1

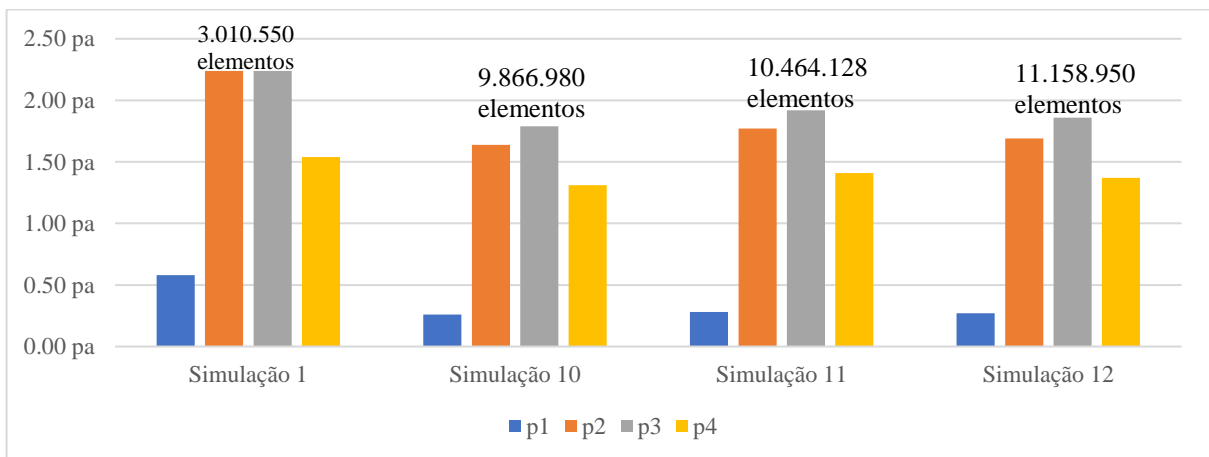


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### 5.1.1 Simulação ANSYS

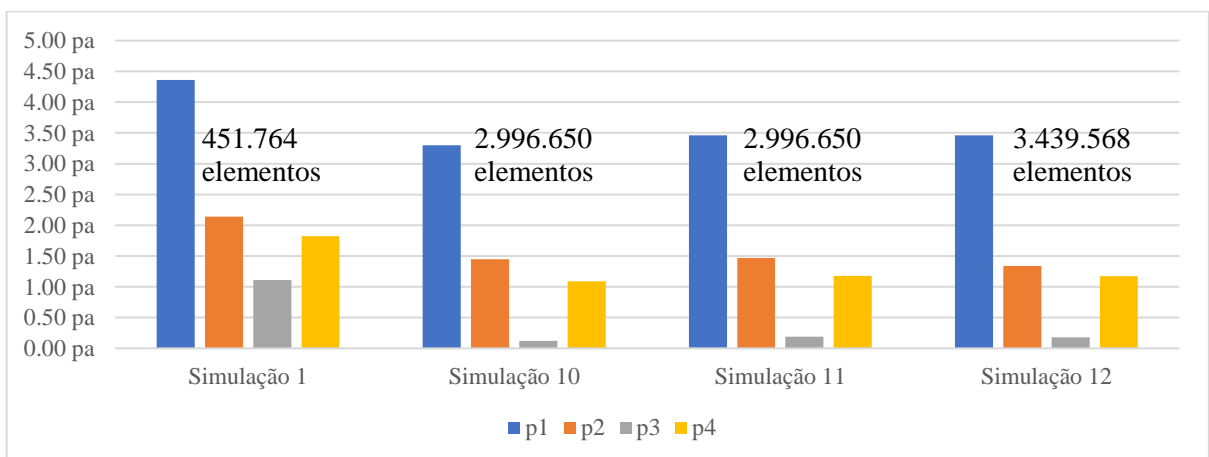
As simulações dos cenários 1 e 1.1 (Gráficos 11 e 12, respectivamente) com o *software* ANSYS, foram validadas a partir do teste de independência de malha, resíduos e os valores da qualidade ortogonal e assimetria. Os gráficos apresentam a constância menor que 10% entre valores de pressão, simulados em pontos aleatórios nas simulações 10, 11 e 12, respectivamente.

Gráfico 11 - Teste independência de malha área 2 - Não verticalizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 12 - Teste independência de malha área 2 - Verticalizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

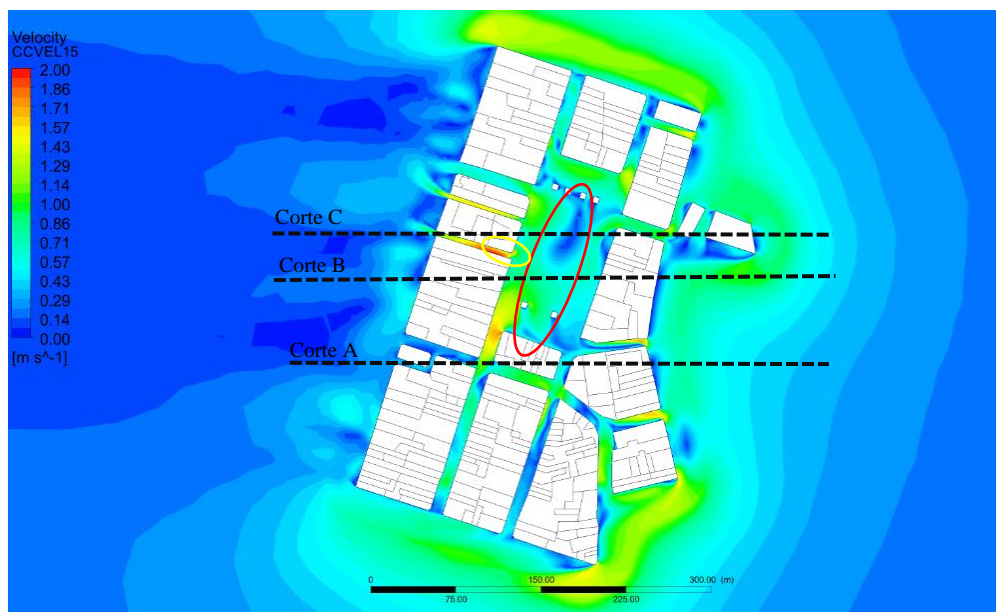
### 5.1.2 Cenário ventilação Leste

É apresentado de maneira comparativa neste item as simulações do cenário 1 e 1.1 com a ventilação no sentido leste-oeste, a partir de visualizações em plantas e cortes. O objetivo é

encontrar as possíveis modificações aerodinâmicas em função da modificação da capacidade construtiva da área.

A figura 48 ilustra o vento no eixo leste-oeste na área 1. Constata-se, com isso, que a região oeste da praça (no círculo vermelho) possui as maiores velocidades do ar, como o local de maior permanência na praça. Encontra-se também o efeito de aumento da velocidade do ar em consequência da diminuição da área de contribuição (efeito Venturi), que está indicado em amarelo. Para além da praça, as ruas em todos os sentidos demonstram velocidades maiores de 0.50 m/s e com poucos pontos de estagnação do ar.

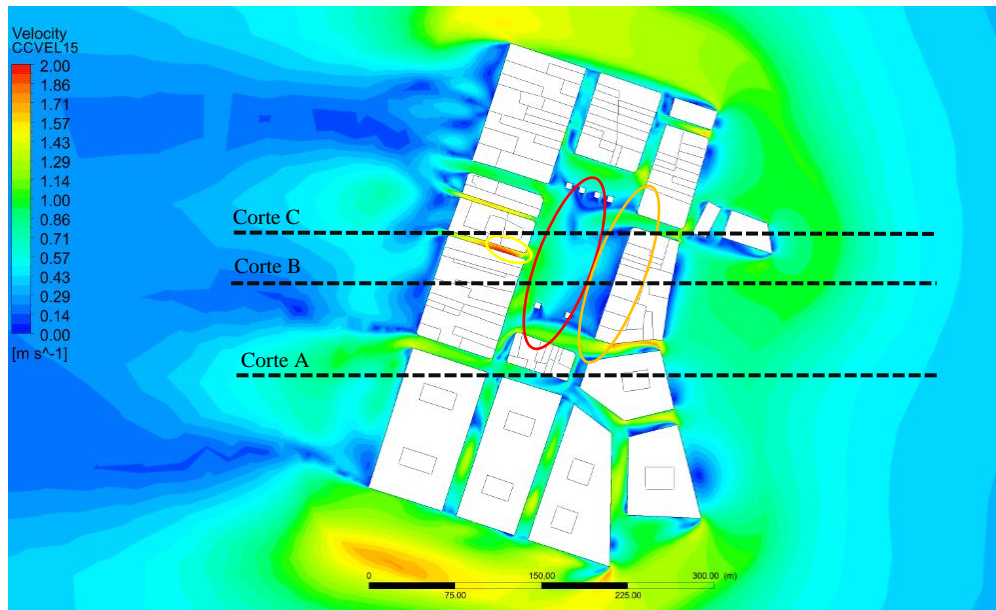
Figura 48 -Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1.5 m, região 1 - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

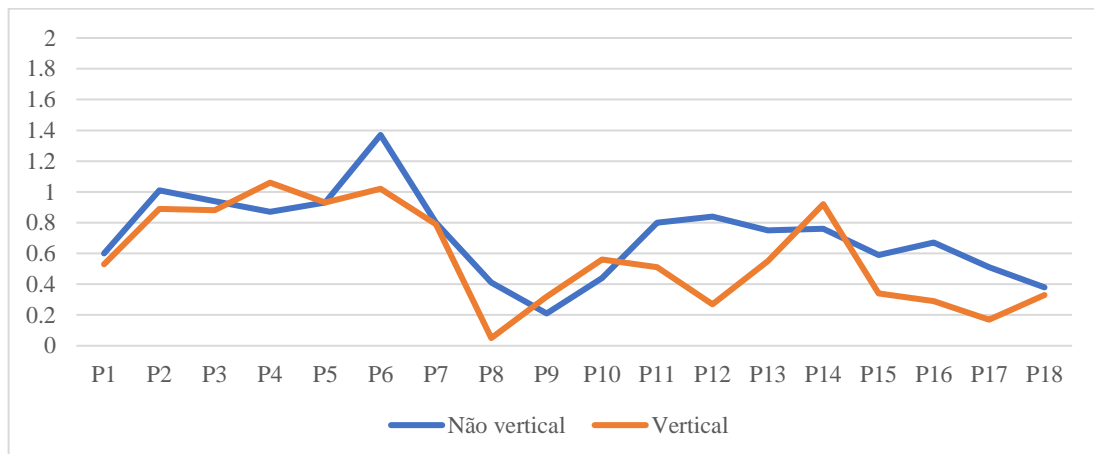
Em cenário verticalizado (Figura 49), a movimentação de ar permanece similar ao cenário anterior, em função das edificações propostas não se encontram alinhadas à praça. Em razão da verticalização e do aumento das calçadas solicitadas pela lei, verifica-se um aumento expressivo na velocidade de ar no entorno das novas edificações. E, conseqüentemente, com o aumento da vazão de ar nos eixos carroçiais novos à uma diminuição de velocidade, como indicado na região leste da praça (no círculo laranja). O gráfico 14 ilustra melhor esta diminuição a partir da comparação dos pontos de verificação anteriormente indicados na figura 43.

Figura 49 - Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1,5 m, região 1 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

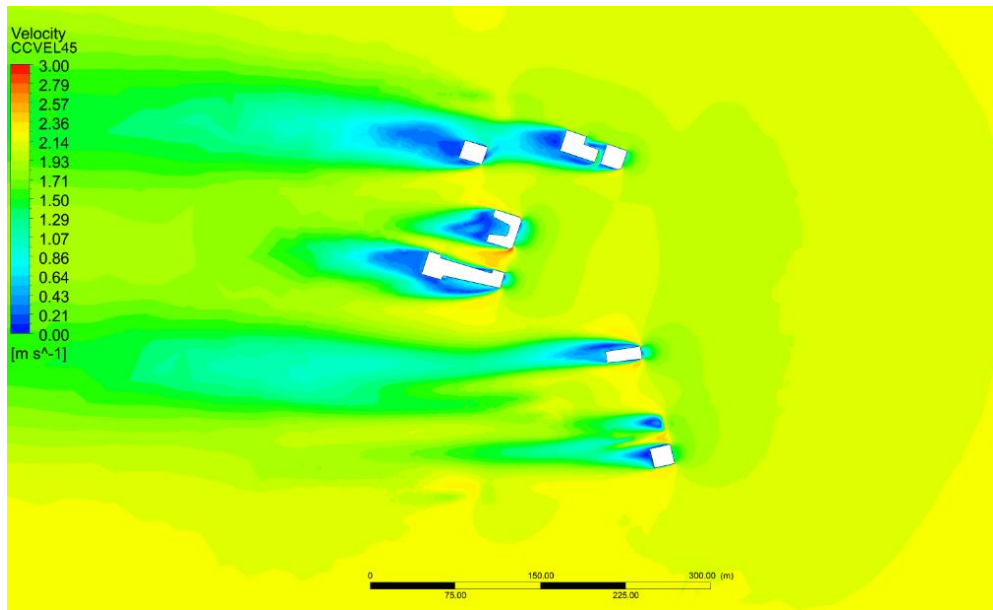
Gráfico 13 - Comparação velocidades do ar - Cenário 1 e 1.1 Leste



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em situação não verticalizada a 45 metros do solo (Figura 50), não foi encontrado efeito aerodinâmico consideravelmente potencialmente danoso ao caminhamento do ar na região. Em função da baixa rugosidade e altura das edificações, o vento não possui relevantes barreiras para a redução da sua inércia.

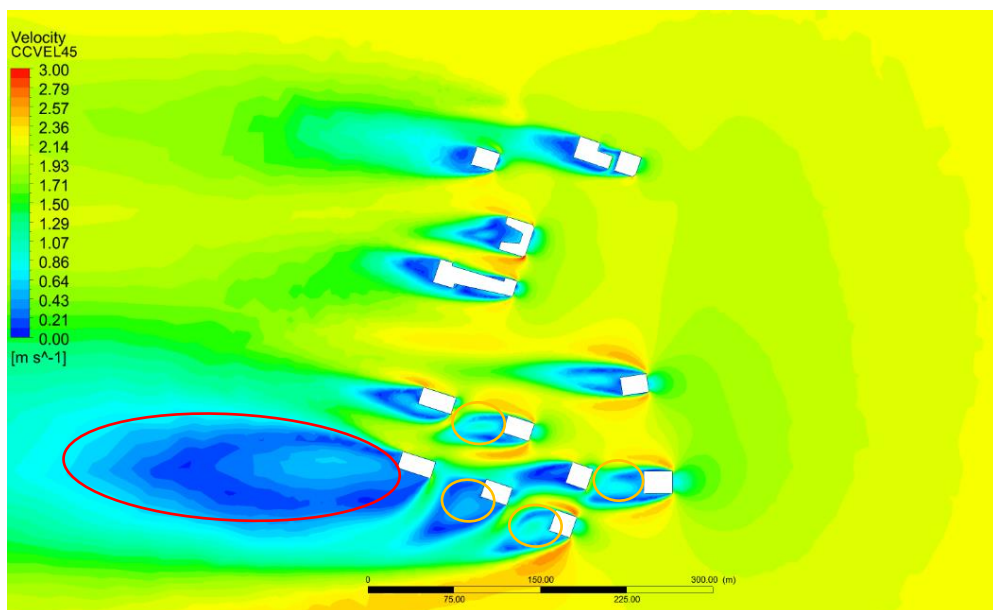
Figura 50 - Simulação fluidodinâmica sentido leste, 45 metros, região 1 - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Em contrapartida, no mesmo plano em cenário verticalizado (Figura 51), observa-se que a resistência imposta pelas novas edificações interferem no fluxo de ar criando zonas de esteira de 300 metros no barlavento (no círculo vermelho) além do efeito de recirculação de ar (no círculo laranja), o que pode causar, potencialmente, a diminuição da qualidade do ar urbano. Aponta-se, também, a provável diminuição da capacidade de ventilação natural as edificações no barlavento das torres de 95 metros de altura.

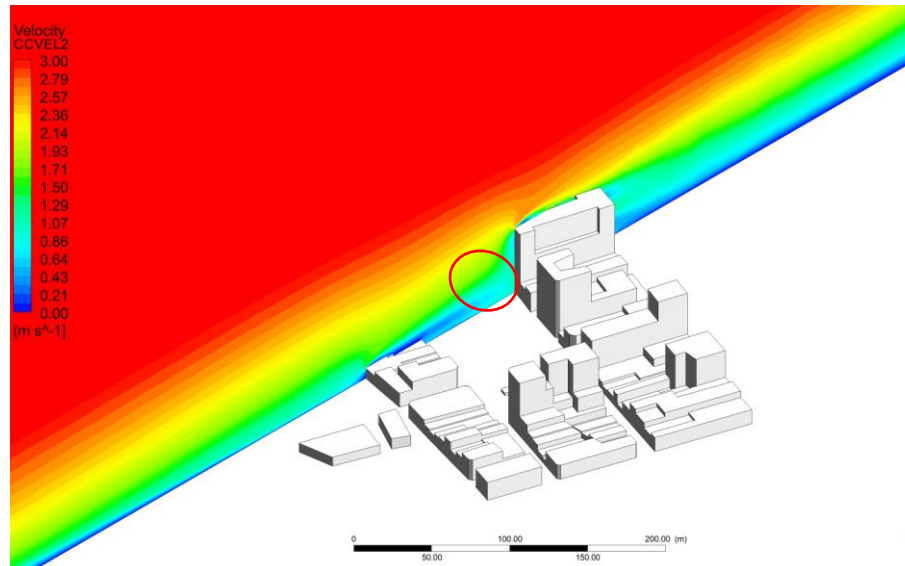
Figura 51 - Simulação fluidodinâmica sentido leste, 45 metros, região 1 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A figura 52 apresenta o corte no centro da praça em cenário não verticalizado, percebe-se o pouco impacto da verticalização no sotavento, não interferindo diretamente na região oeste da praça (no círculo vermelho) e nem na ventilação no nível do pedestre.

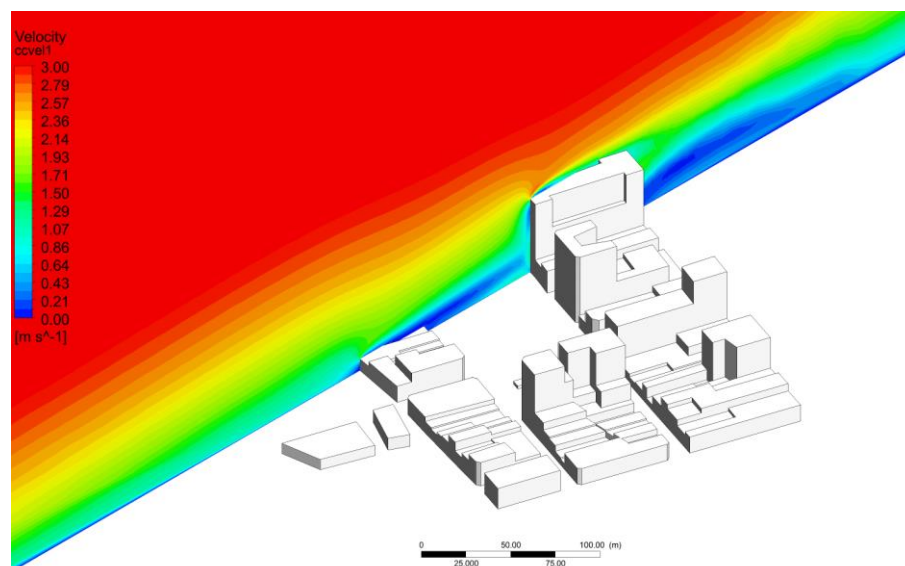
Figura 52 - Corte B - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Em situação verticalizada (Figura 53), é possível inferir que a verticalização não causou grandes impactos a ventilação da praça no nível do pedestre, ainda com velocidades superiores a 1.00 m/s. Contudo, aponta-se um aumento esperado da região de esteira no barlavento, relativo ao aumento da aceleração do ar na camada limite intraurbana.

Figura 53 - Corte B - Verticalizado

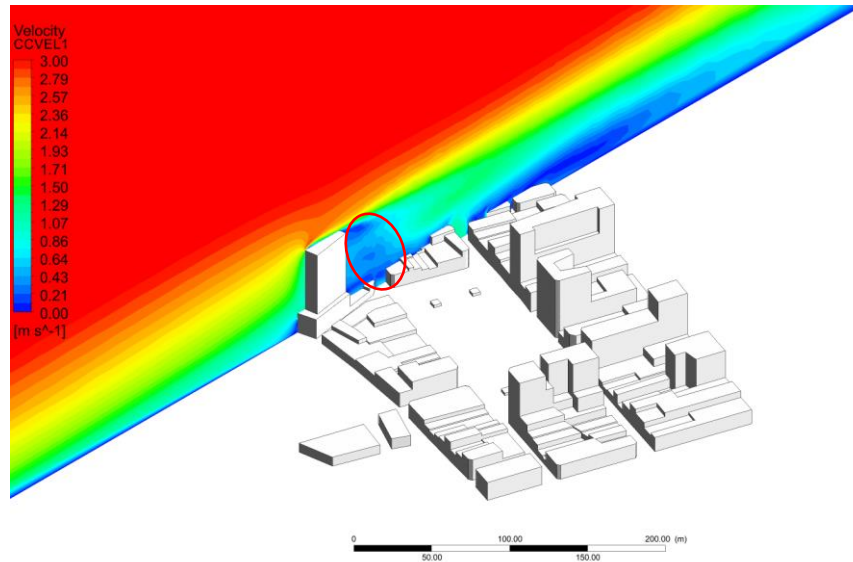


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).



Neste segundo corte, em área não verticalizada (Figura 54), identificou-se que a maior edificação atual da área já produz região de recirculação de ar na rua adjacente (no círculo vermelho) a ele e com uma pequena região de esteira.

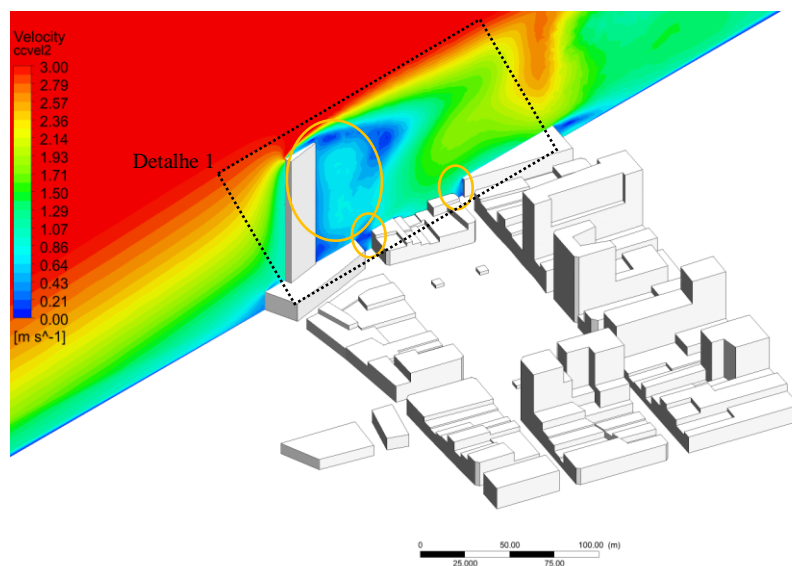
Figura 54 - Corte A - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Sendo o mesmo corte em situação verticalizada (Figura 55), é observado o aumento da região de recirculação de ar impactando, desta vez, até as ruas adjacentes (no círculo laranja). Todavia, em função do aumento de velocidade, neste corte, o efeito esteira no barlavento da área é mitigado.

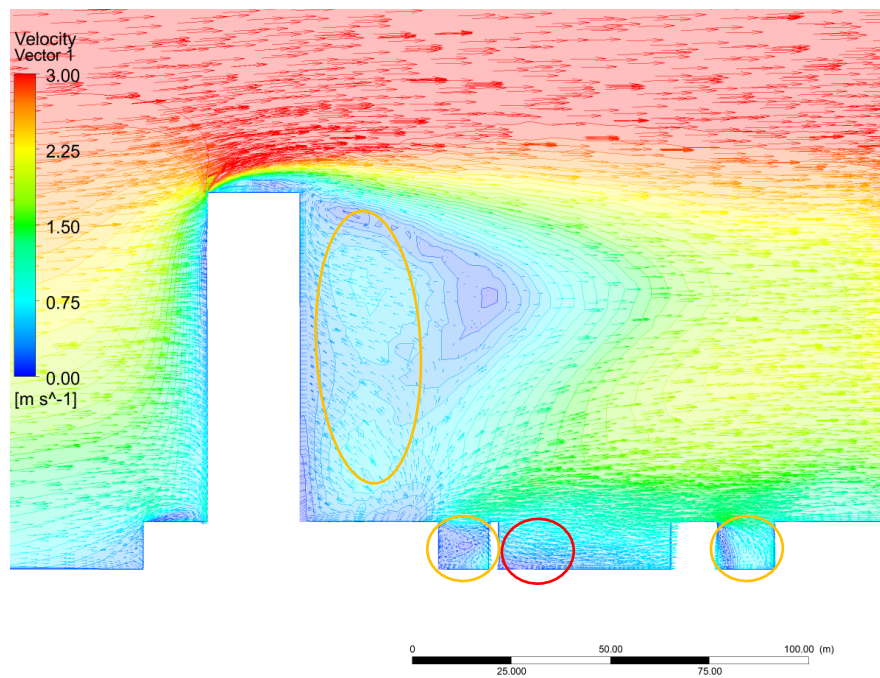
Figura 55 - Corte A - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A figura 56 aproxima o corte anterior ao nível do cânion urbano, demonstrando os vetores de ventilação e seu comportamento, sendo clara a recirculação de ar nos três pontos indicados (no círculo laranja). Em vermelho, o comportamento ao longo de um cânion no sentido leste-oeste, onde mesmo com o aumento da velocidade do ar na região, permanece pontos de estagnação de ar no nível do pedestre (no círculo vermelho).

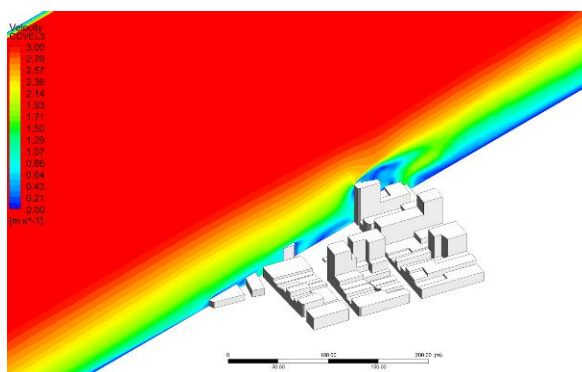
Figura 56 - Detalhe 1 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

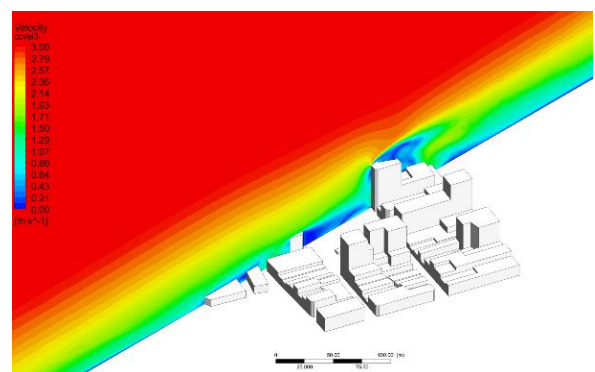
Por fim, os cortes das figuras 57 e 58, não verticalizado e verticalizado, respectivamente, ilustram como a verticalização dos blocos a sul dessa área não impactariam de maneira contundente na velocidade do ar no nível do pedestre a norte.

Figura 57 - Corte C - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 58 - Corte C - Verticalizado



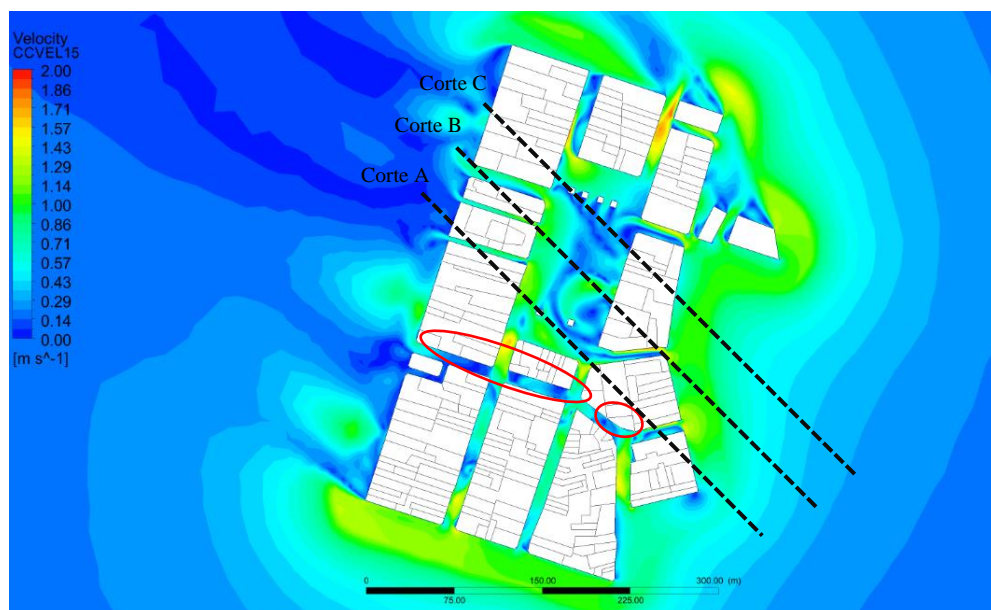
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

### 5.1.3 Cenário ventilação Sudeste

É apresentado de maneira comparativa neste item as simulações do cenário 1 e 1.1 com a ventilação no sentido Sudeste-Noroeste, a partir de visualizações em plantas e cortes. O objetivo é encontrar as possíveis modificações aerodinâmicas em função da maior capacidade construtiva da área.

A figura 59 apresenta a velocidade do ar nos arruamentos no sentido Sudeste-Noroeste com velocidades de até 1.20 m/s. Nos leitos carroçáveis não ortogonais, percebeu-se uma diminuição da velocidade do ar em função da canalização em direções distintas e a baixa verticalização na área, assim, diminuindo a velocidade média nesses locais, como indicado no círculo vermelho. Já no sentido Norte-Sul, não apresentou estagnação de ar além de apresentar velocidades maiores que 1.00 m/s. Na região da praça, notou-se poucos distúrbios aerodinâmicos, apresentando uma ventilação de velocidade constante. A região oeste, como esperado, apresentou velocidade constante de até 1.30 m/s, sendo a área mais utilizada pelos frequentadores da região.

Figura 59 - Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, região 1 - Não verticalizado



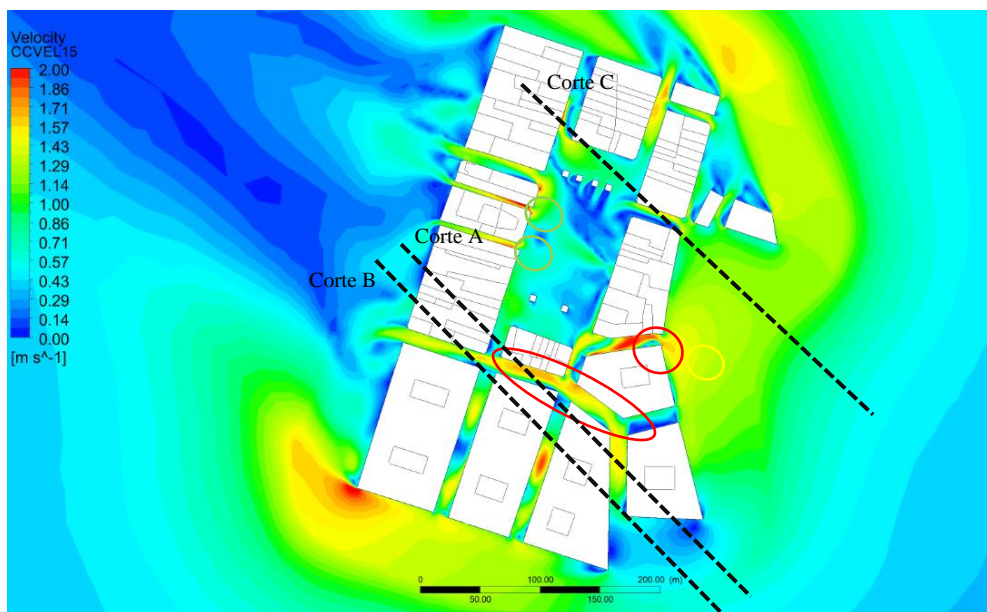
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Porém, a figura 60 apresenta uma significativa diminuição da velocidade do ar na praça em função da verticalização, diminuindo a velocidade média da praça de 1.30 m/s para 0.50 m/s, conforme observado no gráfico 15. Nos arruamentos leste-oeste, apresentou-se um significativo aumento da velocidade do ar, ainda em função da canalização. Entretanto, neste caso, a verticalização da região possibilitou o aumento da massa de ar canalizada, como

indicado no círculo vermelho. Em amarelo, indica-se o aumento da velocidade do ar em consequência da diminuição da área de contribuição da rua por causa da verticalização.

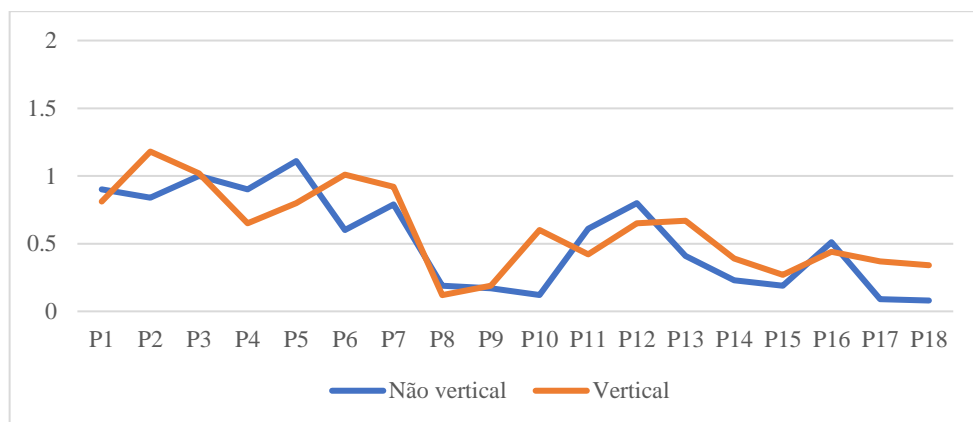
No círculo verde, marca-se o aumento da velocidade pelo efeito Venturi da mesma forma que o analisado em vermelho. Porém, o aumento da velocidade ocorre pela aceleração do ar causada pelas edificações altas, como será visto a seguir nas figuras 61 e 62 que ilustram a velocidade do ar a 45 metros de altura. No sotavento, em consequência do aumento da área de resistência dos edifícios no eixo vertical, a região de esteira provocada pelas modificações aerodinâmicas atingem 500 metros de comprimento.

Figura 60 - Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, região 1 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Gráfico 14 - Comparação velocidades do ar - Cenário 1 e 1.1 Sudeste

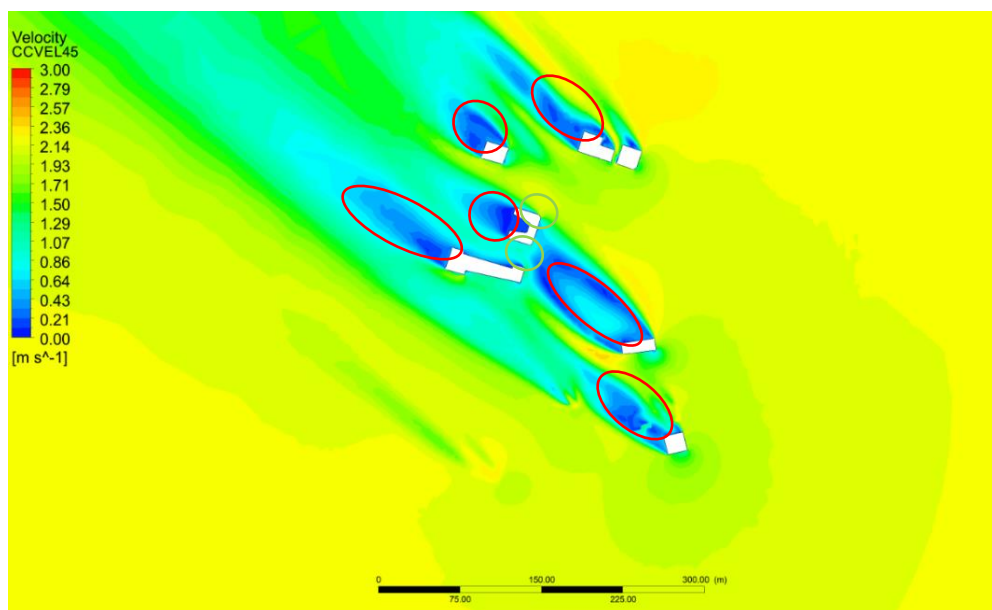


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em um plano a 45 metros de altura em relação do solo, a figura 61 demonstra a velocidade do ar no cenário 1, onde a pouca verticalização do local não infere em fenômenos

aerodinâmicos significativos. Indica-se, em vermelho, regiões de esteira de baixo comprimento (até 100 metros), uma vez que as resistências causadas pelas áreas no sotavento das edificações são baixas. No círculo verde, indica-se a velocidade do ar nos arruamentos para posterior comparação com a figura 62, demonstrando a modificação aerodinâmica causada pelas edificações de 95 metros.

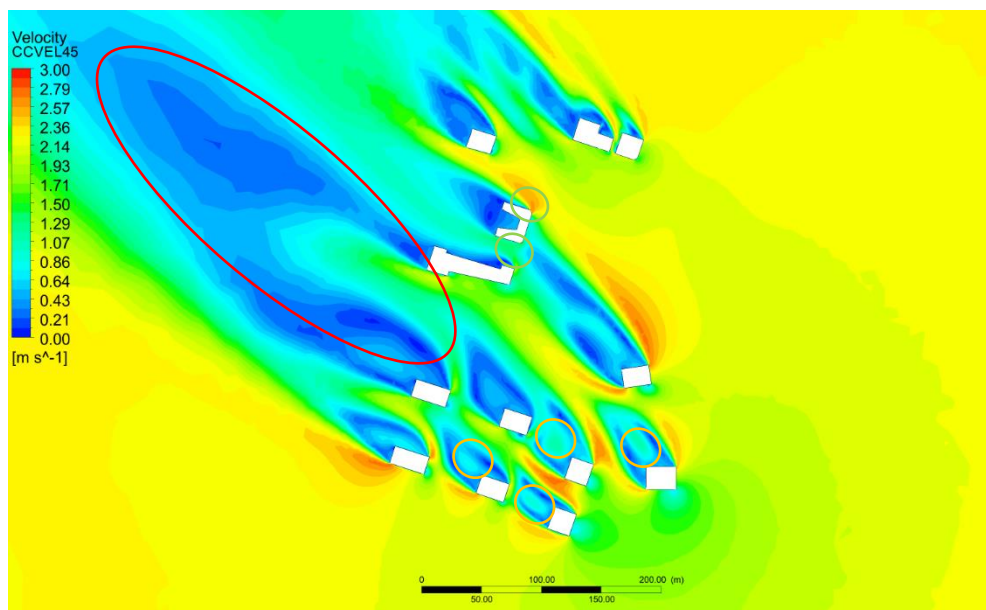
Figura 61 - Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 45 metros, região 1 - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Na figura 62, em vermelho, no barlavento, identifica-se o efeito de esteira na figura 61, desta vez, evidenciando o deste fenômeno em consequência das maiores áreas de obstrução. Além disso, identifica-se regiões de recirculação de ar (no círculo laranja), o que pode ser um indicador de diminuição da salubridade do ar na região. Se tratando da salubridade do ar, infere-se que haverá também a mitigação da capacidade ventilativa nas edificações no barlavento.

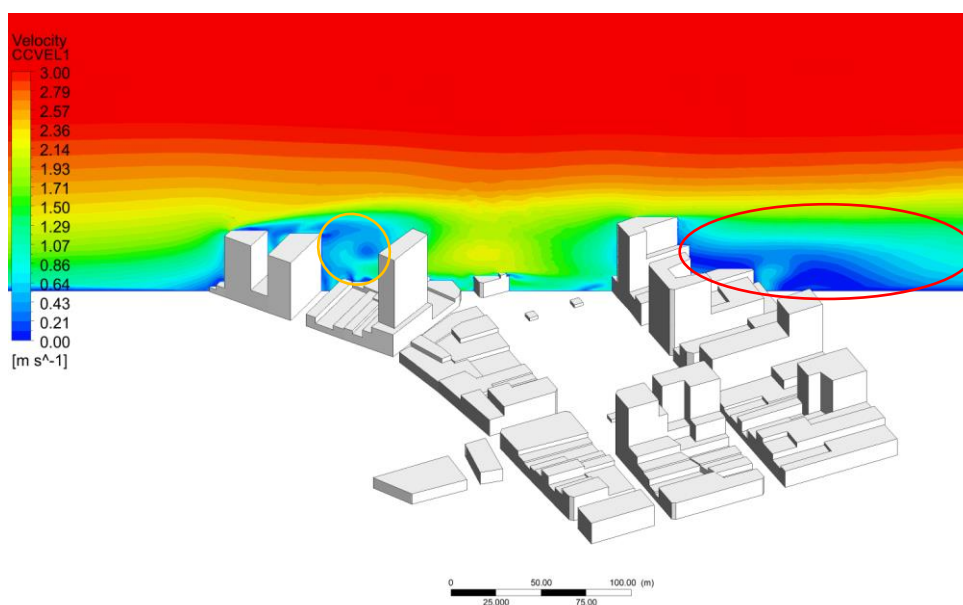
Figura 62 - Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 45 metros, região 1 -Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Em corte, a figura 63 apresenta o cenário não verticalizado, onde é possível identificar regiões de esteira (no círculo vermelho) e recirculações de ar (no círculo laranja) esperadas. Todavia, de tamanho reduzido de até 200 metros.

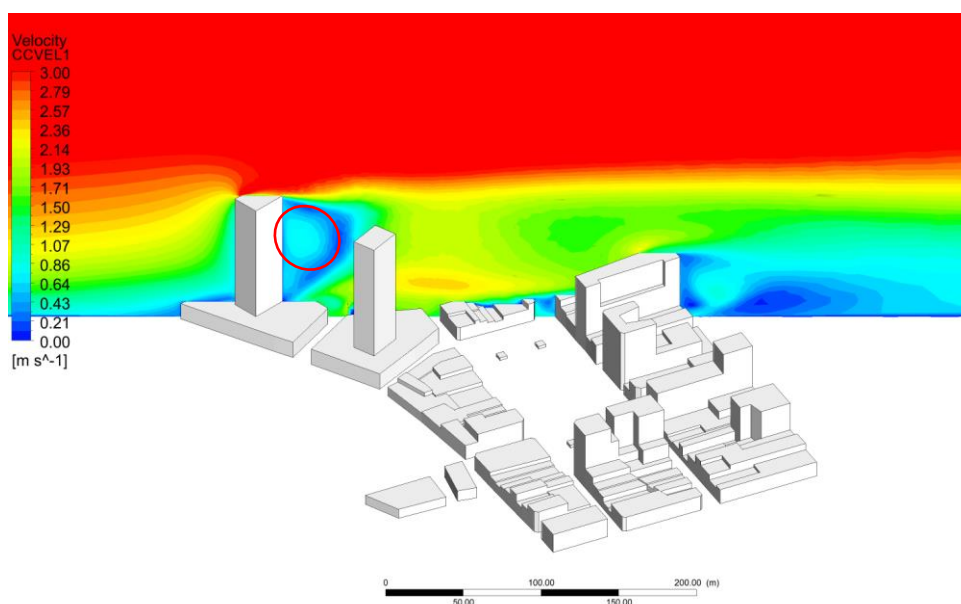
Figura 63 - Corte A - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Em cenário verticalizado, é possível identificar o impacto da velocidade do ar na camada limite intraurbana, bem como no efeito de recirculação de ar produzido pelas edificações altas como ilustrado na figura 64 (no círculo vermelho):

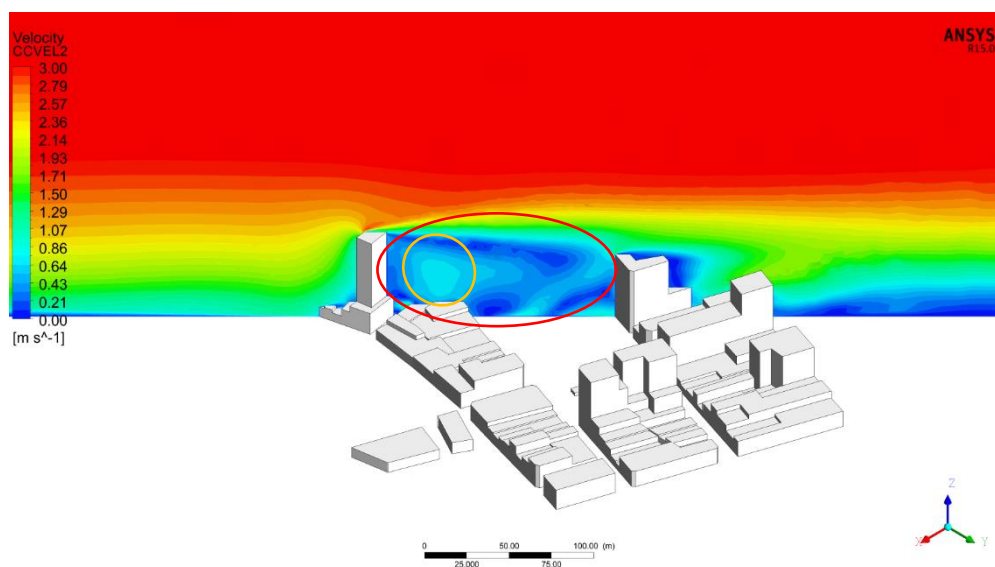
Figura 64 - Corte A - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A figura 65 apresenta um corte em cenário não verticalizado, na edificação com maior altura atualmente da área. Verifica-se uma relevante produção do efeito de esteira com até 200 metros de comprimento (no círculo vermelho), assim como a produção de regiões de recirculação de ar, como visto na indicação (no círculo laranja):

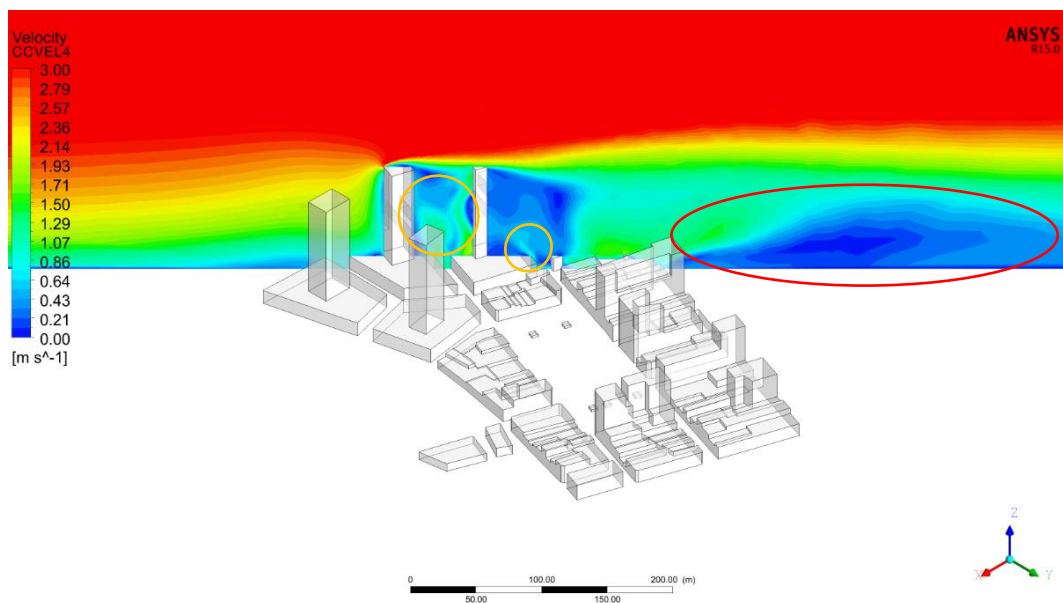
Figura 65 - Corte B - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Em cenário verticalizado (Figura 66), observou-se o aumento da área de recirculação de ar (no círculo laranja), bem como o aumento do impacto no barlavento (no círculo vermelho) produzindo o efeito de esteira.

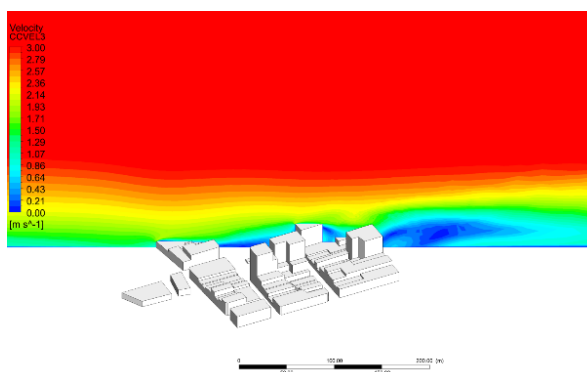
Figura 66 - Corte B - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

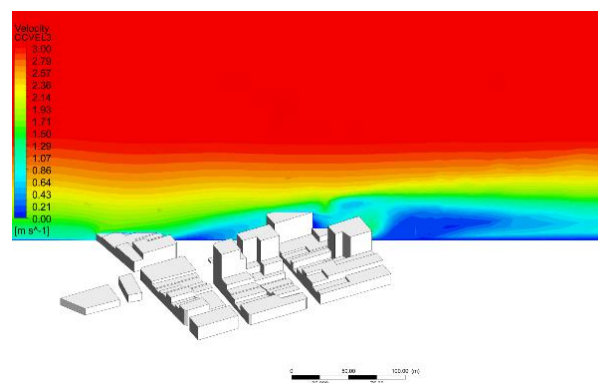
Por fim, os cortes 67 e 68, não verticalizado e verticalizado, respectivamente, inferem que apesar dos efeitos ilustrados serem semelhantes a verticalização da região sul na área 1 produz impactos no barlavento do objeto de estudo. E promove o aumento do efeito de esteira, o que pode ser danoso à capacidade ventilativa urbana e também no âmbito da unidade habitacional.

Figura 67 - Corte C - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 68 - Corte C - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).



### 5.1.4 Súmula das simulações da região 1

A partir dos dados numéricos apresentados, bem como os perfis horizontais e verticais comparados de mesma grandeza, aponta-se as principais constatações encontradas a partir da verticalização da região 1:

- a) Ocorre um aumento da velocidade do ar, no nível do pedestre em função das verticalizações;
- b) Ocorre uma diminuição da capacidade ventilativa das edificações, imediatamente, no barlavento das verticalizações de 95 metros de altura;
- c) A recirculação de ar acima do nível do pedestre é promovida, potencialmente, diminuindo a qualidade do ar;
- d) A ZEPH promove a manutenção da velocidade do ar na região de praça, uma vez que não permite a construção de torres como as propostas neste trabalho.

### 5.2 REGIÃO 2 - VENTILAÇÃO

A região 2 está circunscrita entre a rua Helcio Nascimento, ao norte; a rua Vinte e Cinco de Março, a leste; a avenida Duque de Caxias, a sul e; a rua Assunção, a oeste. De acordo com a Legislação de Uso e Ocupação do Solo vigente (2017), esta região concentra uma porção da ZEDUS, encontrando também as seguintes zonas especiais circunscritas: ZEPH e ZPA. De forma a organizar os dados das simulações de ventilação posteriores, os pontos 1 a 18 foram estabelecidos para análise da velocidade do ar em cada cenário, conforme a figura 69.

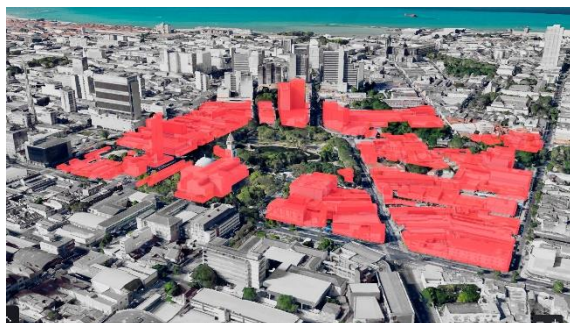
Figura 69 - Mapa de zonas especiais e pontos de análise - Região 2



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

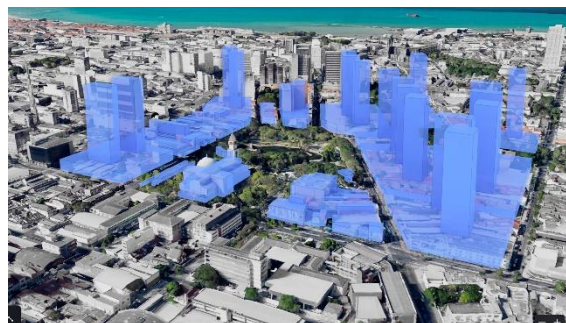
As figuras 70 e 71, ilustram a situação não verticalizada e a verticalizada, respectivamente. Assim, preserva-se a ZEPH conforme realizado na região 1 de análise e resguarda a ZPA de acordo com o art. 5 parágrafo I, onde prevê a área de preservação dos ecossistemas e recursos naturais.

Figura 70 - Volumetria Região 2 - Não verticalizado



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

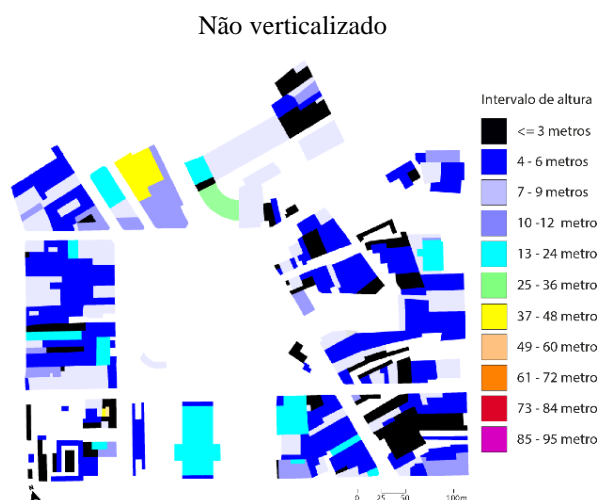
Figura 71 - Volumetria região 2 - Verticalizado



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

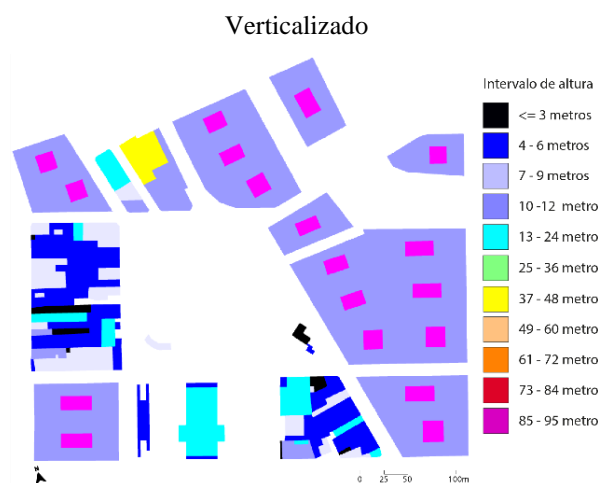
Para melhor caracterizar o objeto de estudo, as imagens 72 e 73 ilustram a altura das edificações da área antes e depois da verticalização proposta, respectivamente. A figura 72 elucida a maneira majoritária a presença de edificações menores que 6 metros de altura e uma edificação com 48 metros. A figura 73 aponta as quadras verticalizadas.

Figura 72 - Mapa alturas das edificações Região 2 -



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

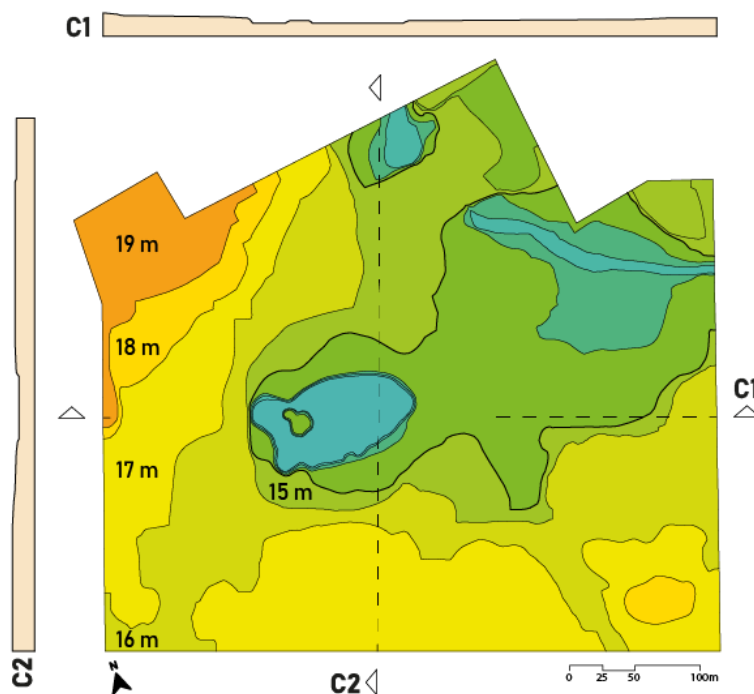
Figura 73 - Mapa alturas das edificações Região 2 -



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A topografia desta área (Figura 74) representa a maior variância em alturas das áreas estudadas, derivada em função dos corpos d'água e canalizações encontradas na região. Todavia, como é possível observar os perfis produzidos, essas diferenças de altura não são expressivas, portanto, considerou-se a topografia plana para as posteriores simulações.

Figura 74 - Mapa hipsométrico - Região 2

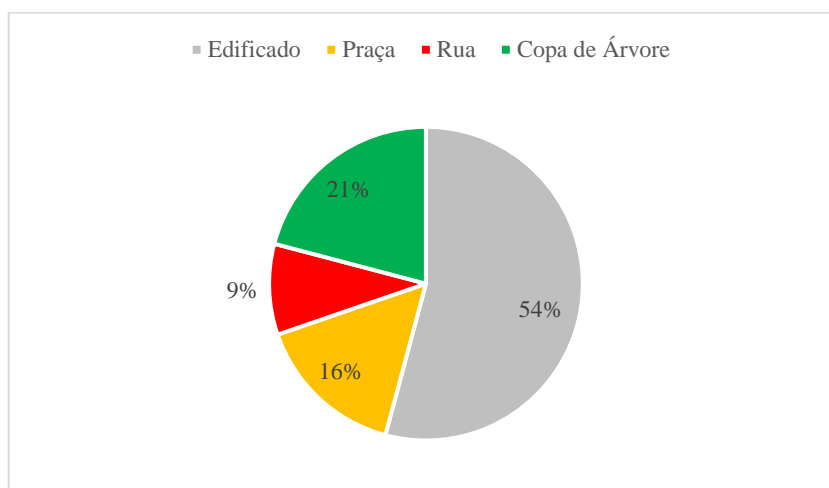


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Esta região detém em um total 170.598,90 m<sup>2</sup> e encontra-se nela duas ZPA, que compreendem a praça e o corpo d'água a nordeste. Comportando, assim, a maior área de copa

arbórea dos objetos de estudo com aproximadamente 35.660 m<sup>2</sup>, bem como em área de praça com 26.561 m<sup>2</sup>. Proporcionalmente, possui menores áreas de rua e edificações com 15.972 m<sup>2</sup> e 92.396,80 m<sup>2</sup>, respectivamente, conforme o gráfico 15:

Gráfico 15 - Discriminação das características morfológicas - Região 2

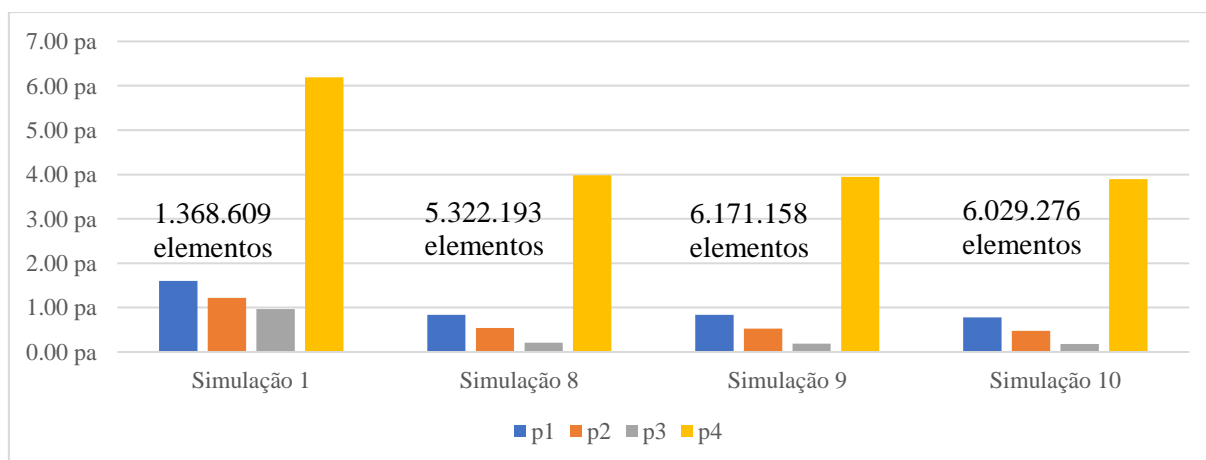


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### 5.2.1 Simulação ANSYS

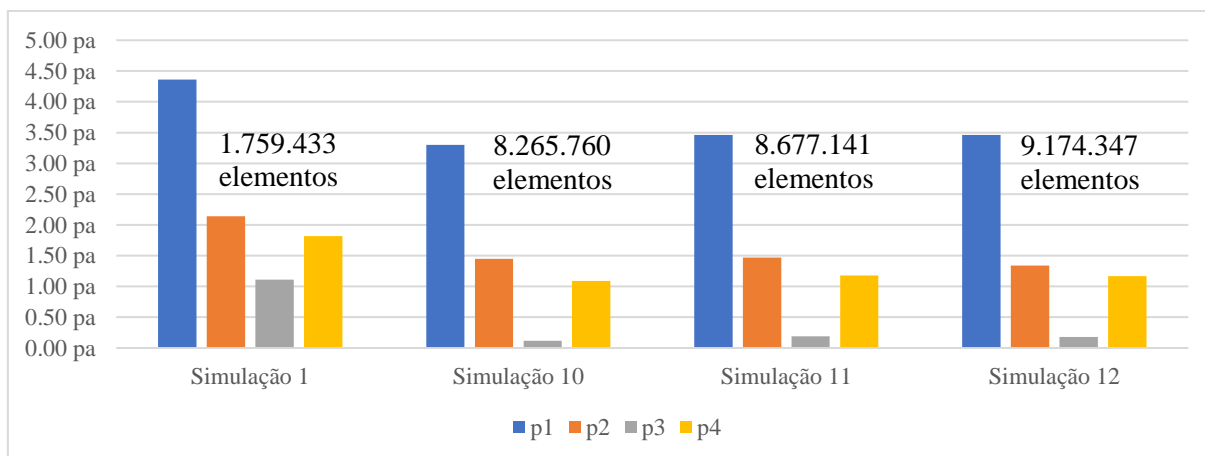
As simulações dos cenários 2 e 2.1 (Gráficos 16 e 17, respectivamente) com o software ANSYS, foram validadas a partir do teste de independência de malha, resíduos e os valores da qualidade ortogonal e assimetria. Os gráficos apresentam uma constância menor que 10% entre valores de pressão, simulados em pontos aleatórios nas simulações 8, 9 e 10 e 10, 11 e 12, respectivamente.

Gráfico 16 - Teste independência de malha área 3 - Não verticalizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 17 - Teste independência de malha área 3 - Verticalizado



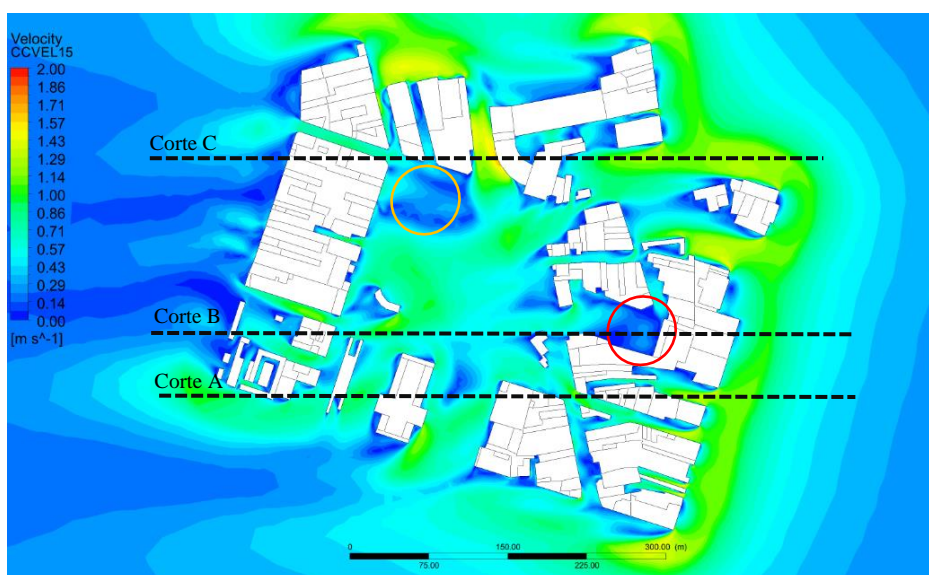
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### 5.2.2 Cenário ventilação Leste

É apresentado de maneira comparativa, neste item as simulações do cenário 2 e 2.1 com a ventilação no sentido leste-oeste, a partir de visualizações em plantas e cortes. O objetivo é encontrar as possíveis modificações aerodinâmicas em função da modificação da capacidade construtiva da área.

A figura 75 representa a possível ventilação na área 2 de análise. Identifica-se, no círculo vermelho, região onde as construções produzem o efeito de recirculação de ar e dificultam a penetração do vento. No círculo laranja está apontada a região com menor velocidade do ar produzida pelos fluxos provocados pela morfologia das edificações no sotavento. Todavia, de maneira geral, as ruas ortogonais nesta região e a área correspondente a praça possui velocidades do ar acima de 0.50 m/s.

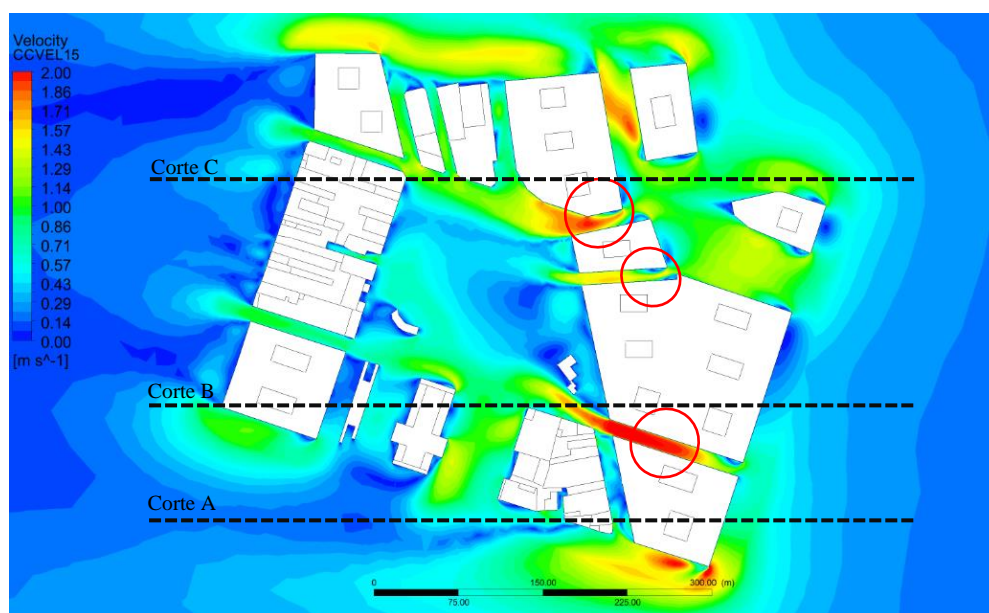
Figura 75 - Simulação fluidodinâmica sentido leste, 1.5 metros, região 2 - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

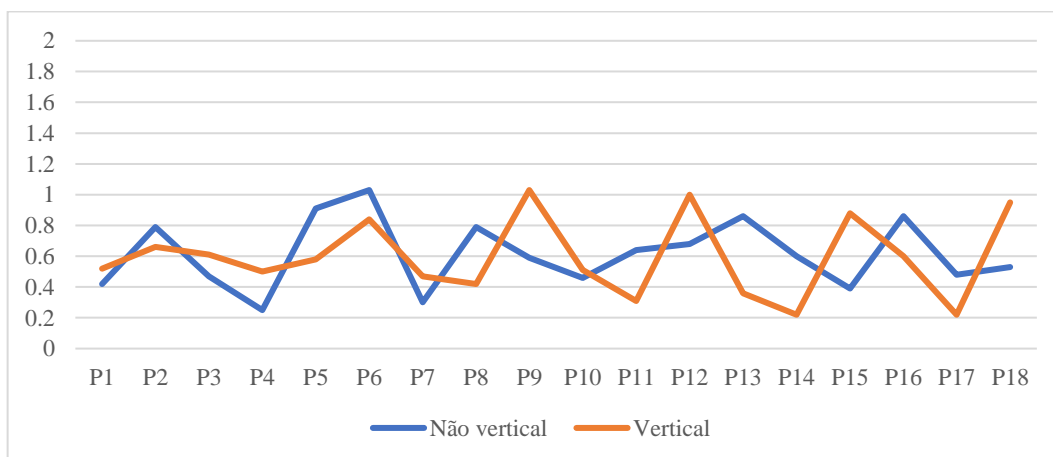
Em situação verticalizada (Figura 76), nota-se um aumento da velocidade do ar nas ruas no sotavento (no círculo vermelho), promovidas pelas canalizações e o efeito Venturi, uma vez que se diminui a área do cânion urbano em consequência da base das edificações. Em função da verticalização proposta, a velocidade do ar na área correspondente à praça é mitigada para valores médios menores que 0.50 m/s, o que representa um possível empecilho para a percepção da circulação de ar no usuário em velocidades menores que 0.25 m/s (AULUCIEMS; SZOKOLAY, 2007). Essa diminuição da potência do ar pode ser observada a partir do gráfico 18, em azul, em cenário não verticalizado que aponta velocidades com menores amplitudes em comparação ao cenário verticalizado, onde percebe-se picos de velocidade em função da aceleração provocada pela canalização do fluxo de ar nos eixos carroçiais.

Figura 76 - Simulação fluidodinâmica sentido leste, 1,5 metros, região 2 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

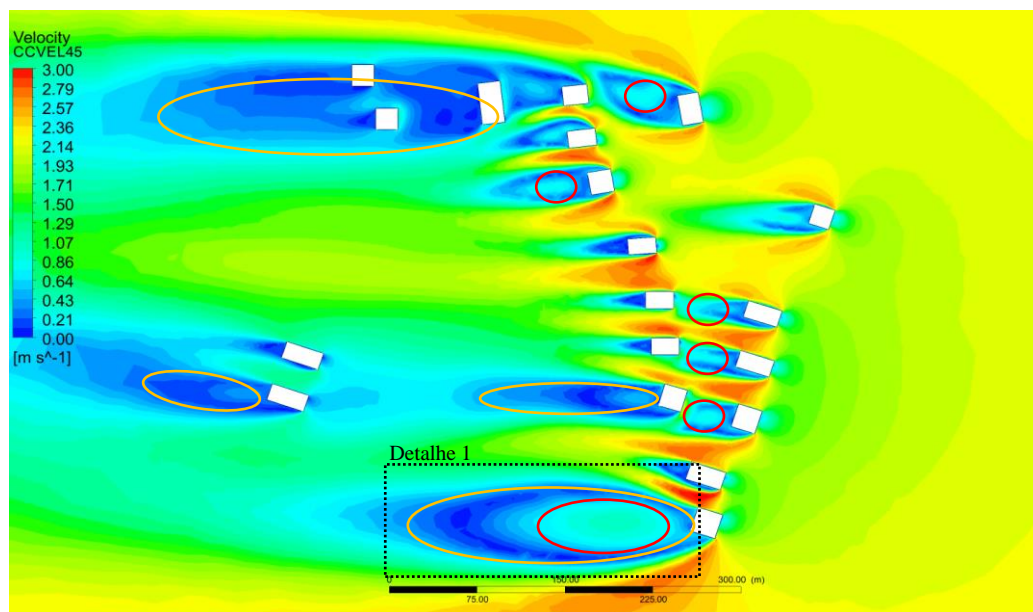
Gráfico 18 - Comparação velocidades do ar - Cenário 2 e 2.1 Leste



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Não se inseriu a simulação representando a velocidade a 45 metros de altura em situação não verticalizada por não haver modificações aerodinâmicas relevantes, uma vez que só existem duas edificações com este gabarito. Entretanto, na figura 77, este plano em situação verticalizada ilustra como a inércia produzida pelos anteparos verticais promovem a criação de regiões de recirculação de ar no barlavento das edificações (no círculo vermelho), bem como a produção de efeitos esteira (no círculo laranja) que refletem na diminuição da velocidade do ar no nível do pedestre.

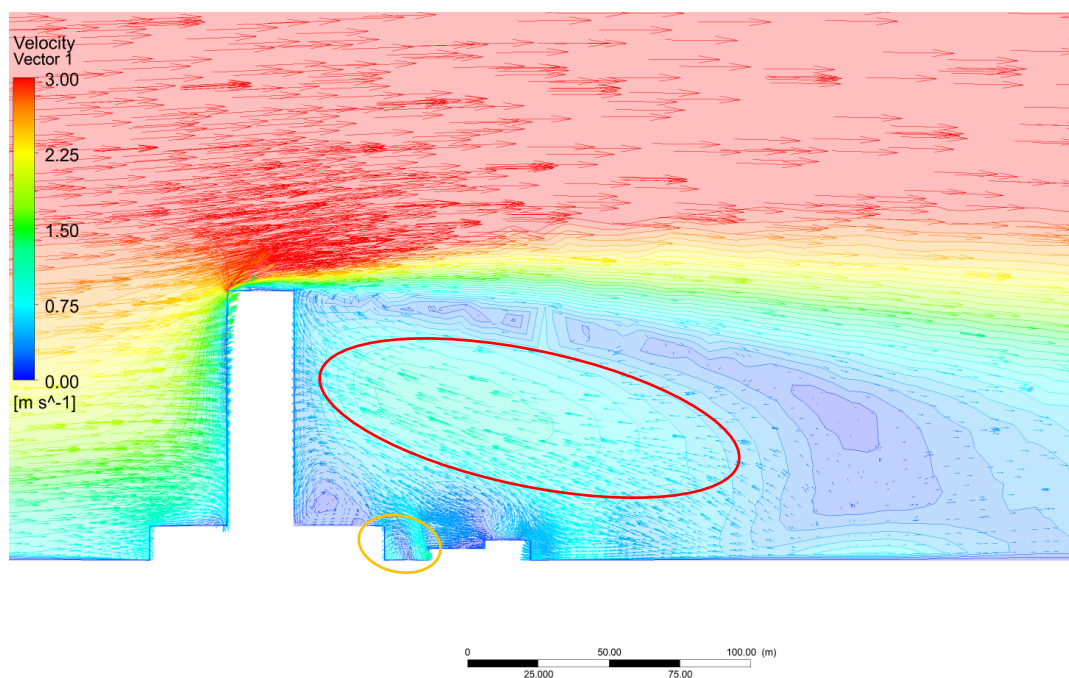
Figura 77 - Simulação fluidodinâmica sentido leste, 45 metros, região 2 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

O detalhe 1 representa os vetores do vento em setas de cores distintas conforme a escala da figura 78. Deste modo, percebe-se a região de recirculação de ar dentro da região de esteira observada na figura anterior. No círculo vermelho, tem-se a zona de recirculação do ar acima do nível do pedestre e, no círculo laranja o mesmo efeito no interior do cânion urbano.

Figura 78 - Detalhe 1 - Verticalizado

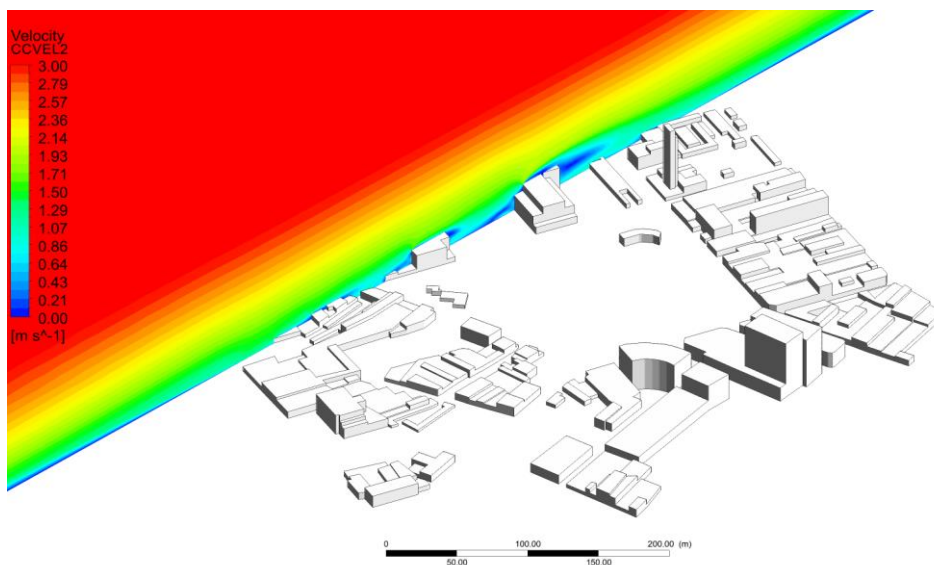


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).



O corte da figura 79, em situação não verticalizada, não infere qualquer efeito aerodinâmico pertinente. O que demonstra como a verticalização desta região não impacta na modificação da camada limite intraurbana.

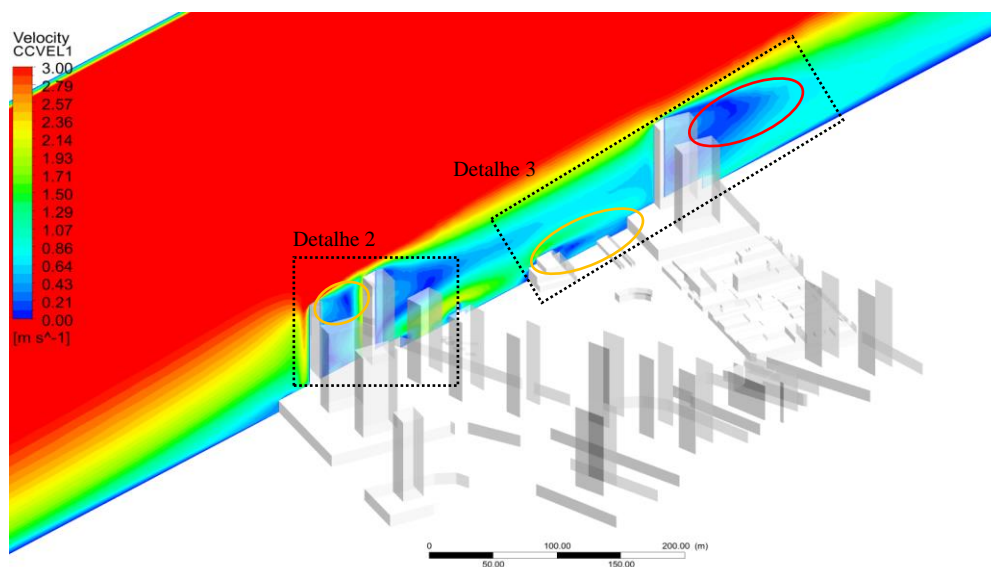
Figura 79 - Corte A - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Porém, o mesmo corte considerando a verticalização proposta, encontra-se efeitos como o de recirculação de ar (no círculo laranja) e o de esteira (no círculo vermelho), diminuindo a qualidade ventilativa no barlavento do modelo. Além disso, prejudicando a capacidade ventilativa das edificações imediatamente no barlavento das verticalizações de 95 metros, criando zonas de recirculação de ar acima do nível do pedestre.

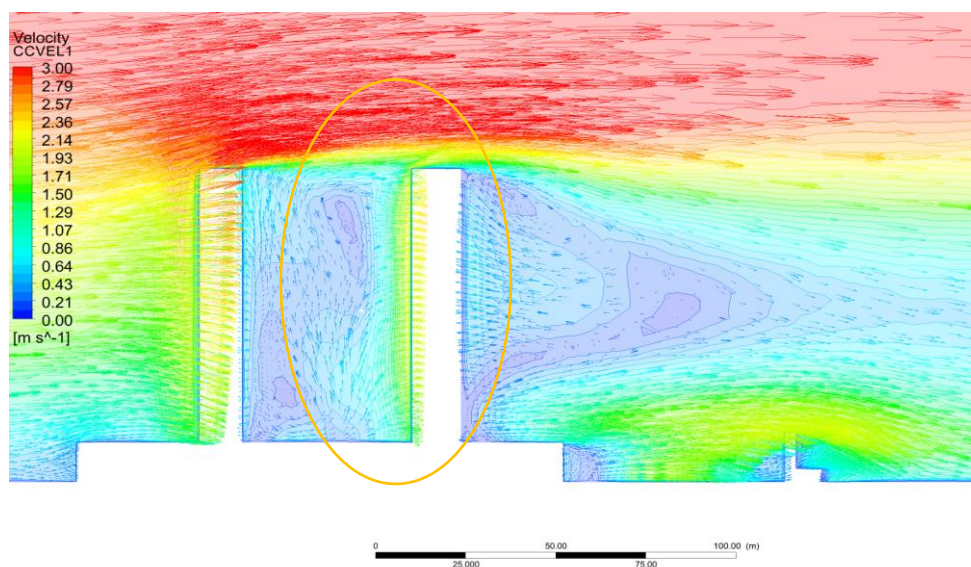
Figura 80 - Corte B - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

O detalhe 2 (Figura 82) demonstra o efeito de recirculação de ar (no círculo laranja) entre duas edificações de mesmo porte, potencialmente diminuindo a qualidade do ar nessa região, bem como mitigando a capacidade de ventilação natural do edifício no barlavento.

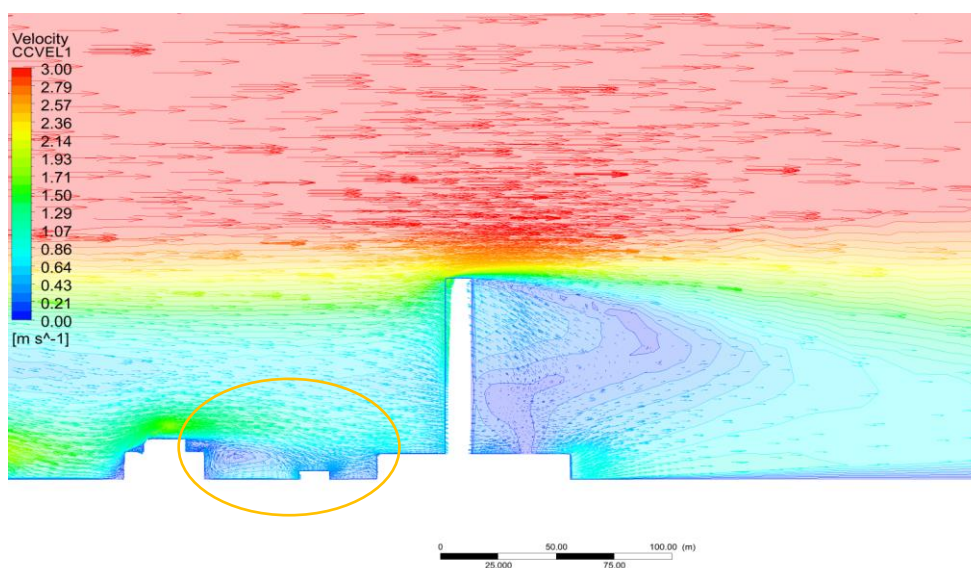
Figura 81 - Detalhe 2 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

No nível do cânion urbano (Figura 83), os anteparos também produzem este mesmo efeito por rebatimento do ar em função do tamanho do obstáculo, como demonstrado no círculo laranja a seguir. No barlavento, neste corte específico, nota-se uma região de esteira de menor dimensão em razão da distância entre as edificações propostas.

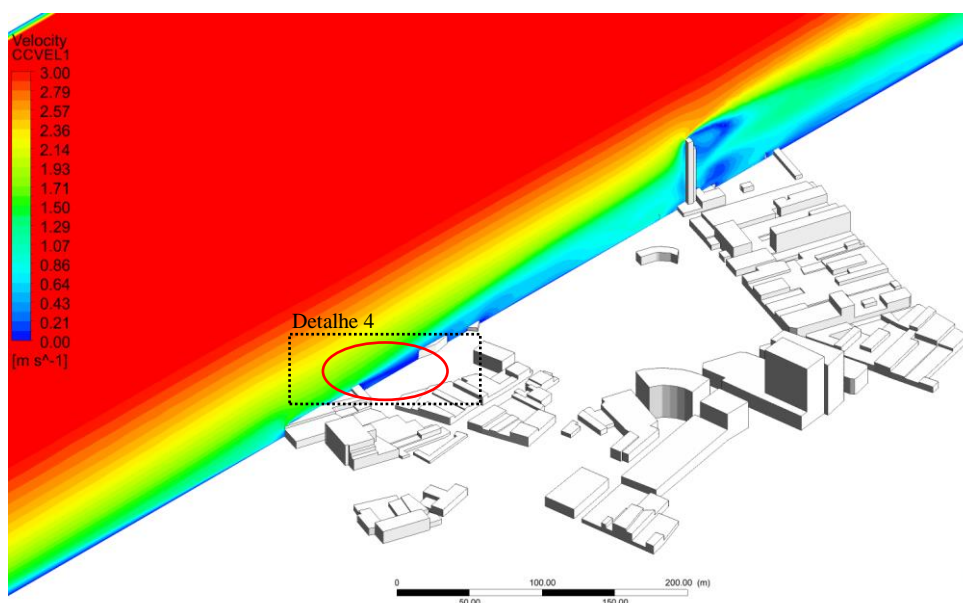
Figura 82 - Detalhe 3 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

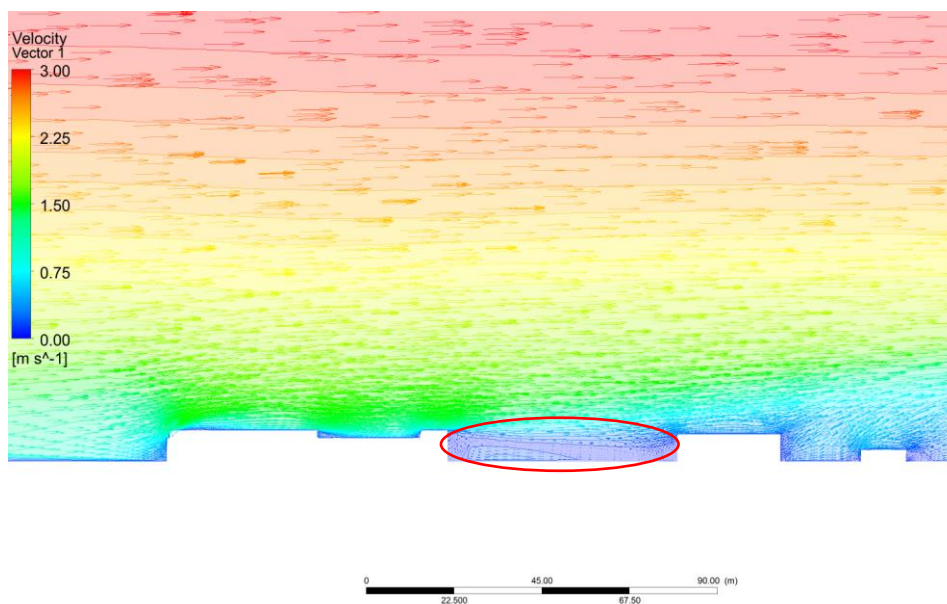
A Figura 84 ilustra como as obstruções criam regiões de estagnação de ar como indicado no círculo vermelho, bem como no impacto no barlavento da construção atual de maior altura na região. Esta região de estagnação de ar é formada em função do espaçamento entre as edificações (Figura 85), significando que a essa distância não é suficiente para a normalização do sentido do vento. Além disso, o fechamento a sul e ausência de vazão de ar a Norte impossibilita a ventilação efetiva deste lote, produzindo, assim, uma região com menores taxas de renovação de ar (no círculo vermelho).

Figura 83 - Corte B - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

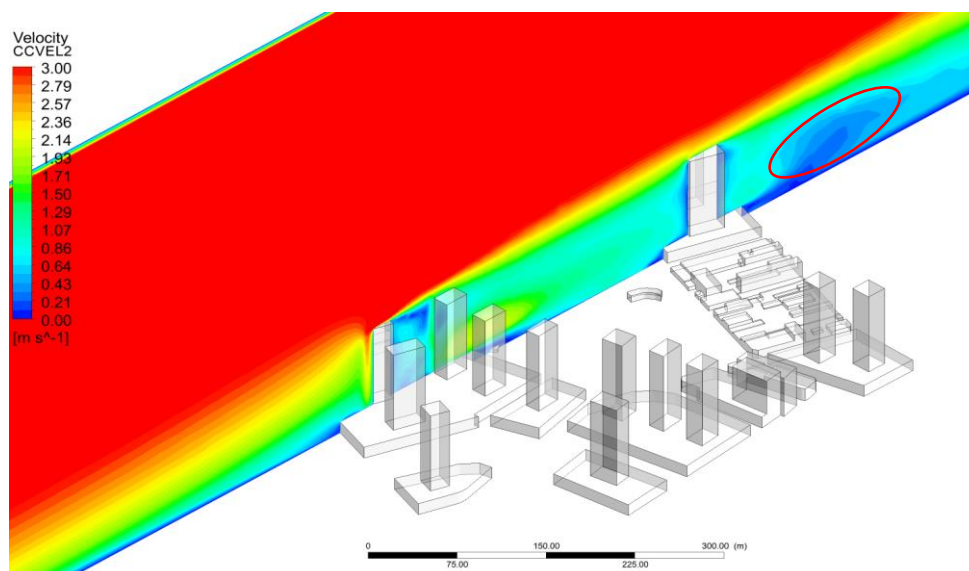
Figura 84 - Detalhe 4 - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Ainda no mesmo espaço, mas em cenário verticalizado (Figura 85), as novas edificações promovem a diminuição da velocidade do ar na praça, produzindo zonas de recirculação de ar entre as edificações e regiões de esteira no barlavento do modelo (no círculo vermelho).

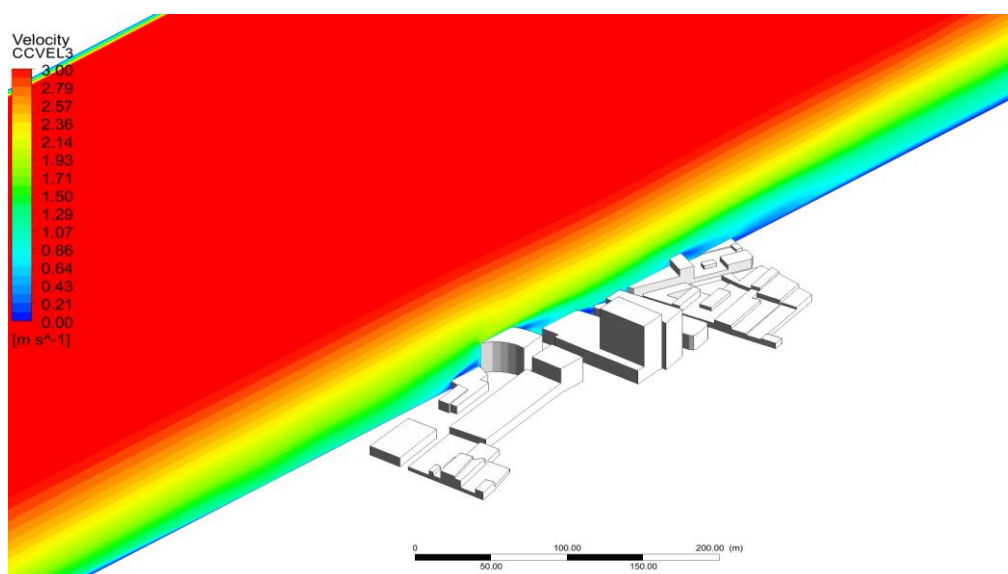
Figura 85 - Corte B - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A norte em relação a praça da Liberdade, em região não verticalizada (Figura 86), infere-se que a rugosidade do local pouco interfere na modificação da camada intraurbana, bem como efeitos aerodinâmicos pertinentes a qualquer altura em relação ao solo.

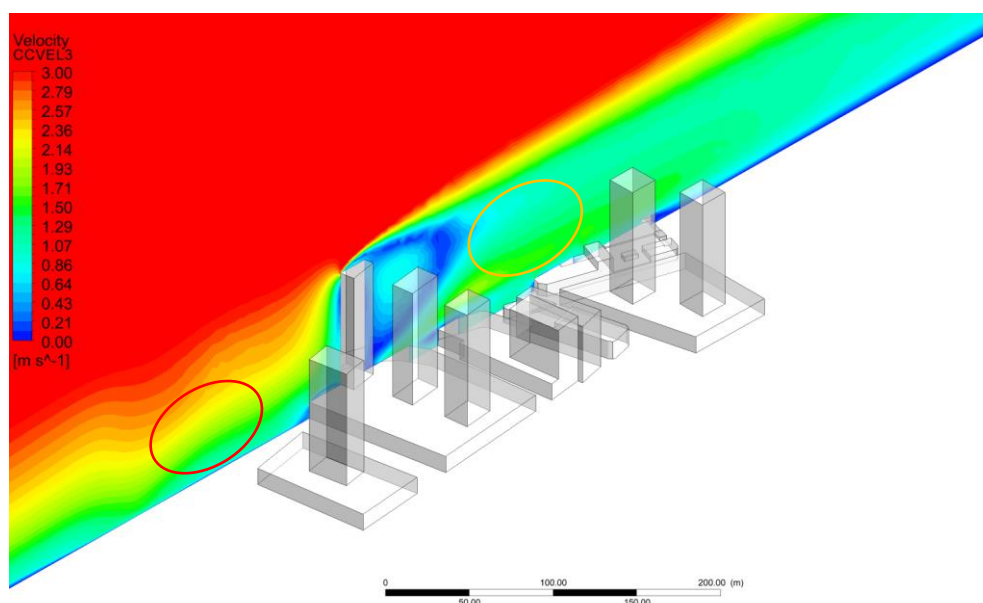
Figura 86 - Corte C - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Todavia, ao analisar o mesmo plano em situação verticalizada (Figura 87), constata-se que a ZPA (no círculo vermelho) e ZEPH (no círculo laranja) detêm um importante papel na manutenção da velocidade do ar e na modificação da camada intraurbana da região. Uma vez que a impossibilidade de verticalização no sotavento e no barlavento mitiga a intensificação de modificações aerodinâmicas indesejadas como, a estagnação do ar por meio do efeito esteira, produção de região de baixa circulação de ar ou recirculação de ar e a diminuição da contribuição de ventilação natural no interior de unidades habitacionais.

Figura 87 - Corte C - Verticalizado



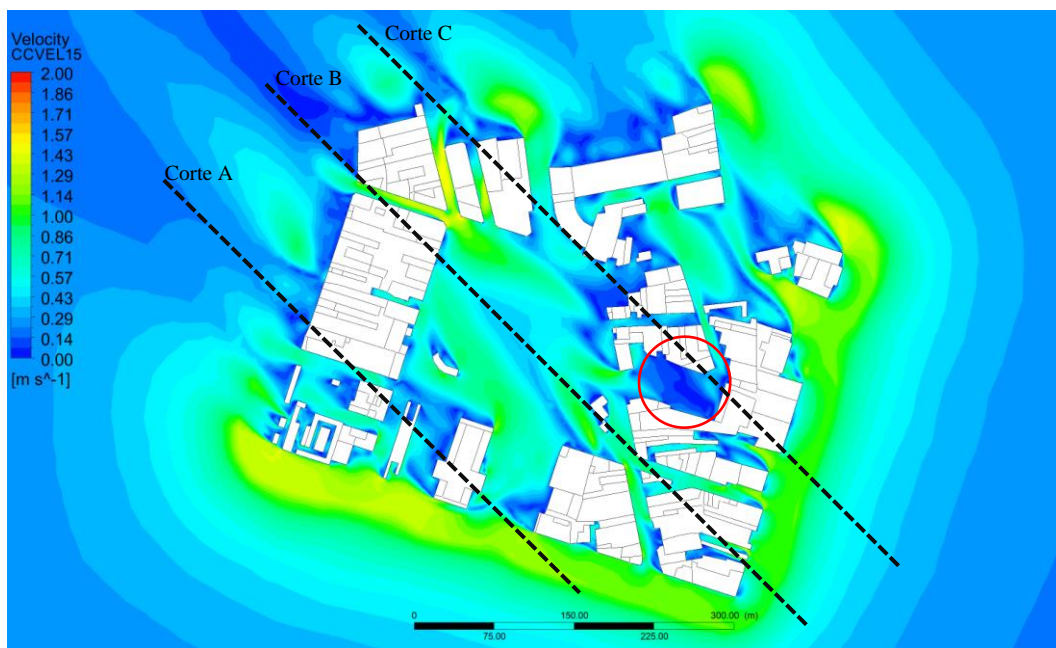
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

### 5.2.3 Cenário ventilação Sudeste

É apresentado de maneira comparativa neste item as simulações do cenário 2 e 2.1 com a ventilação no sentido Sudeste-Noroeste, a partir de visualizações em plantas e cortes. O objetivo é encontrar as possíveis modificações aerodinâmicas em função da modificação da capacidade construtiva da área.

O cenário 2 com ventilação Sudeste, apresenta o mesmo espaço de estagnação de ar (no círculo vermelho) apresentado com a ventilação Leste, como ilustrado na figura 88. Os arruamentos exibem velocidades do ar acima de 1.00 m/s. Todavia, nota-se uma diminuição da movimentação de ar no interior da praça, uma vez que neste sentido predominante as construções empregam uma maior área de obstruções.

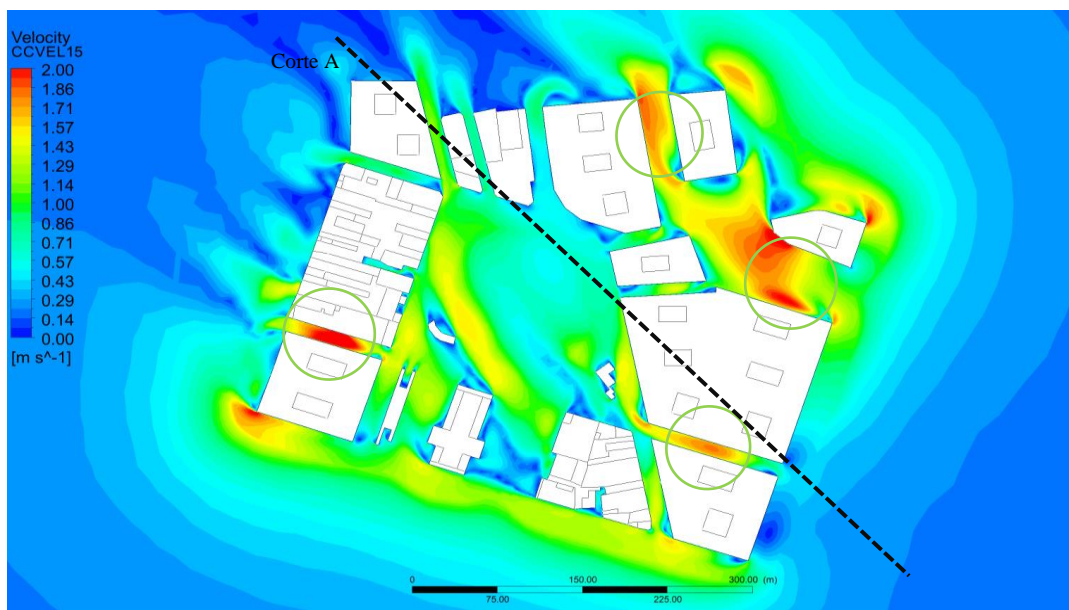
Figura 88 - Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 1.5 metros - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

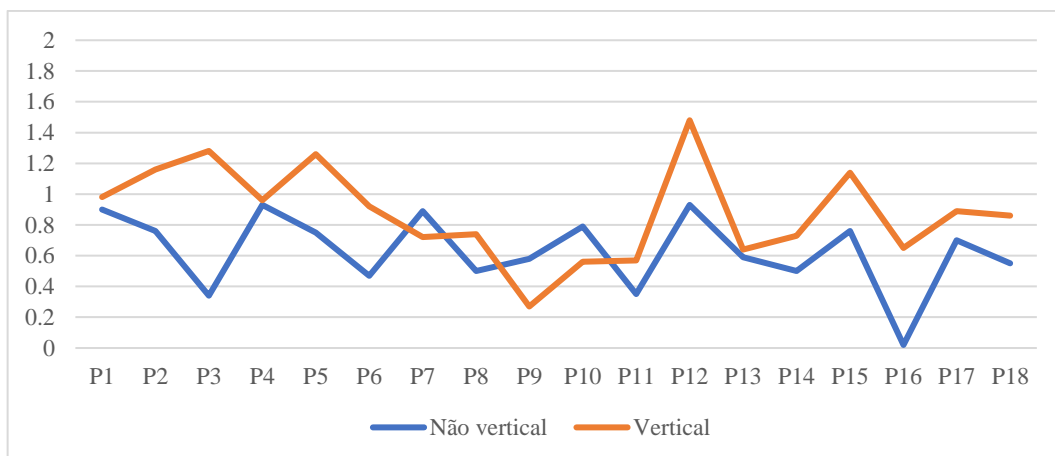
O cenário 2.1 Sudeste (Figura 89) demonstra o aumento da movimentação do ar através do efeito Venturi (no círculo verde). Com isso, as velocidades médias em todo o cenário são potencializadas no nível do pedestre. O gráfico 19 demonstra o aumento no cenário verticalizado (em laranja), com o não verticalizado (em azul).

Figura 89 - Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 1.5 metros - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

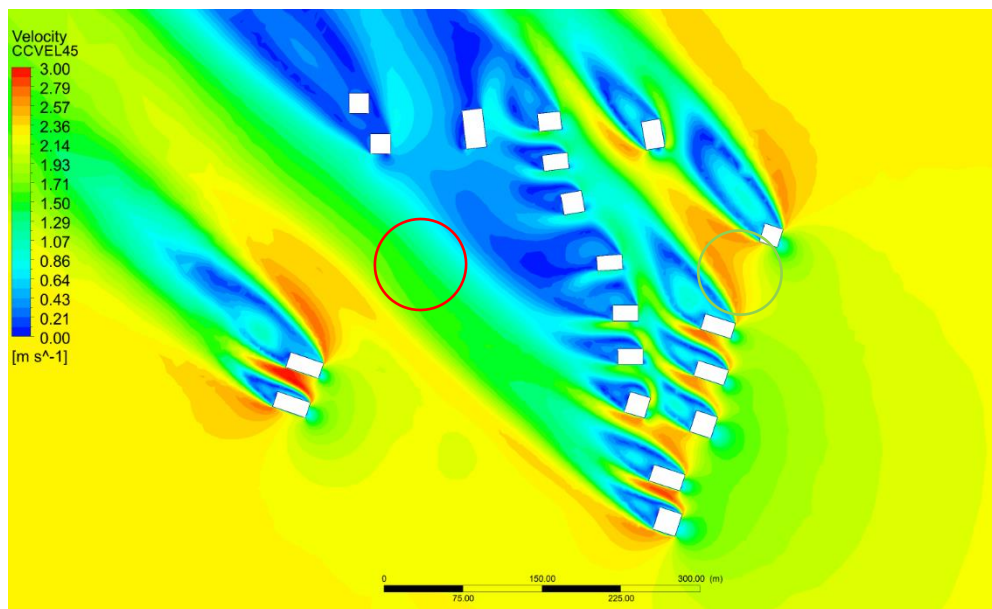
Gráfico 19 - Comparação velocidades do ar - Cenário 2 e 2.1 Sudeste



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Contudo, neste mesmo cenário a 45 metros de altura (Figura 90), a verticalização proposta promoveu a criação de grandes áreas de esteira, mitigando a salubridade do ar e capacidade ventilativa no barlavento do modelo. Nota-se, que nas zonas de ZPA (no círculo verde) e ZEPH (no círculo vermelho) a velocidade do ar é acelerada em função das verticalizações adjacentes.

Figura 90 - Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste-Noroeste, 45 metros - Verticalizado

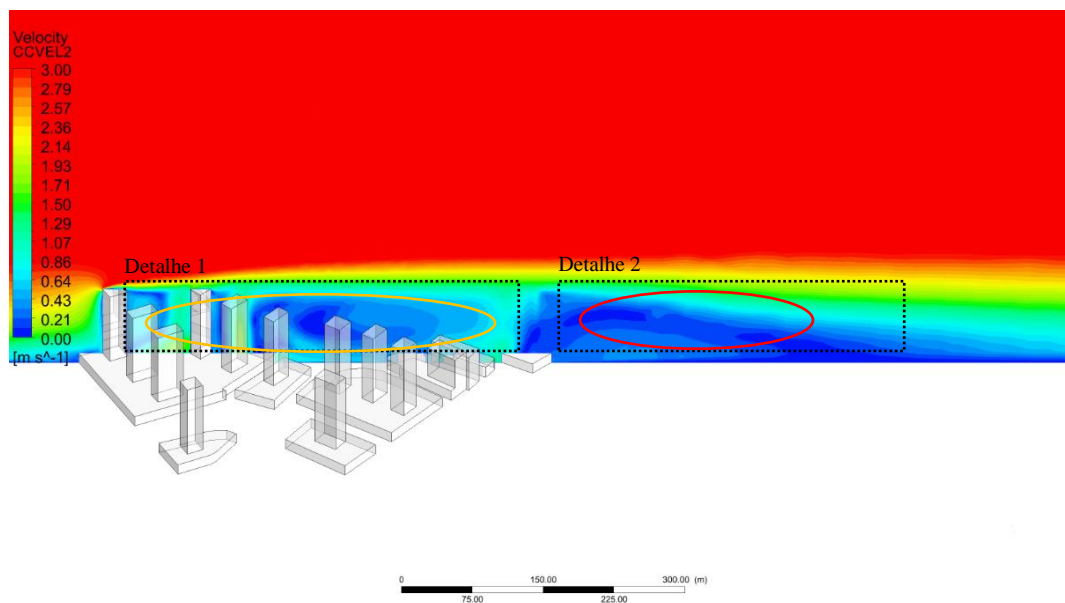


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

O cenário 2, com ventilação à Sudeste, não produziu efeitos relevantes de modificação da camada limite intraurbana. Porém, a seção apresentada na figura 91, denota como a verticalização e a ausência de áreas de proteção produziram efeitos e recirculação de ar (no círculo laranja) e o aumento de regiões de esteira no barlavento do modelo. Em amarelo, além

da recirculação de ar entre as edificações propostas, observa-se este mesmo efeito acima do nível do pedestre, mitigando a qualidade ar urbano.

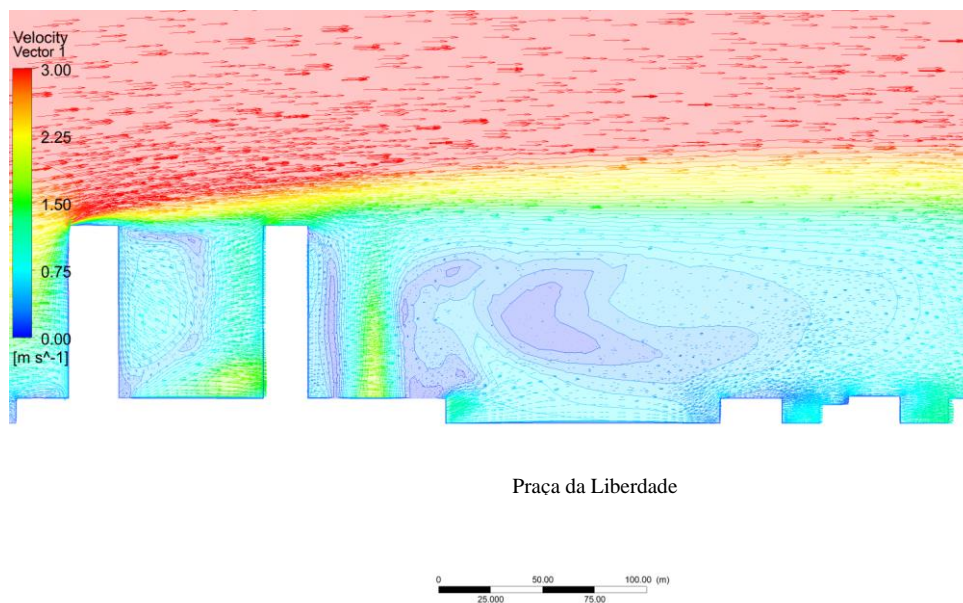
Figura 91 - Corte A - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A figura 92 revela em detalhes os efeitos supracitados. Essa diminuição da velocidade do ar pode acarretar aumentos de temperatura do ar e intensificações dos efeitos da ilha de calor, uma vez que mitiga a capacidade de trocas convectivas entre superfície e o ar. Além disso, permite que particulados suspensos no ar não sejam dispersados de maneira efetiva.

Figura 92 - Detalhe 1 - Verticalizado

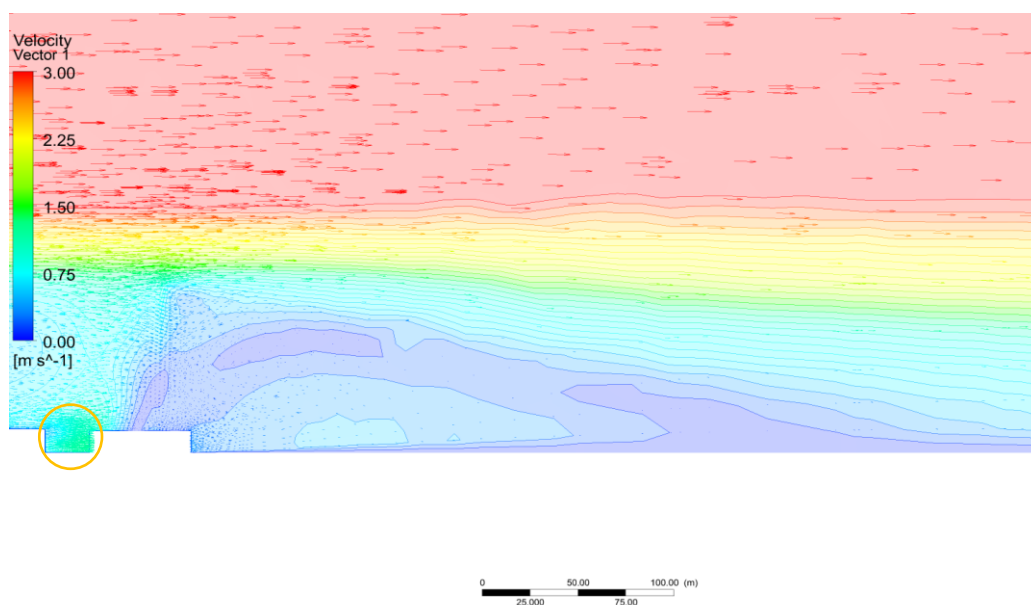


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).



Mesmo com o distanciamento provocado pela praça, figura 93, ilustra como o raio de impacto dos distúrbios aerodinâmicos causados pela verticalização excedem, de maneira acumulativa, 500 metros de comprimento no barlavento, interferindo no balanço térmico e na dispersão de particulados suspensos no ar. Além do aspecto urbano, no círculo laranja, observa-se o cânion urbano, não ortogonal, a partir do efeito rebote provocado pela edificação proposta, potencializando a velocidade do ar no nível do pedestre, combinando efeitos de canalização e Venturi.

Figura 93 - Detalhe 2 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

#### 5.2.4 Símula das simulações da região 2

A partir dos dados numéricos apresentados, bem como os perfis horizontais e verticais comparados de mesma grandeza, aponta-se as principais constatações encontradas a partir da verticalização da região 2:

- Um Aumento expressivo da velocidade do ar no nível do pedestre nos cânions urbanos circunscritos as verticalizações propostas;
- Recirculação de ar acima do nível do pedestre nas áreas de cânion urbano e imediatamente acima da região de praça e entre edificações, potencialmente diminuindo a qualidade do ar;
- Um aumento das áreas de obstrução provocadas pelo sentido do vento (Sudeste), criando expressivos efeitos de recirculação de ar e esteira no barlavento. Em contrapartida, na ventilação Leste estes mesmos fenômenos são atenuados;

- d) Um impacto positivo com as ZEPH e ZPA, mitigando o efeito esteira e as recirculações de ar acima e no nível do pedestre. Entretanto, quando considerada a ventilação Sudeste, estas áreas não possuem expressivos resultados.

### 5.3 REGIÃO 3 - VENTILAÇÃO

A área de estudo 3 tem a seguinte delimitação: Rua Pedro Pereira, a norte; Rua Senador Pompeu, a leste; Avenida Duque de Caxias, a sul e; Avenida Tristão Gonçalves, a oeste. Estas ruas são caracterizadas por serem importantes vias comerciais na região, com intenso fluxo de pedestres. De forma a organizar os dados das simulações de ventilação posteriores, os pontos 1 a 18 foram estabelecidos para análise da velocidade do ar em cada cenário, conforme a figura 94.

Figura 94 - Mapa de zonas especiais e pontos de análise - Região 3



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

As figuras 95 e 96 apresentam uma visão superior da região 3, elucidando que se constitui de edificações baixas, majoritariamente, com telhados de cerâmicos e com uma edificação de maior porte (tipologia mista de serviços e residências). A figura 96, por sua vez, ilustra a capacidade construtiva máxima proposta Baseado em lei de Uso e Ocupação do Solo (2017) a partir do cenário proposto neste trabalho. Neste cenário específico, esta região não

possui zonas de preservação, portanto, possibilitando a verticalização total de todas as quadras circunscritas.

Figura 95 - Volumetria Região 2 - Não verticalizado



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

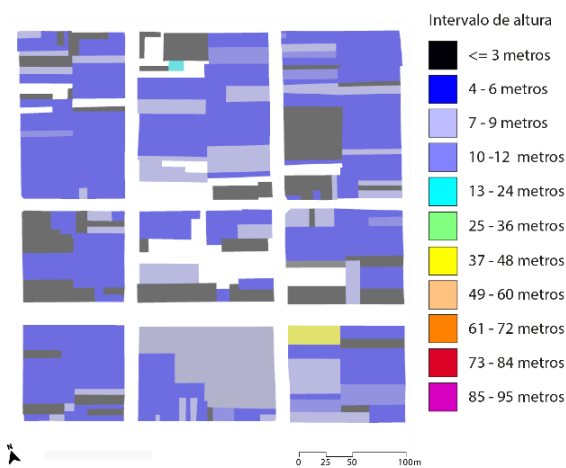
Figura 96 - Volumetria Região 2 –Verticalizado



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020)

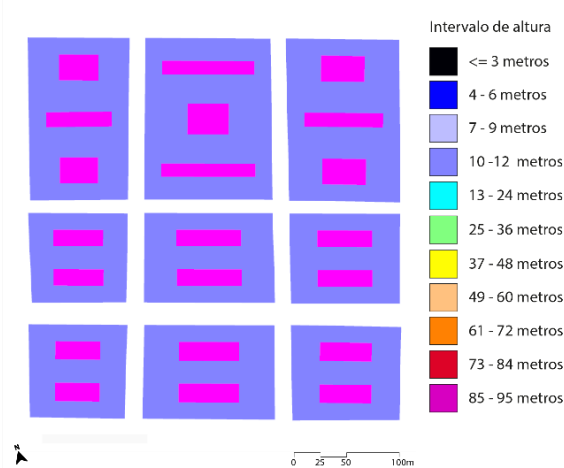
De maneira mais específica, as figuras 97 e 98 caracterizam as alturas das edificações desta área. Em cenário não verticalizado (Figura 97), as edificações possuem majoritariamente alturas com até 6 metros de altura e baixa rugosidade. Já no cenário verticalizado, aponta-se a modificação total da morfologia urbana desta área, incluindo aumento do espaçamento entre edificações e eixos carroçiais como elucidado na figura 98.

Figura 97 - Mapa alturas das edificações Região 3 - Não verticalizado



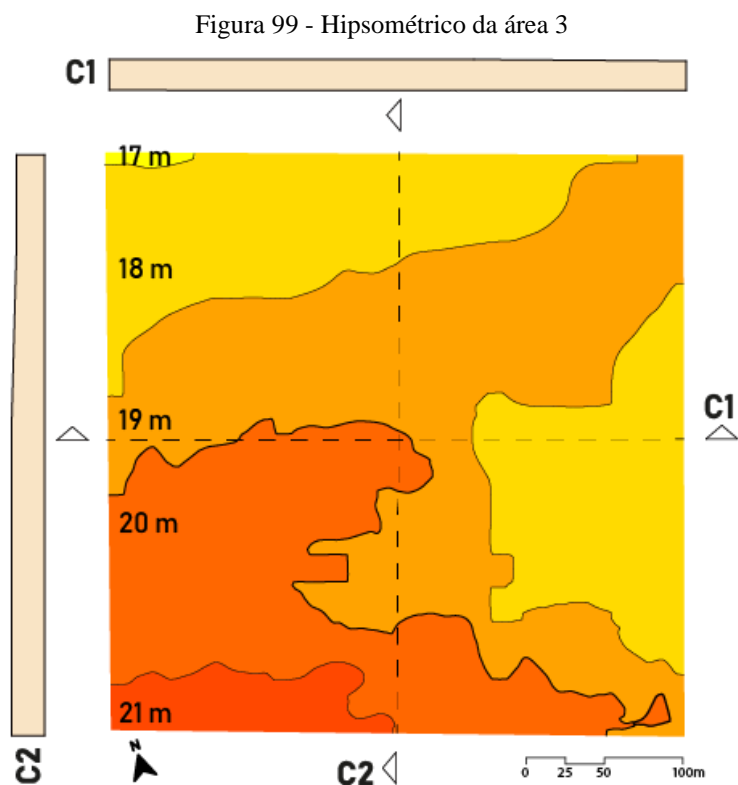
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 98 - Mapa alturas das edificações Região 2 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

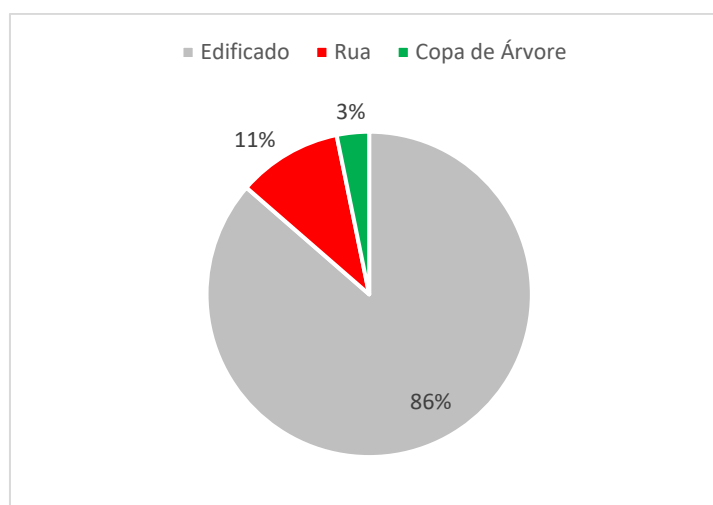
A figura 99 apresenta o mapa hipsométrico da região 3. Observa-se que a região não possui topografia acidentada, tendo até 3 metros de altura de diferença no terreno ao logo de 370 metros. Portanto, como forma de simplificação da forma modelada, considerou-se o plano para as simulações a seguir.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A partir da imagem de satélite e das visitas em campo, estimou-se uma área total de 133.218 m<sup>2</sup>, onde: 13.160 m<sup>2</sup> são de revestimento asfáltico, aproximadamente 109.382 m<sup>2</sup> são de área para construção e 4.070 m<sup>2</sup> são de cobertura arbórea e ausência de áreas de praça. O gráfico 20 demonstra a caracterização superficial desta região, que dentre as áreas analisadas, é a que se apresenta com a maior capacidade construtiva, menor área de cobertura vegetal e ausências de áreas de praça.

Gráfico 20 - Discriminação das características morfológicas - Região 3

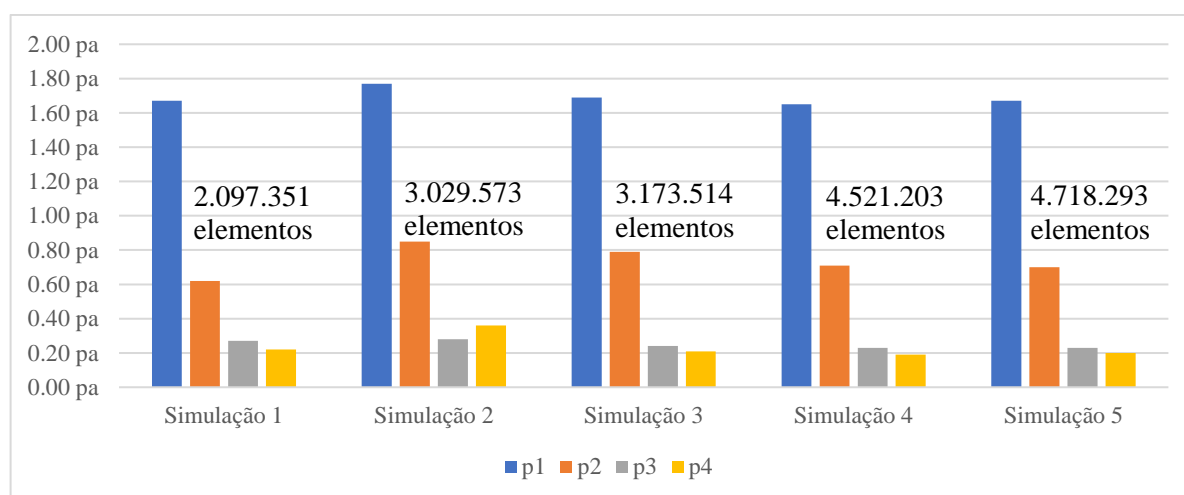


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### 5.3.1 Simulação ANSYS

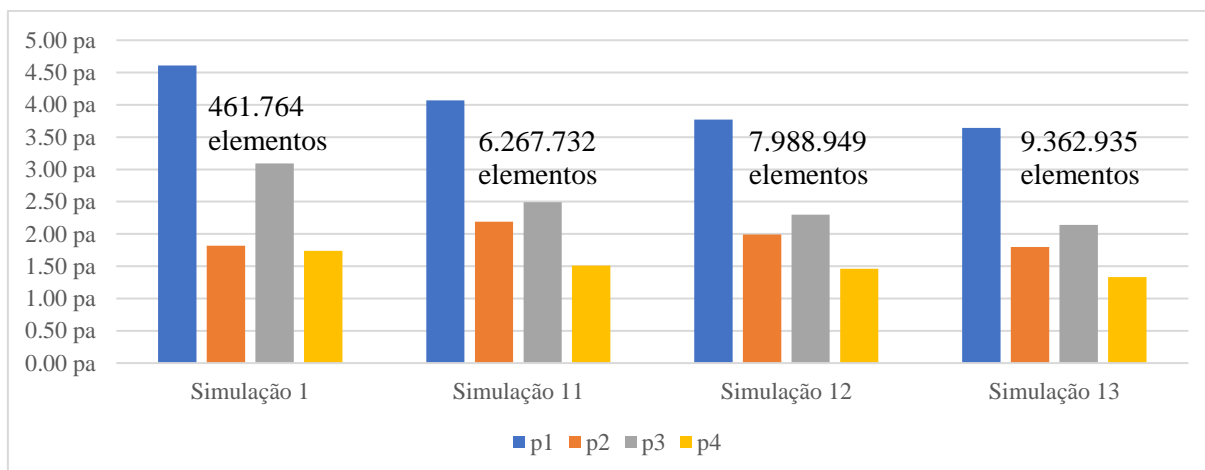
As simulações dos cenários 3 e 3.1 com o *software* ANSYS foram validadas a partir do teste de independência de malha, resíduos e os valores da qualidade ortogonal e assimetria. O gráfico 21 e 22 apresentam o teste de independência de malha em cenário não verticalizado e verticalizado, respectivamente, indicando uma constância menor que 10% entre valores de pressão em 4 pontos distintos no interior dos modelos simulados.

Gráfico 21 - Teste independência de malha área 3 - Não verticalizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 22 - Teste independência de malha área 2 - Verticalizado



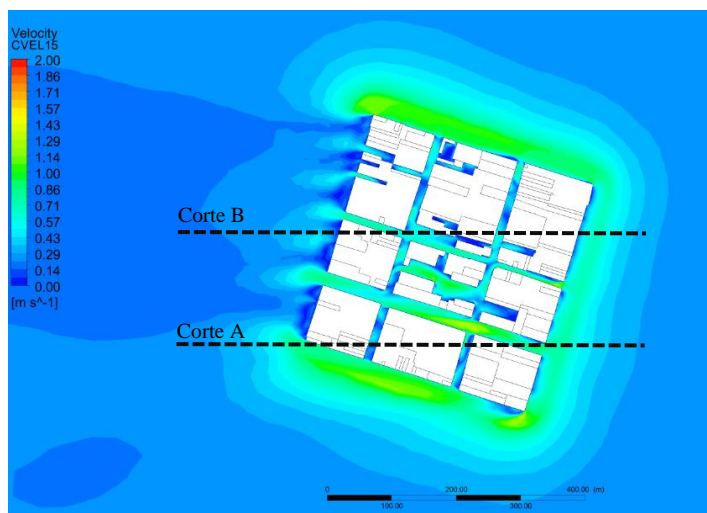
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### 5.3.2 Cenário ventilação Leste

É apresentado de maneira comparativa neste item as simulações do cenário 3 e 3.1 com a ventilação no sentido leste-oeste, a partir de visualizações em plantas e cortes. O objetivo é encontrar as possíveis modificações aerodinâmicas em função da modificação da capacidade construtiva da área.

O fluxo no sentido leste aponta velocidades maiores no leito carroçável do sentido leste a oeste a 1,5 metros do solo (Figura 100). Este efeito ocorre em função da capacidade das edificações canalizarem o vento nestas regiões e, a diminuição da área por onde o ar está permeando. No sotavento, em função do baixo gabarito das edificações encontradas nesta região, a área de esteira é menor, contribuindo para uma melhor distribuição da ventilação urbana para as demais áreas da cidade. Os cânions urbanos perpendiculares ao sentido do vento, como esperado, apresentam velocidade menores próximas a estagnação (0 m/s).

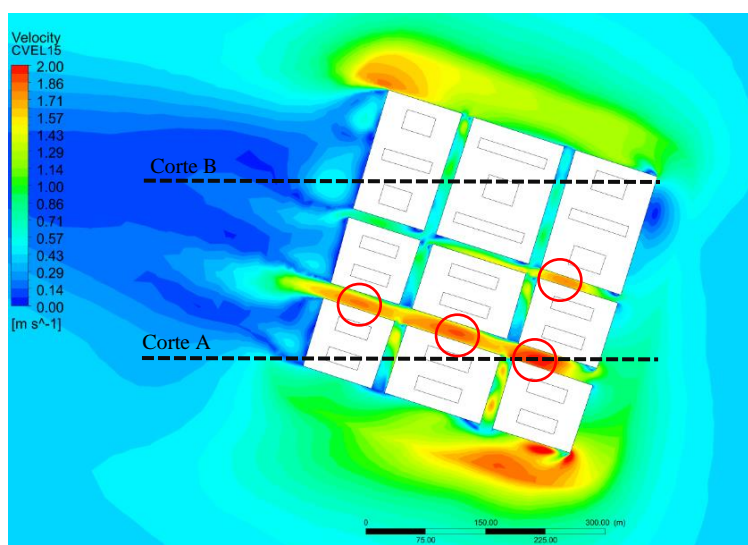
Figura 100 - Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1,5 metros, região 3 - Não verticalizada



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

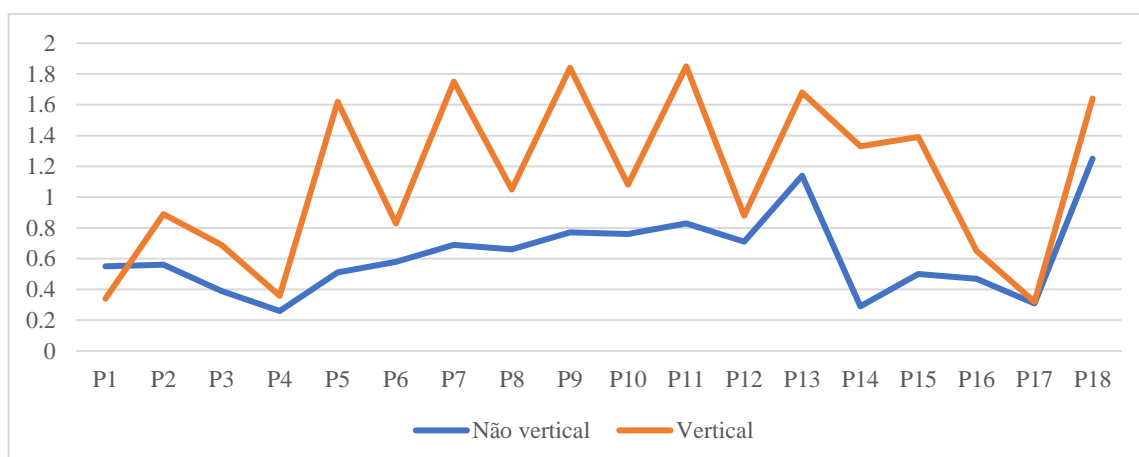
De forma previsível, em cenário verticalizado (Figura 101) ocorre um aumento da velocidade do ar a valores superiores a 2 m/s (no círculo vermelho). Este incremento se dá em função das construções possuírem uma altura superior a anterior. Além disso, dentro desta conformação de cânion, as geometrias analisadas se tornam mais competentes à condução e aumento da velocidade do ar. Nos eixos de ruas perpendiculares ao fluxo de vento, houve um aumento significativo no fluxo de ar, uma vez que os espaçamentos entre construções foram distanciadas e em função também do aumento da pressão do ar nos eixos leste-oeste. O gráfico 22 ilustra este aumento substancial a partir da análise gráfica e numérica dos pontos elencados nesta simulação.

Figura 101 - Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1,5 metros, região 3 - Verticalizada



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

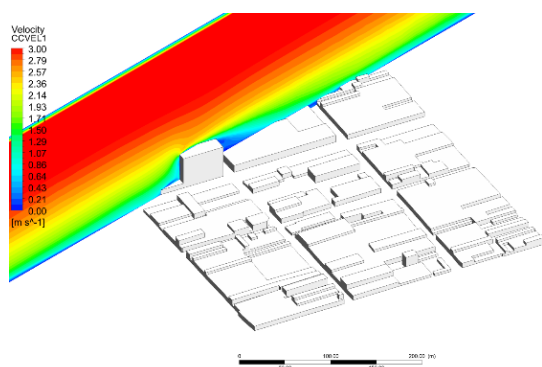
Gráfico 23 - Comparação velocidades do ar - Cenário 3 e 3.1 Leste



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

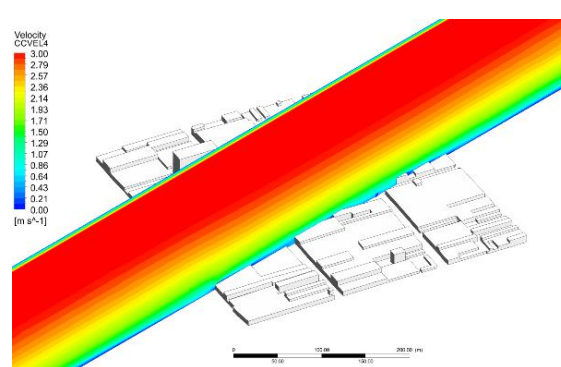
O cenário 3, por seu baixo gabarito e rugosidade, não apresenta modificações aerodinâmicas significativas. As figuras 102 e 103 ilustram cortes no sentido do vento, que atestam a baixa modificação na camada limite intraurbana.

Figura 102 - Corte A - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 103 - Corte B - Não verticalizado

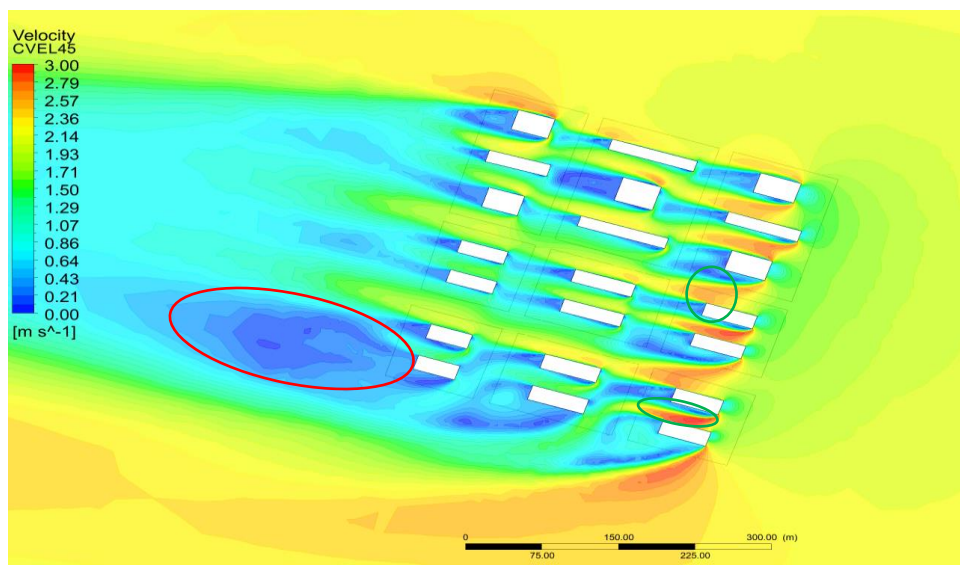


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Contudo, no cenário 3.1 foi observado que a modificação aerodinâmica se faz de forma substancial. Há um incremento na velocidade do ar em função das perturbações no fluxo de ar, ocasionados pelas edificações. Na figura 104 são apontados os efeitos de canto e Venturi como causadores do incremento de velocidade (no círculo verde). Nesta conformação de implantação, indica-se uma permeabilidade dos ventos na malha urbana no sentido leste-oeste de forma homogênea. Contudo, a verticalização provocou expressivas regiões de esteira, ocasionando possivelmente a diminuição das pressões incididas nas fachadas dos edifícios no sotavento, potencializando a recirculação de ar.



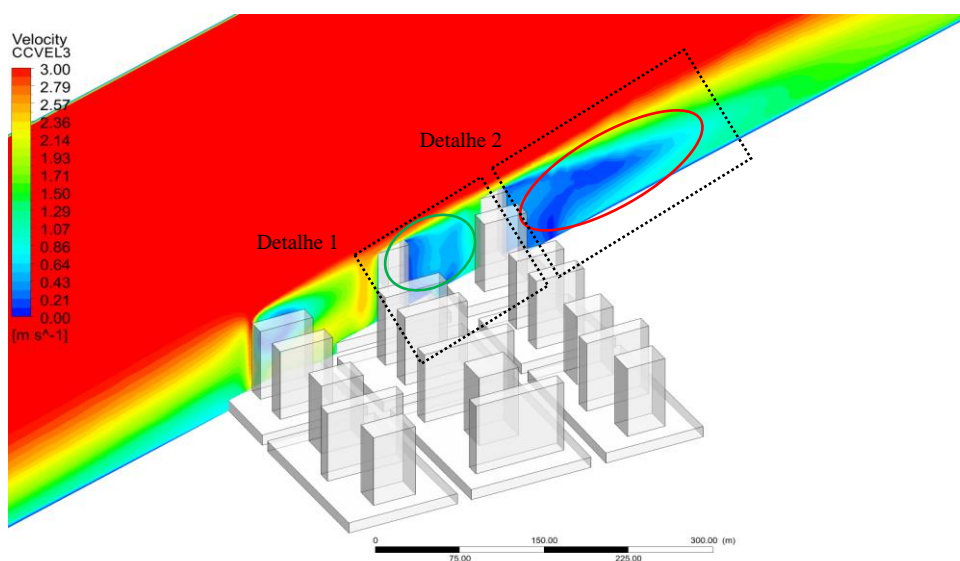
Figura 104 - Fluxo Leste a 45 metros do solo da área 3, cenário hipotético



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

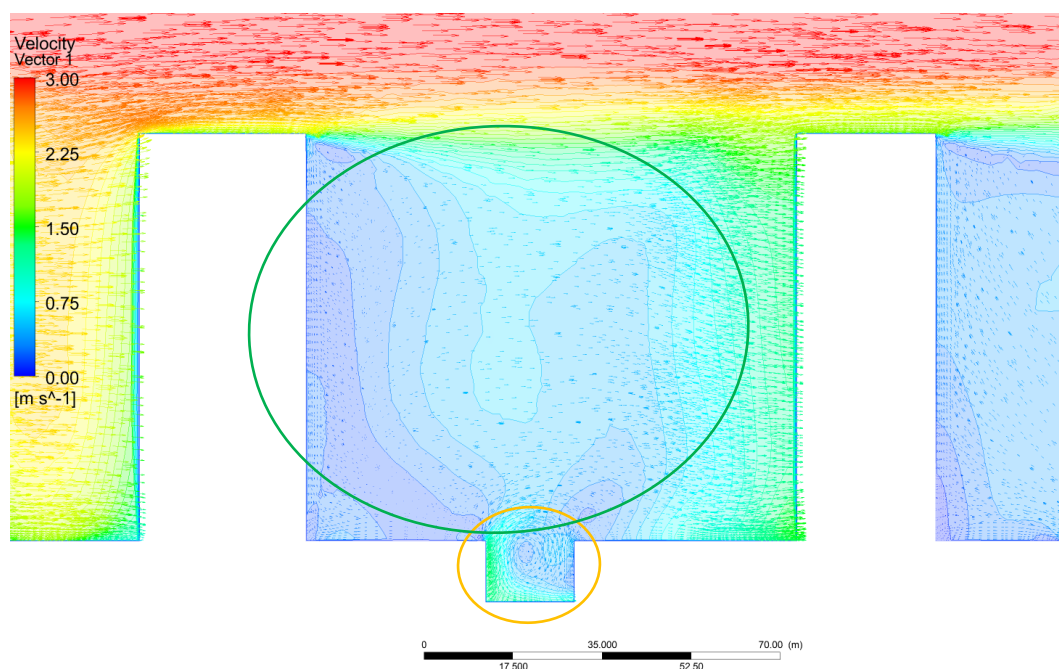
Os efeitos de esteira e recirculação são identificados em perfil vertical (Figura 105), além disso, é possível perceber a influência acumulada das edificações em sua modificação da camada limite intraurbana. No círculo vermelho, indica-se a zona de esteira e no círculo verde a recirculação de ar. De maneira específica, a figura 106 apresenta a movimentação do ar e seu comportamento vetorial, no círculo verde, a recirculação de ar acima do nível do pedestre e no círculo laranja, o mesmo efeito no nível do cânion urbano, apresentando um fluxo ascendente em forma de vórtice. No sotavento, figura 107, em função do efeito acumulado da morfologia da área analisada, constata-se o efeito esteira, podendo ser danoso a qualidade ventilativa cidadina.

Figura 105 - Corte A - Verticalizado



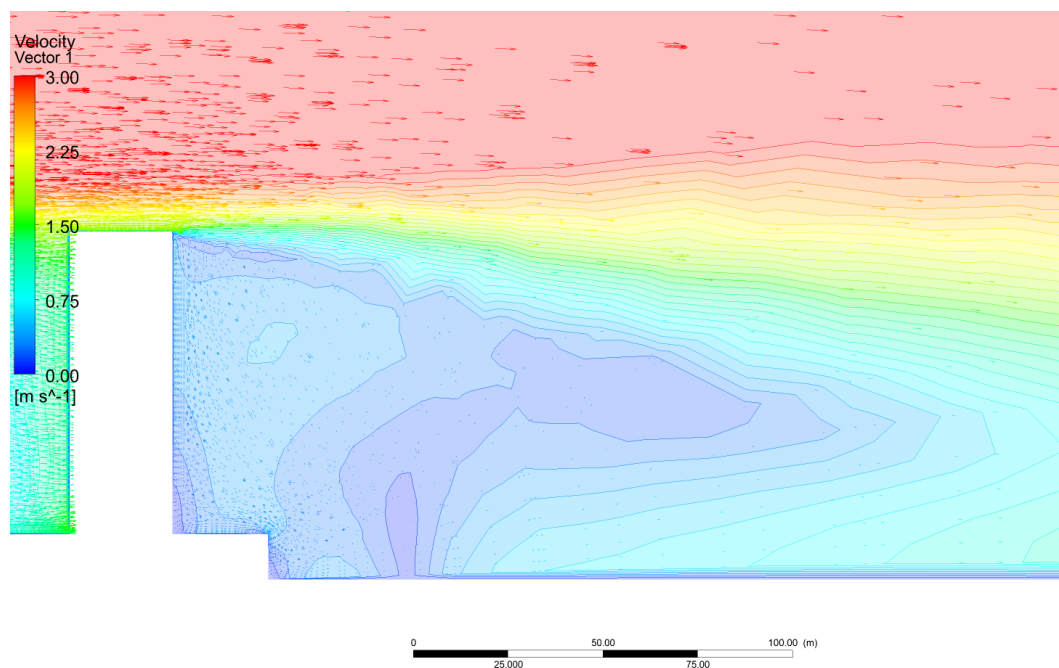
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 106 - Detalhe 1 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 107 - Detalhe 2 - Verticalizado

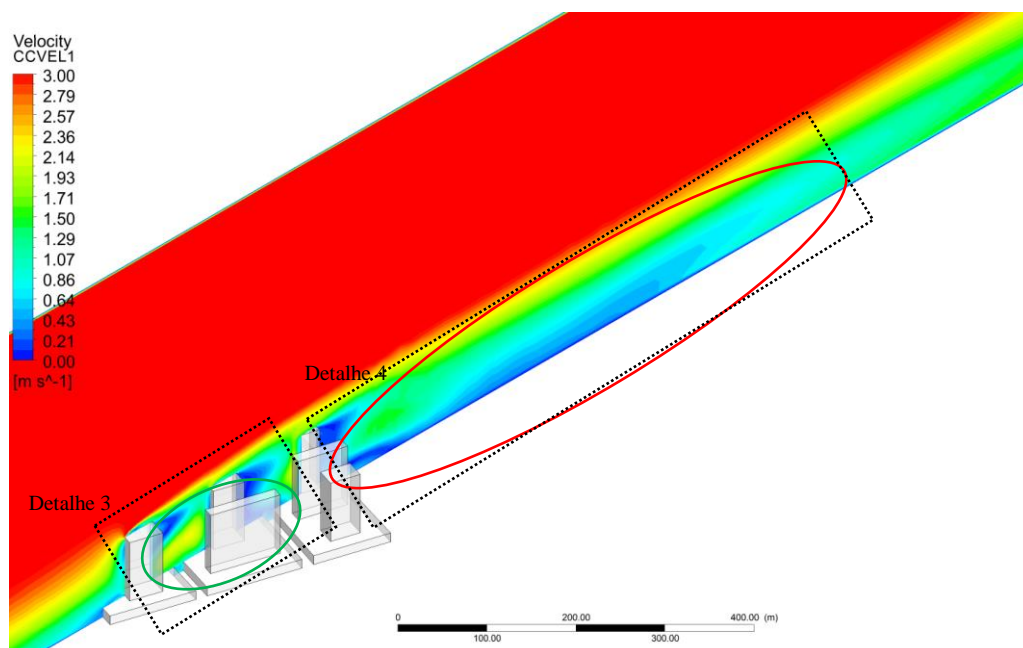


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Para melhor elucidar o impacto acumulado dos edifícios, a figura 108 ilustra a interação aerodinâmica entre um conjunto de construções, cada uma impactando diretamente uma a outra e produzindo regiões de recirculação cada vez maiores com menor velocidade, em função da produzida pelo edifício anterior (Figura 109). Como consequência destas perturbações

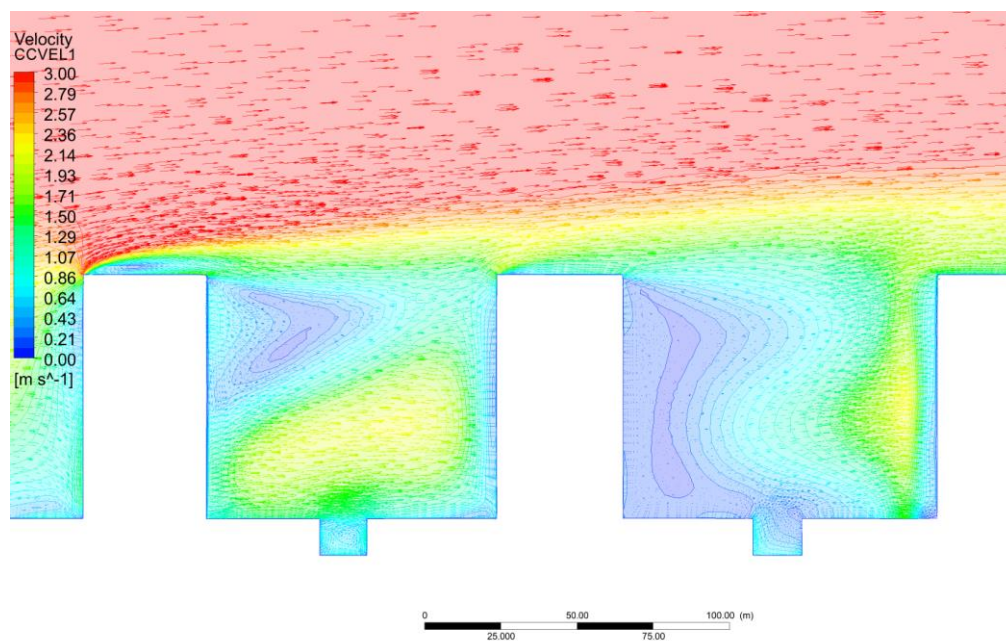
aerodinâmicas, a região de esteira que é produzida é incrementada, neste caso, impactando até 500 m no sotavento (Figura 110).

Figura 108 - Corte B - Verticalizado



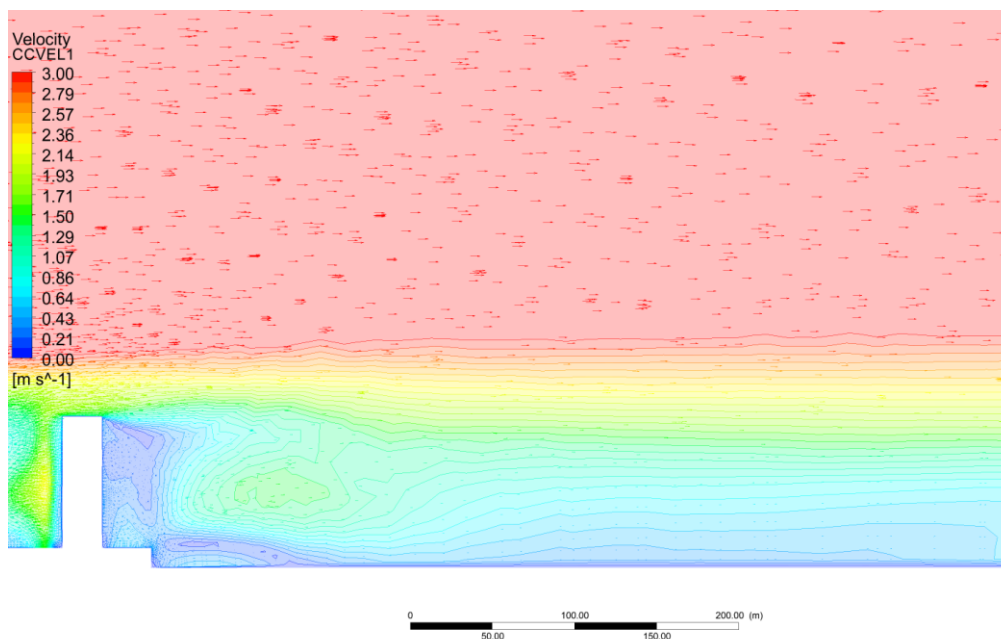
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 109 - Detalhe 3 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 110 - Detalhe 4 - Verticalizado



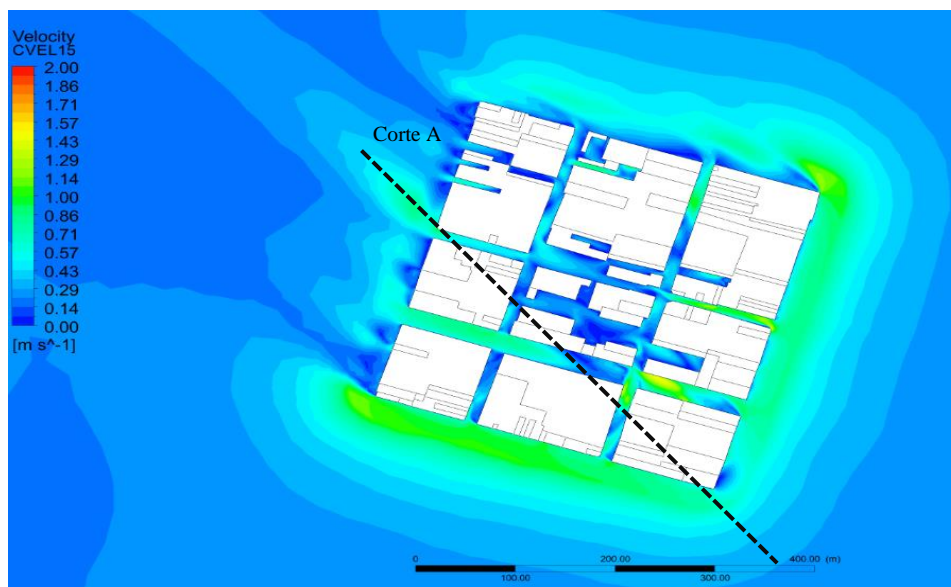
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

### 5.3.3 Cenário ventilação Sudeste

É apresentado de maneira comparativa neste item as simulações do cenário 3 e 3.1 com a ventilação no sentido Sudeste-Noroeste, a partir de visualizações em plantas e cortes. O objetivo é encontrar as possíveis modificações aerodinâmicas em função da modificação da capacidade construtiva da área.

A figura 111 representa a simulação sudeste a 1,5 metros de altura do solo. Neste caso, em relação a simulação leste, as ruas indicam uma menor velocidade, justificada por haver maior área de resistência em relação a angulação incidente do vento. Entretanto, verifica-se ainda velocidades superiores a 1.30 m/s nos eixos carroçais leste-oeste em função da canalização produzida pelas construções.

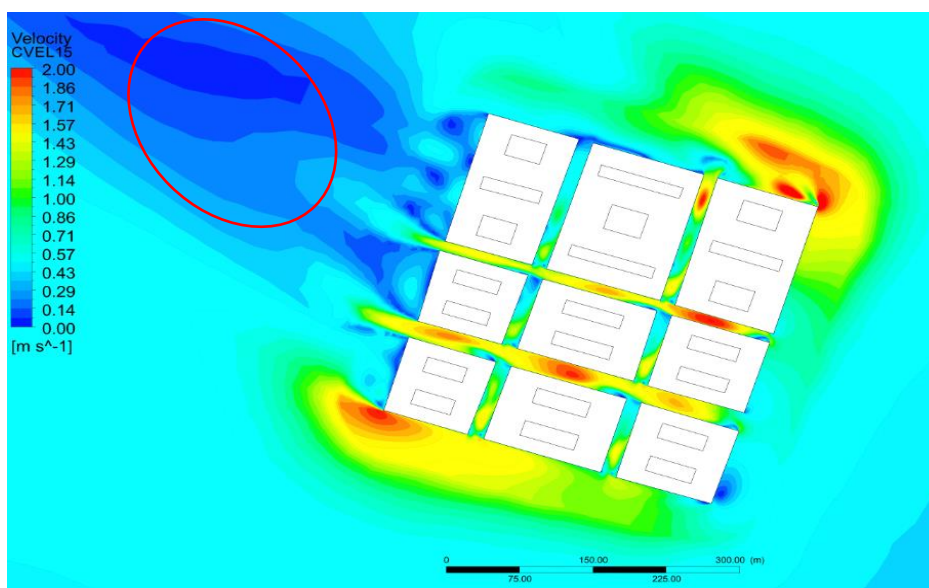
Figura 111 - Simulação fluidodinâmica sentido Sudeste, 1.5 metros, região 3 - Não verticalizada



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

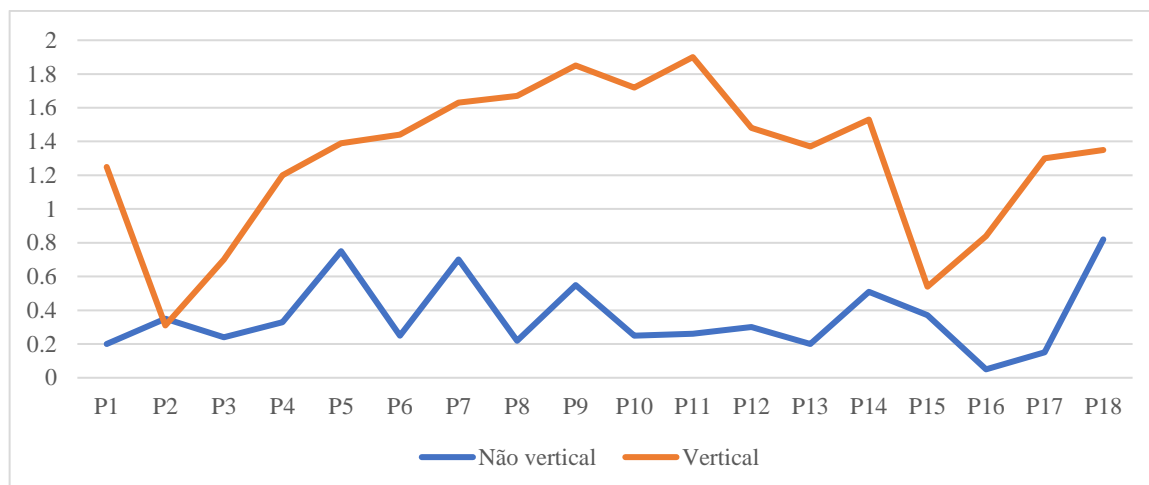
Por consequência de a malha urbana não estar alinhada ao sentido do vento e haver grandes áreas de obstrução em consequência das alturas das edificações, a figura 112 apresenta uma perda de velocidade no sotavento em cenário verticalizada, produzindo uma extensa região de esteira (no círculo vermelho). Mas, este cenário ainda apresenta velocidades superiores ao cenário não verticalizado, além de um aumento de capilaridade no interior da malha urbana no nível do pedestre, como pode ser verificado no gráfico 24.

Figura 112 - Fluxo Sudeste a 1.5 metros do solo da área 3, cenário hipotético



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

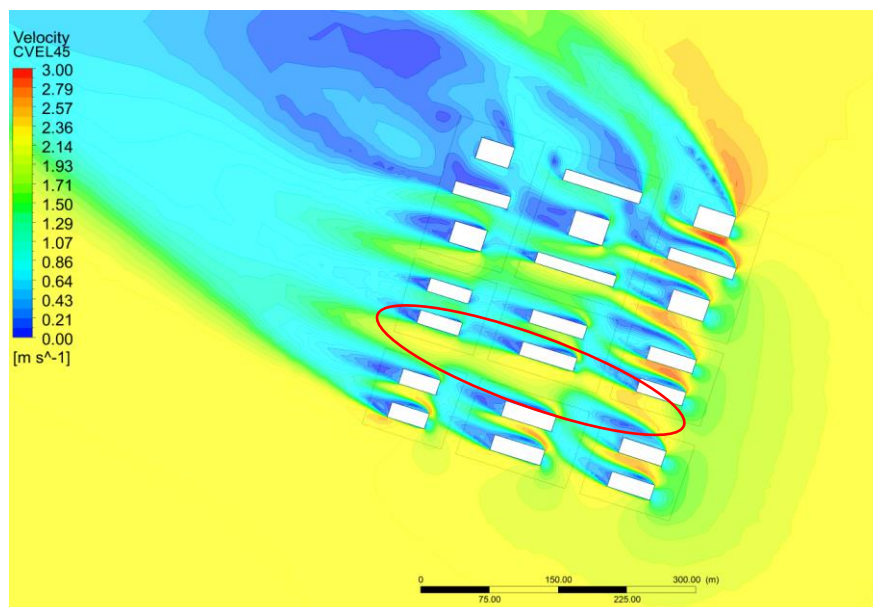
Gráfico 24 - Comparação velocidades do ar - Cenário 3 e 3.1 Sudeste



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

No cenário atual, a 45 metros em relação ao solo, não se verifica modificações aerodinâmicas pertinentes, uma vez que o gabarito das edificações é baixo. No cenário verticalizado a figura 113 apresenta a perda de carga em um plano a 45 metros, onde se percebe a forma acumulativa e transversal esta perda, somando-se e impactando principalmente os edifícios no sotavento. No entanto, nota-se ainda uma canalização do fluxo do ar de forma significativa na rua mais larga da região (no círculo vermelho).

Figura 113 - Simulação fluidodinâmica Sudeste, 1,5 metros, região 3 - Verticalizada

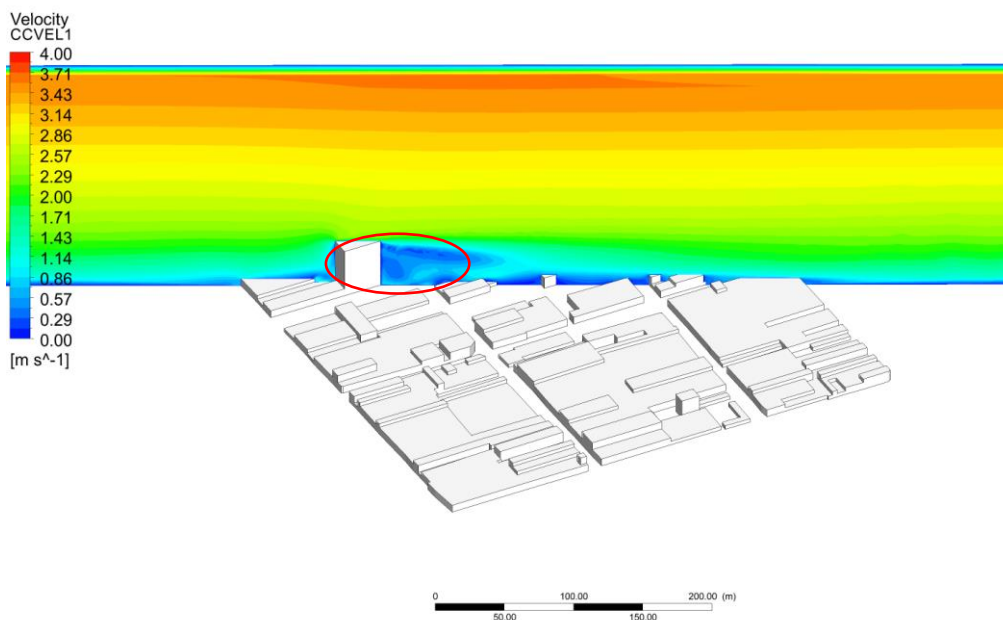


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Em relação ao fluxo no plano vertical, a figura 114 apresenta o maior edifício na região 3, produzindo um efeito esteira e afetando aproximadamente 100 metros no barlavento com a

diminuição da velocidade do ar. Ademais, não foram encontradas outras modificações aerodinâmicas significativas no plano vertical com a incidência sudeste do vento.

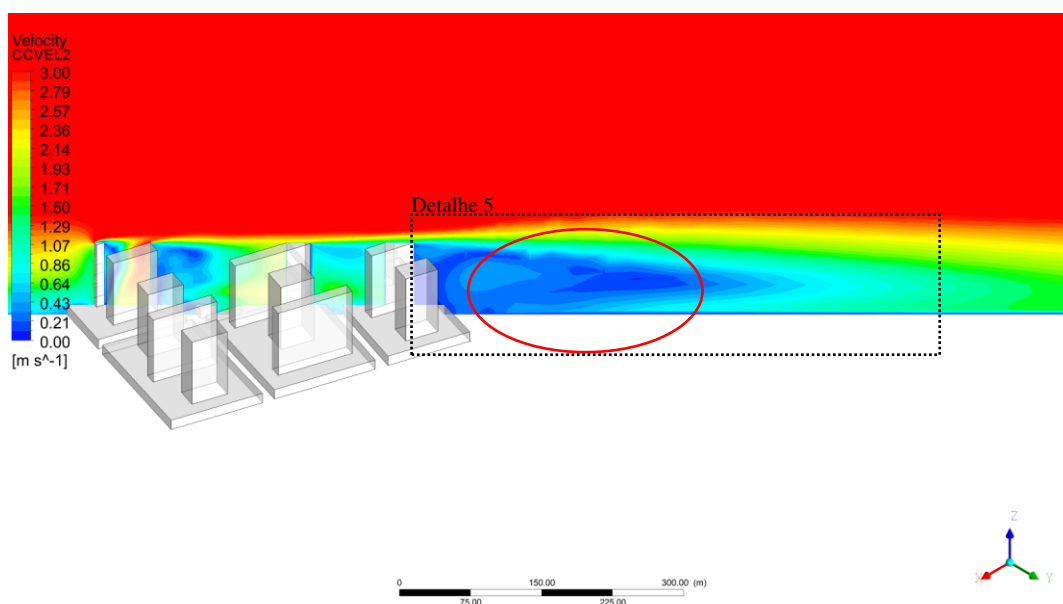
Figura 114 - Corte A - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

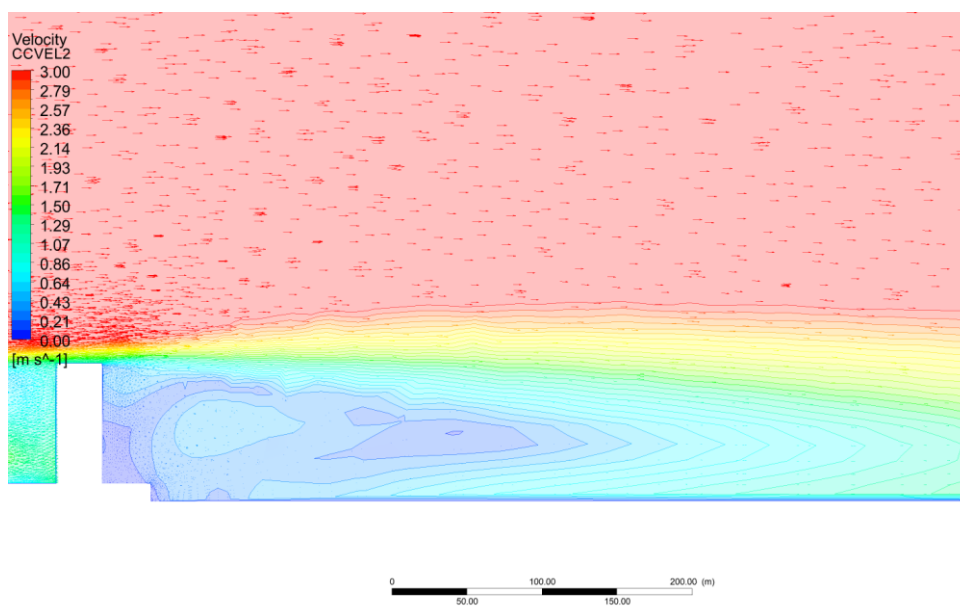
Por conseguinte, a partir da verticalização proposta, há uma maior perda de carga maior do fluxo de ar produzindo a maior região de esteira simulada nesta pesquisa, como ilustrado na representação de um corte transversal da figura 60. Em detalhe, aproxima-se a região de esteira produzida desta área, apresentando o comprimento de 600 metros de extensão linear.

Figura 115 - Corte A - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 116 - Detalhe 5 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

### 5.3.4 Súmula das simulações da região 3

A partir dos dados numéricos apresentados, bem como os perfis horizontais e verticais comparados de mesma grandeza, apontam-se as principais constatações encontradas a partir da verticalização da região 3:

- a) Aumento da velocidade do ar no nível do pedestre;



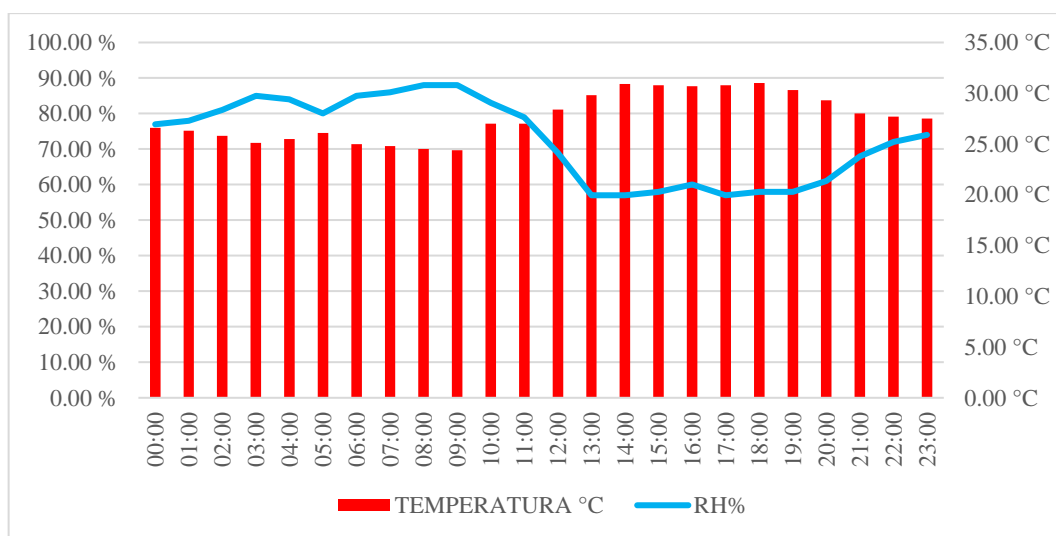
- b) Eixos carroçais mais largos que permitem a circulação de ar de maneira potencializada dentro dos cânions urbanos, mitigando a estagnação do ar;
- c) A produção de áreas de recirculação de ar extensas;
- d) A produção da maior área de esteira analisada neste trabalho a partir do sentido sudeste do vento, mitigando a capacidade ventilativa no sotavento.

## 5.4 INSOLAÇÃO, FATOR DE VISÃO DE CÉU E TEMPERATURA DO AR

### 5.4.1 Região 3

Inicia-se esta análise a partir da maior modificação morfológica deste trabalho, a região 3. O gráfico 25 ilustra as condições de temperatura do ar e umidade no dia 20 de janeiro de 2020, a partir dos dados disponibilizados pela estação automática no site do INMET. Este dia apresentou um céu ensolarado, com baixa nebulosidade e máximas de 31°C às 18h e mínima de 25.10 °C às 3h, com umidade relativa do ar acima de 65%.

Gráfico 25 - Temperatura e umidade do ar 20/01/2020



Fonte: Baseado em INMET (2020).

Isolando as médias da temperatura do ar coletadas na região 3 nos pontos 1 e 2, conforme a figura 117, e comparando com os dados disponíveis pelo INMET no referido dia, encontrou-se uma diferença no período de 10h às 15h de até 5 °C, no gráfico 26. Essa variância é esperada, uma vez que o bairro Centro detém uma inércia térmica maior em comparação à região menos urbanizada onde a estação meteorológica automática se localiza. Demonstrando

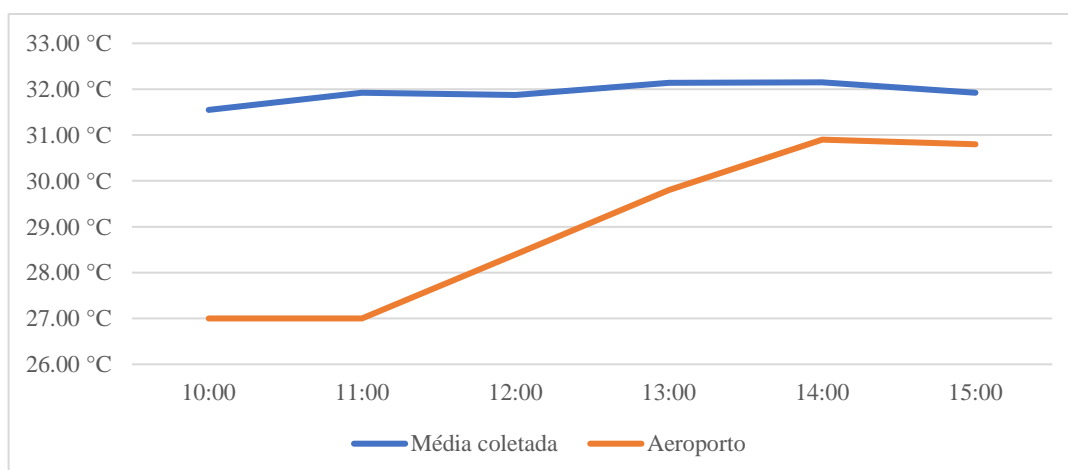
a importância da coleta das variáveis ambientais no local da pesquisa para a precisão das análises (DE FREITAS, 2018).

Figura 117 - Pontos de coleta de dados in loco - Região 3



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

Gráfico 26 - Dados do aeroporto x média coletada - 20/01/2020



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O ponto de coleta 1 (Figura 118) é caracterizado por cobertura arbórea e com passeio com 2 metros de largura. Contudo, o ponto está próximo às maiores porções de revestimento

asfáltico. A figura 119 ilustra o ponto de coleta 2, onde não há cobertura arbórea e com menor largura de passeio (1,2 metros).

Figura 118 - Ponto de coleta 1



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

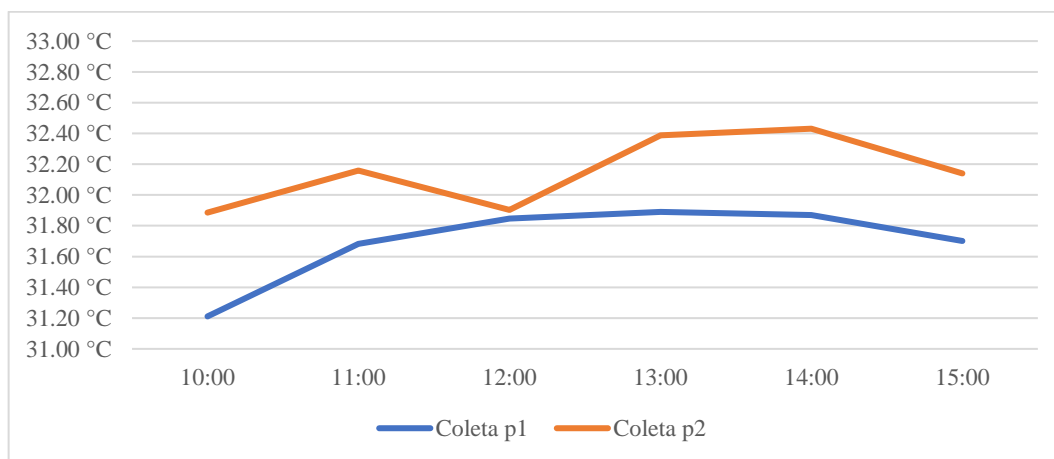
Figura 119 - Ponto de coleta 2



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

De forma comparativa, o ponto 2 apresenta diferenças de até  $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$  em uma distância de 150 metros do ponto 1. Possivelmente, tal situação é ocasionada pelo maior fator de visão de céu disposto sob o ponto 2, bem como a ausência de áreas verdes e o espaçamento da calçada, com maior área de asfalto de forma proporcional ao passeio.

Gráfico 27 - Comparação ponto 1 e 2 - Região 3



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Extrapolando os pontos de coleta, o cenário 3, ilustrado na figura 120, denota heterogeneidade na distribuição solar no nível do pedestre. De maneira esperada, as ruas no sentido leste-oeste, em razão da orientação das quadras, apresentam maior tempo de insolação

direta. Em contrapartida, pela mesma razão, as ruas no sentido norte-sul apresentam comportamentos inverso, uma vez que as quadras circunscritas criam sombra, no período da manhã produzem sombra a oeste e no período da tarde produzem sombra a leste. Em cenário verticalizado, por serem todos de gabaritos iguais, a capacidade de penetração solar no nível proposto é mitigada de maneira homogênea como pode ser analisado na figura 121:

Figura 120 - Tempo de insolação - Cenário 3



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

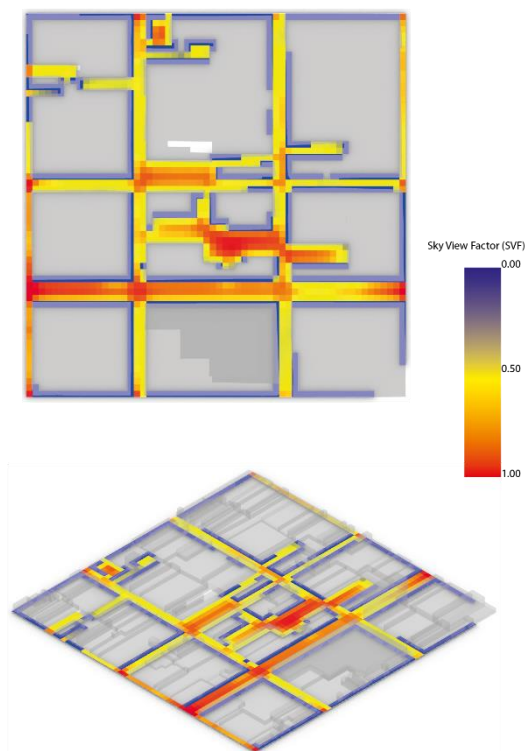
Figura 121 - Tempo de insolação - Cenário 3.1



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

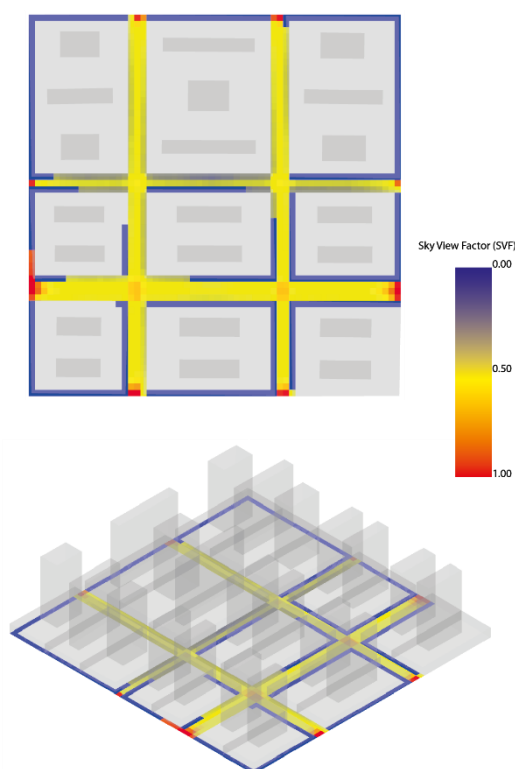
O SVF produz dados análogos, uma vez que utiliza da mesma variável (altura das edificações) para determinar seu fator. A figura 122 apresenta grandes áreas de visão de céu no sentido leste-oeste, principalmente em regiões com gabaritos menores e no interior de quadras da baixa altura. Já em cenário verticalizado, como indicado na figura 123, assim como na capacidade de insolação no nível do pedestre, o fator de visão de céu é homogeneizado para valores médios de 0.5, sendo as maiores diminuições nos eixos do sentido Leste-Oeste, onde em eixos carroçais de menor dimensão de perfil apresentam maiores obstruções com valores de até 0.8, denotando um possível maior acúmulo de calor.

Figura 122 - Fator visão de céu - Cenário 3



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 123 - Fator visão de céu - Cenário 3.1

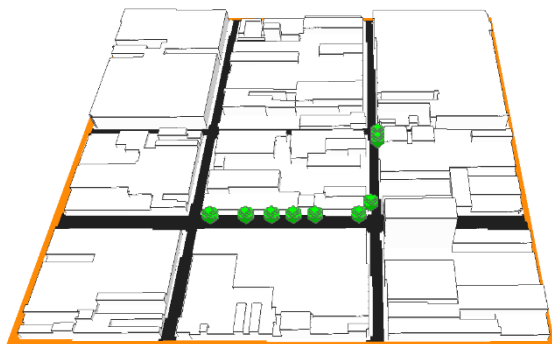


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Para analisar as implicações na temperatura do ar e seu comportamento vetorial dentro da malha urbana, considerando as trocas convectivas inerentes do local, utilizou-se o software Envi-MET para as análises a seguir. A figura 124 apresenta as simplificações ocorridas e necessárias nas geometrias na área, bem como a simplificação das massas arbóreas para aumento da velocidade de processamento na simulação no Envi-MET. A simulação do cenário não verticalizado demandou 240 horas de processamento ininterruptos.

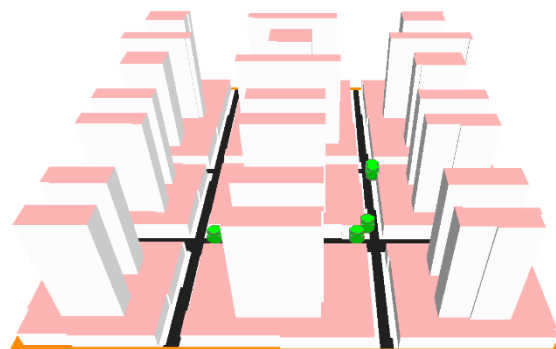
A figura 125 representa a máxima capacidade construtiva empregada na região 3, mantendo as coberturas arbóreas circunscritas ao bloco central da área delimitada. Sendo modificada o tamanho dos eixos carroçais e passeios a partir da prerrogativa da Lei de Uso e Ocupação do Solo (2017). Esta simulação computacional demandou 600 horas de processamento. Como horários chave para aqui serem discutidos, escolheu-se os horários de 9h da manhã e 18h da noite, sendo o horário com menor e maior temperatura do ar, respectivamente, conforme o gráfico 26 supracitado.

Figura 124 - Modelagem simplificada da situação real produzida para simulação ENVI-met cenário 3



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 125 - Modelagem simplificada da situação hipotética produzida para simulação ENVI-met cenário 3.1

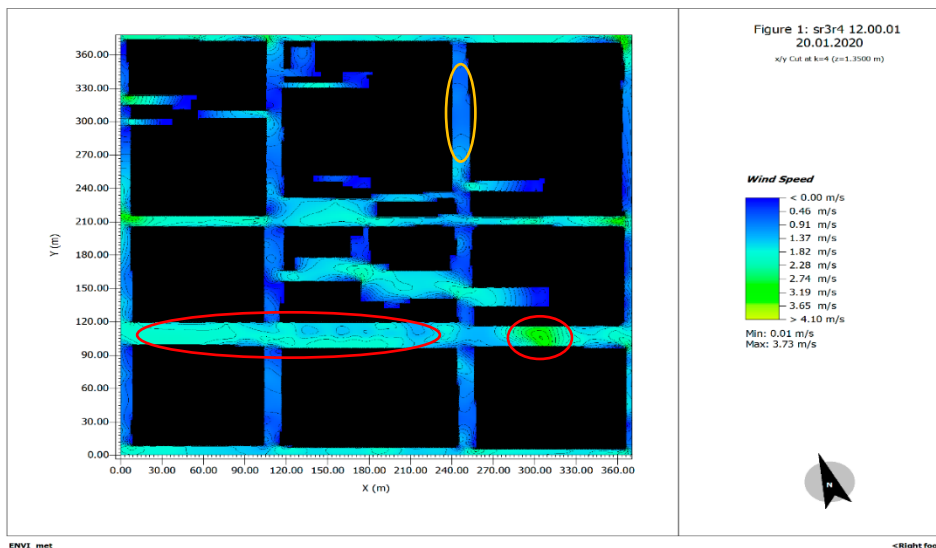


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

É possível também analisar as diferentes movimentações de ar no decorrer do dia em função da temperatura. No entanto, neste presente estudo desta região, não foram encontradas modificações pertinentes a serem apontadas, haja vista a simulação de somente um sentido do ar. Portanto, considerou-se a movimentação de ar ao meio-dia.

A figura 126 ilustra a movimentação do ar representativa para este dia. Assim como apresentado anteriormente nas simulações no ANSYS, esta região possui uma canalização de ar no maior eixo carroçal, inclusive, com o mesmo aumento de velocidade apontado anteriormente pelo efeito Venturi nas simulações CFD no software ANSYS (no círculo vermelho). Demonstrando, os mesmos efeitos aerodinâmicos considerando outros elementos microclimáticos. Nesta simulação os efeitos de estagnação de ar nas ruas dos eixos norte-sul são evidenciados (no círculo laranja), podendo ser potenciais causadores da diminuição da qualidade do ar no nível do pedestre.

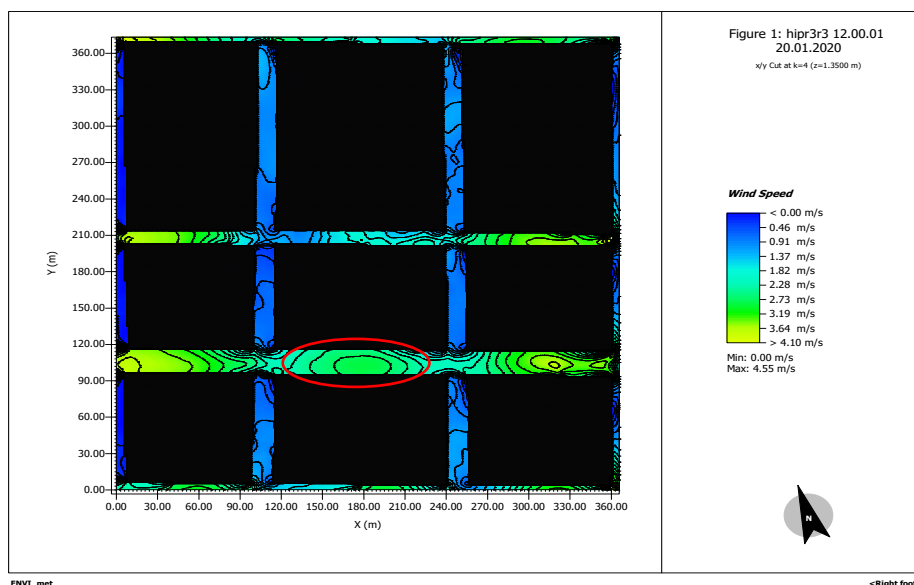
Figura 126 - Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1.35 m, Região 3 - Não verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A velocidade do ar em cenário verticalizado, ilustrada pela figura 127, apresenta canalização do ar nas ruas do eixo leste-oeste com maiores velocidades, pois apresenta movimentações superiores a 4,30 m/s. Já nos arruamentos do sentido norte-sul, há uma diminuição significativa em consequência da dimensão vertical dos edifícios agora inseridos nesta região. Aponta-se uma maior velocidade do ar próximo a localização das árvores no centro da avenida, sendo causada pela diminuição da área de contribuição abaixo das copas arbóreas (no círculo vermelho).

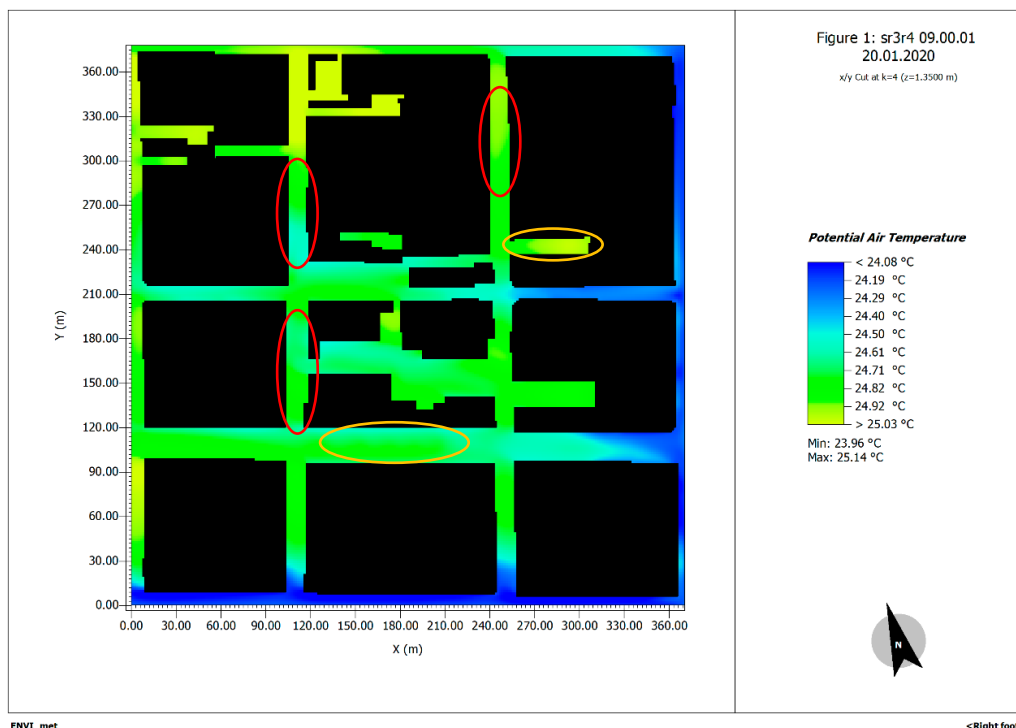
Figura 127 - Simulação fluidodinâmica sentido Leste, 1.35 m, Região 3 - Verticalizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Relacionando, a temperatura potencial do ar simulada durante o horário com menor temperatura, às 9h (Figura 128), as ruas do sentido norte-sul (no círculo vermelho) apresentam uma menor temperatura em comparação a regiões mais abertas (no círculo laranja).

Figura 128 - Temperatura do ar às 9h a 1,35 metros do solo, cenário 3



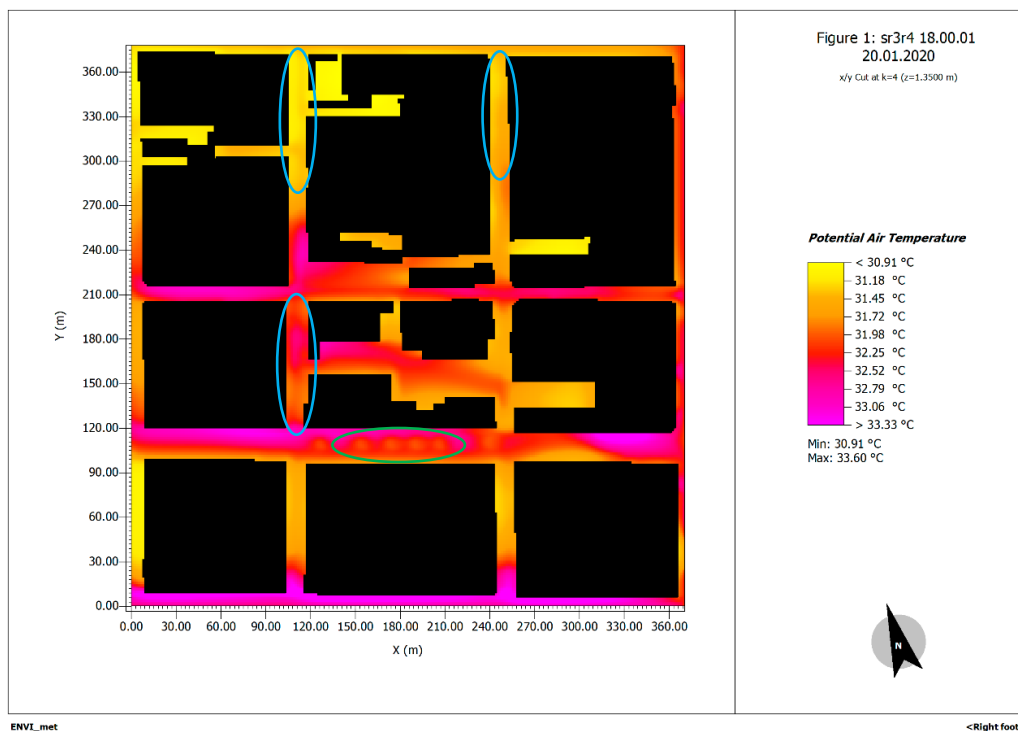
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A figura 129 apresenta o horário com a maior temperatura (18h). As menores temperaturas se encontram entre as quadras no sentido norte-sul. Neste momento, apesar de não haver incidência solar direta, a menor temperatura encontrada é no mínimo superior 6 °C às maiores temperaturas das 9h. Isso é causado em função das trocas térmicas realizadas entre as superfícies das construções com o ar, a fim de manter o balanço térmico. A maior temperatura é encontrada no maior eixo carroçável da região, em decorrência da incidência solar direta no asfalto durante praticamente todo o dia. As massas arbóreas possuem uma importante interação com o ar, apresentando a diminuição da temperatura potencial em até 2 °C (no círculo verde).

Neste caso, inversamente proporcional, o cânion urbano apontado com maior densidade construtiva, ilustra a capacidade de obstrução solar na diminuição das temperaturas noturnas. Por fazer sombras tanto no nascer quanto no pôr do sol nas fachadas dos edifícios e superfícies horizontais ao nível do pedestre, a amplitude térmica entre o ar e estas superfícies é menor, mitigando a intensidade das trocas térmicas.



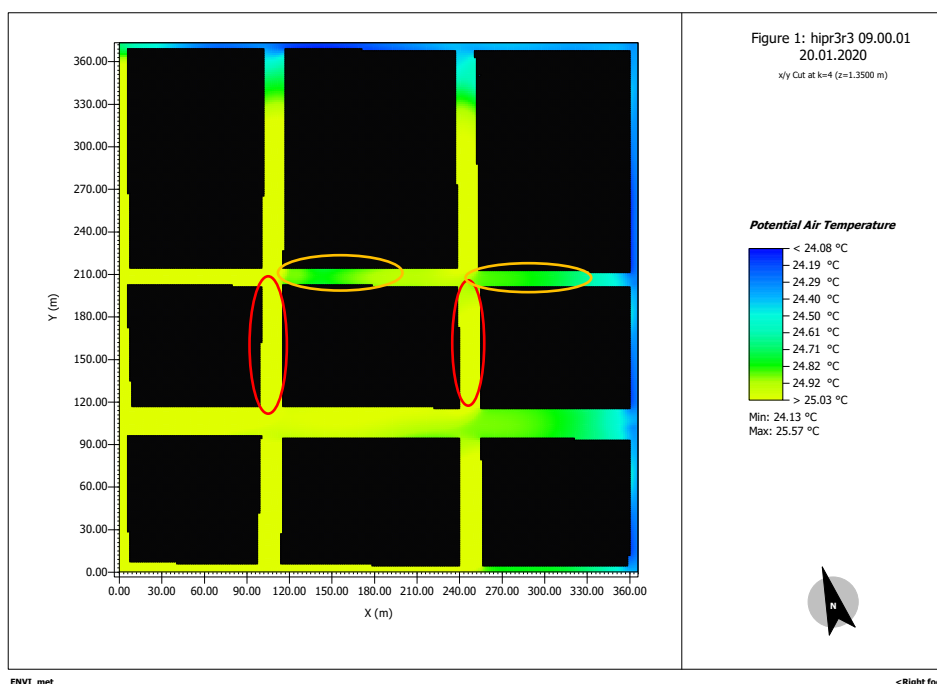
Figura 129 - Temperatura do ar às 18h a 1,35 metros do solo, cenário 3.1



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A figura 130, em cenário verticalizado, apresenta a temperatura do ar às 9h. De forma semelhante à ventilação, as maiores velocidades do ar e a vegetação promovem uma diminuição da temperatura do ar. E nas regiões de menores velocidades que apresentam uma maior temperatura (no círculo vermelho), isso se dá por causa da inércia térmica dos materiais e a baixa troca convectiva em função da baixa velocidade do ar. Em áreas de menor fator de visão do céu, às 9h, são apresentadas as menores temperaturas, uma vez que as superfícies ainda não foram aquecidas em função das dificuldades de penetração solar, como apresentado no círculo laranja. Aponta-se, ainda, que a temperatura do ar se apresenta com uma amplitude baixa, onde a diferença entre o impacto do sombreamento de uma vegetação e de uma edificação se dá na ordem de  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Figura 130 - Temperatura do ar as 09:00 da manhã a 1,35 metros do solo, cenário 3.1

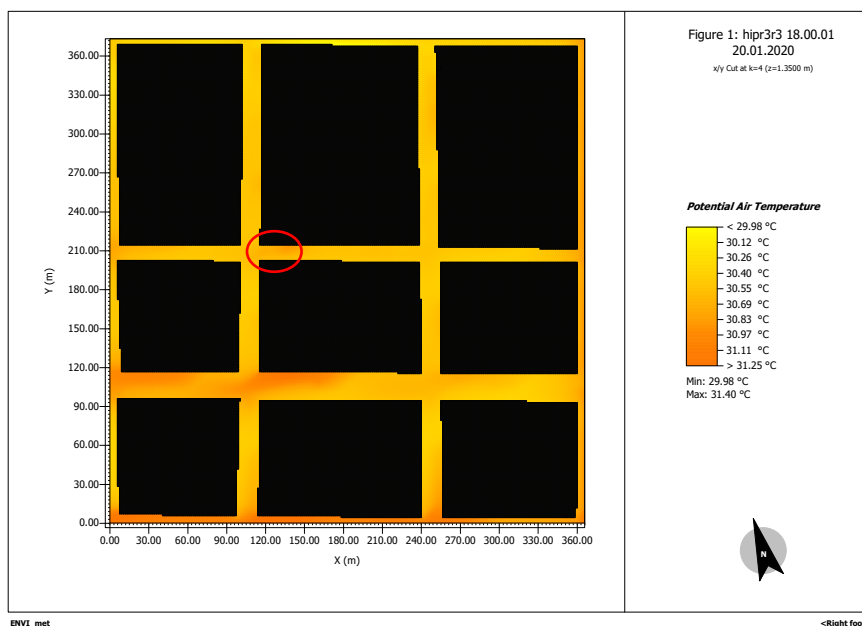


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Às 18h, as temperaturas se apresentam homogêneas na região de análise (Figura 131). Analisa-se que este comportamento se dá principalmente em função dos materiais aplicados no modelo, onde não apresentam variações de cor ou material. As temperaturas mais elevadas da figura em questão também coincidem com as regiões de menor circulação de ar, maior densidade, maior concentração de cobertura asfáltica e ausência de vegetação, como pode ser visto na indicação no círculo vermelho, coincidindo na área de coleta *in loco* P2. Em contrapartida, na região de coleta P1 averígua-se temperaturas potenciais do ar menor, possivelmente em função da cobertura arbórea do local e maior velocidade do ar, apesar da maior área asfáltica e SFV.

Todavia, em função do aumento da densidade construtiva, houve uma esperada diminuição de amplitude térmica, uma vez que as superfícies, neste caso específico proposto de verticalização, estão aquecendo e se resfriando de maneiras proporcionais, sendo a capacidade ventilativa um importante fator de perda de calor e as escassas coberturas arbóreas da região não estão sendo efetivas para a mitigação do ganho térmico pelas superfícies ou para a diminuição da temperatura do ar a partir da evapotranspiração.

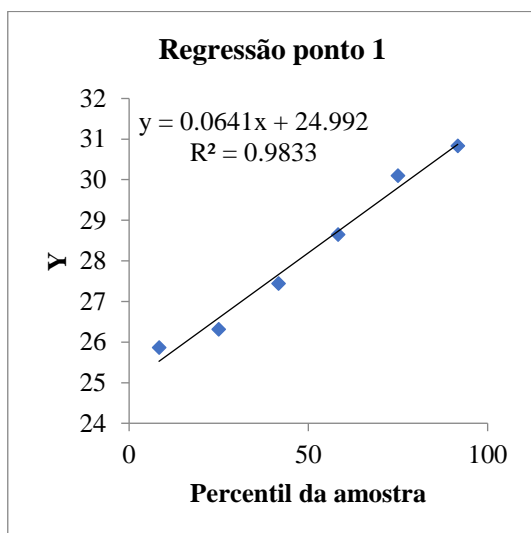
Figura 131 - Temperatura do ar as 18:00 da manhã a 1,35 metros do solo, cenário 3.1



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

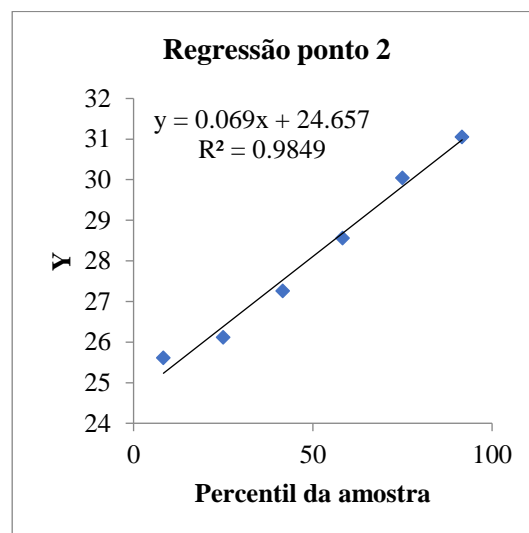
Com o intuito de analisar a confiabilidade da simulação, comparou-se os dados coletados com os dados simulados nos pontos específicos (Gráficos 28 e 29). Encontrando, valores de  $R^2$  superiores a 0.98, indicando que a simulação e os dados coletados possuem correspondência alta.

Gráfico 28 - Regressão dos dados simulados x dados coletados - Ponto de coleta 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 29 - Regressão dos dados simulados x dados coletados - Ponto de coleta 2

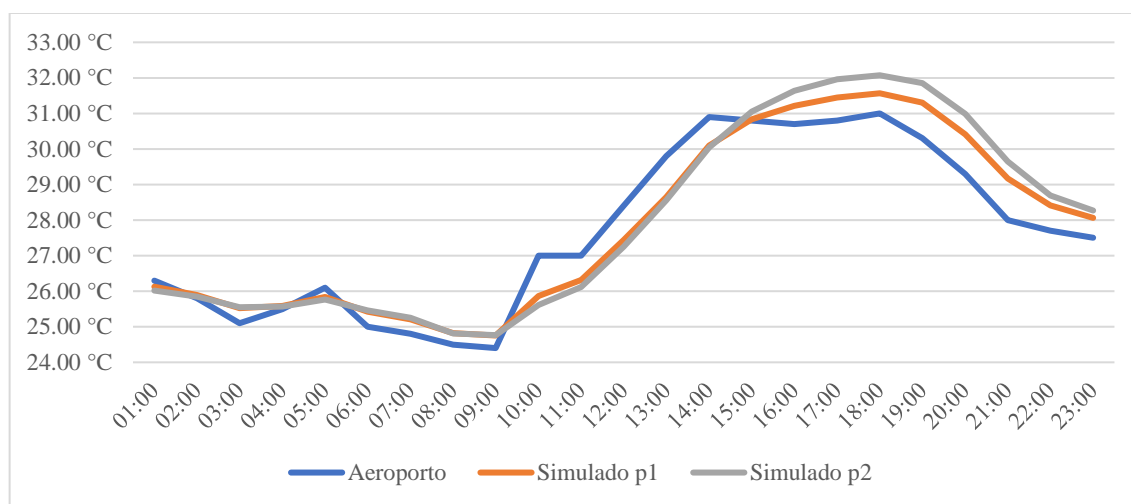


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Ao analisar os dois pontos de coleta simulados em cenário não verticalizado com os dados de entrada indicadas, houve o esperado incremento na temperatura, com uma grandeza

de até 2 °C nas temperaturas noturnas, além da diminuição da temperatura durante o período do dia, em função das sombras produzidas pelo ambiente construído, como indicados no gráfico 30. Estima-se que que as temperaturas diurnas e noturnas simuladas estejam subestimadas em função dos dados de entrada estarem distantes da região analisada. Todavia, os dados apresentam amplitudes e comportamentos semelhantes.

Gráfico 30 - Comparação dados de temperatura do ar do Aeroporto Pinto Martins e os dois pontos de coleta

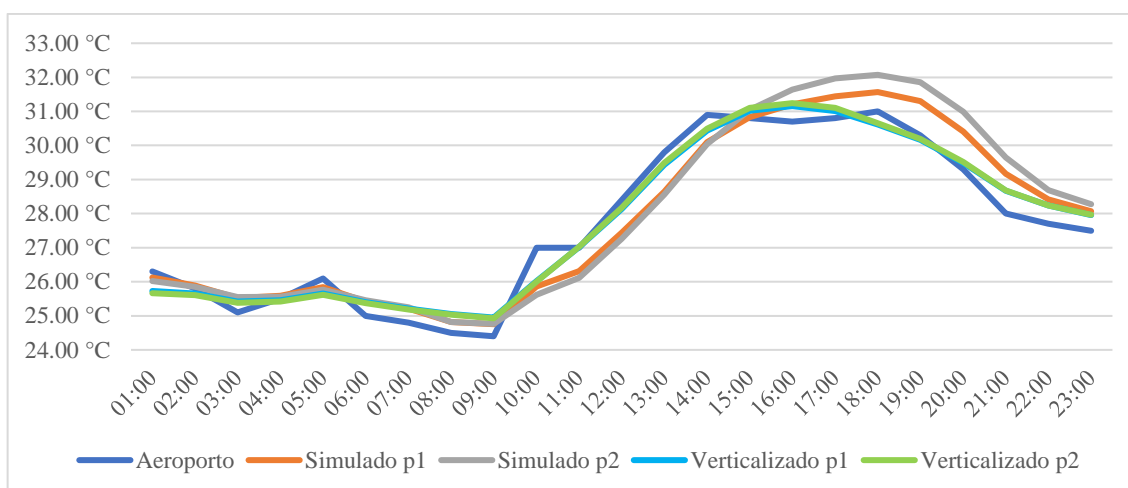


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em consequência das características das superfícies e climáticas desta região, os dados homogêneos de SVF em cenário verticalizado (Figura 123) são proporcionais as temperaturas das 18h, onde o aquecimento do ar é realizado a partir das trocas convectivas dos materiais. As temperaturas às 9h também apresentam semelhanças, já que a verticalização posposta só permite uma média de 50% de vista de céu, o que diminui o aquecimento solar passivo e consequentemente diminui a variância da temperatura do ar.

O gráfico 31 foi construído com base dos dados simulados nos pontos indicados nos cenários explicitados.

Gráfico 31 - Comparação dados temperatura do ar região 3 - Cenários 3 e 3.1



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

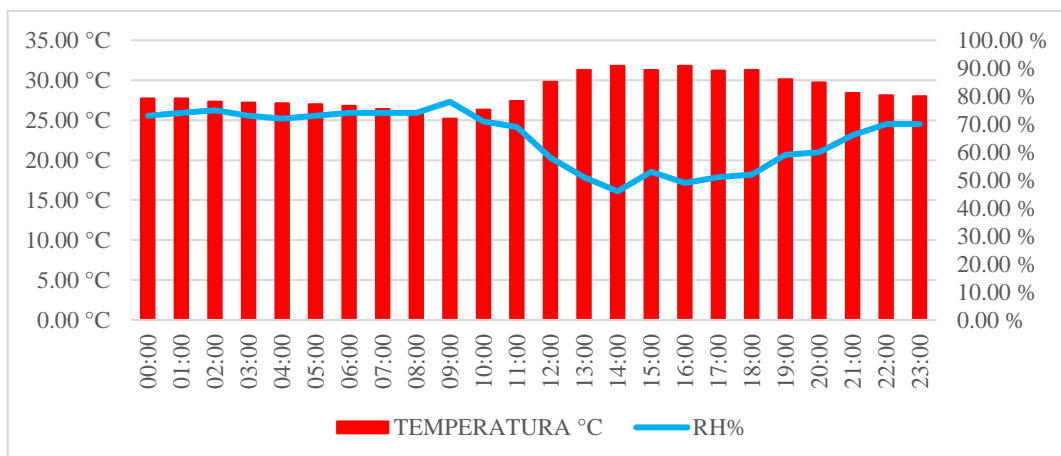
Considera-se que a verticalização da região 3, onde possui pouca cobertura vegetal e área permeável, prevalece com as áreas impermeabilizadas e de alto albedo. Assim, a verticalização apresentou as seguintes constatações:

- Um aumento da temperatura entre às 9h e às 14h em até 1°C;
- O deslocamento do pico de temperatura do ar das 18h para às 15h, apresentando menores temperaturas;
- Mitigação da amplitude térmica do dia, mantendo-a com um comportamento térmico em cenário verticalizado com um aumento médio de 0,5°C;
- Um aumento da velocidade do ar nas vias leste-oeste e diminuição nas norte-sul;
- Baixa significância massa arbórea da região como reguladora térmica face a massa construtiva;
- Relação direta entre o SVF e a temperatura do ar em um dia típico (SVENSSON, 2011; CHEN et al., 2012; MIDDLE et al., 2018; DIRKSEN et al., 2019).

#### 5.4.2 Região 2

O gráfico 32 ilustra as condições de temperatura do ar e umidade no dia 20 de dezembro de 2019, a partir dos dados disponibilizados pela estação automática no site do INMET. A região 2 de análise apresentou um dia ensolarado, com mínima de 24,90 °C às 09h e máxima de 31,30°C às 15h.

Gráfico 32 - Temperatura e umidade do ar 20/12/2019



Fonte: Baseado em INMET (2020).

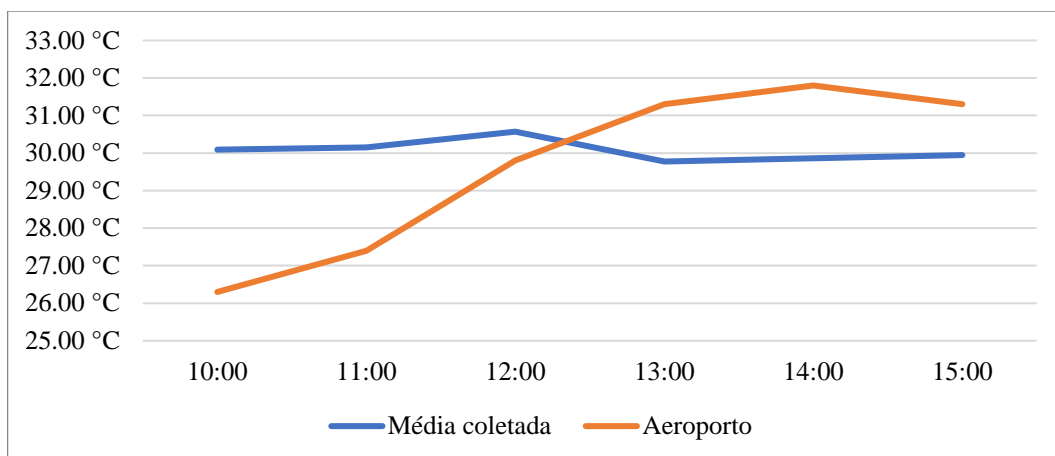
Considerando os pontos P1 e P2, elucidados na figura 132 e a média da temperatura do ar coletada por eles, comparadas com os mesmos dados disponibilizados em estação automática e disponibilizados pelo INMET localizada em área menos densa, constatou-se uma estabilização da temperatura, demonstrada no gráfico 33. Sendo o espelho d'água e a cobertura arbórea da praça em questão, os fatores fundamentais para a manutenção das condições microclimáticas do local. A evapotranspiração realizada pelas árvores, tende a dissipar o calor recebido direto do sol, a concentração de água no local e remete, também, a reflexão da radiação solar direta.

Figura 132 - Pontos de coleta de dados in loco - Região 2



Fonte: Baseado em *GoogleEarth* (2020).

Gráfico 33 - Dados aeroporto x média coletada - 20/12/2019



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em comparação com os dados coletados de temperatura do ar nas duas estações, as quais possuem as mesmas características de entorno, fator de visão de céu e cobertura arbórea, como esperado, não houve diferenças de grande amplitude, como é ilustrado no gráfico 34.

Figura 133 - Ponto de coleta 1



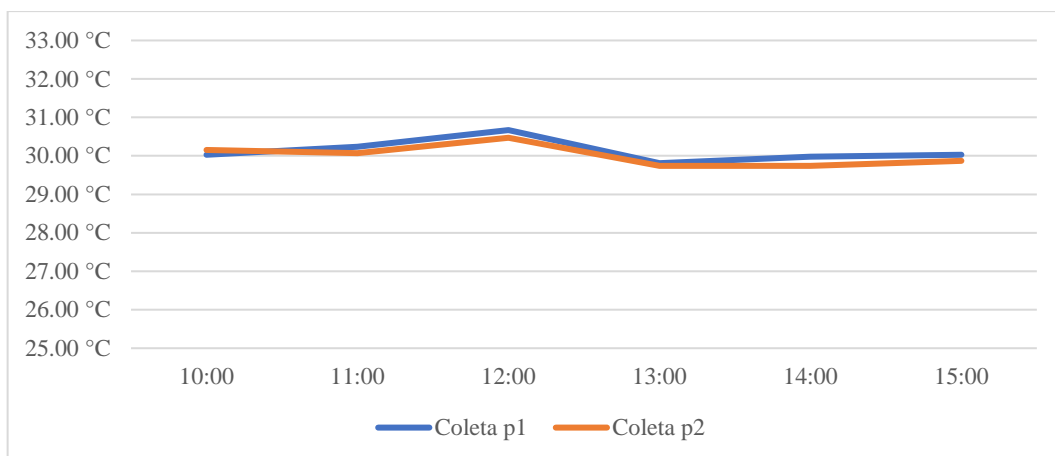
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 134 - Ponto de coleta 2



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Gráfico 34 - Comparação ponto 1 e 2 - Região 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em cenário não verticalizado, ilustrado na figura 135, observa-se a alta capacidade de aquecimento solar passivo no nível do pedestre. Todavia, esta simulação não levou em consideração a cobertura arbórea na região, sendo assim, a área central que correspondente a praça estaria com um tempo de sol com valores diminutos em razão do sombreamento das copas das árvores. Os arruamentos deste cenário não apresentam pelo menos 6h de sol, considerando o dia em questão. Em cenário verticalizado (Figura 136), o impacto das verticalizações na superfície da praça é expressivo, diminuindo em até 2 horas de exposição solar. Para além disso, a diminuição da penetração solar nas vias circundantes aos novos empreendimentos propostos sofre significativa obstrução.

Figura 135 - Tempo de insolação - Cenário 2



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 136 - Tempo de insolação - Cenário 2.1

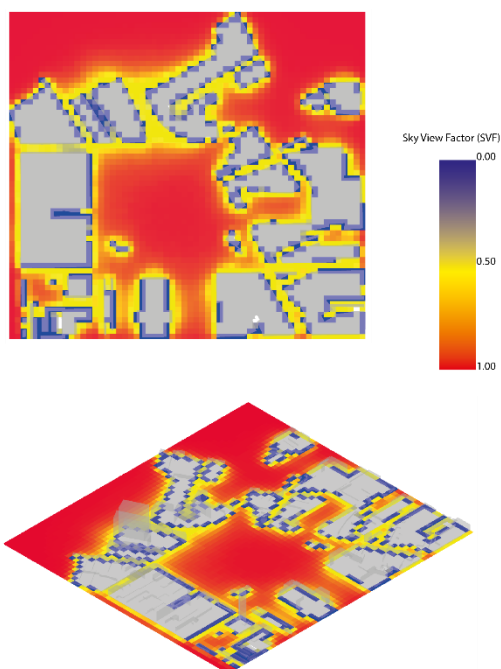


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).



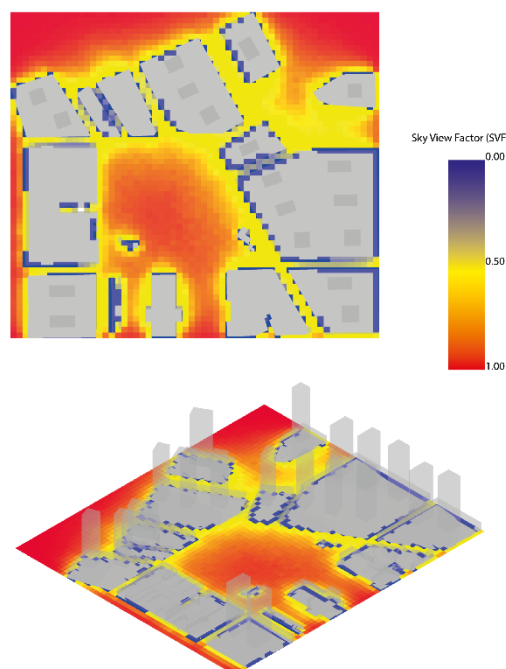
As constatações supracitadas podem ser válidas a partir do SVF. A figura 137 demonstra a área da praça com elevado fator de visão de céu se não considerada as coberturas arbóreas, mas somente as edificações circunscritas e nos arruamentos circunscritos as novas edificações valores médios de 0.5. Com isso, ao considerar que a vegetação do local tende a diminuir a temperatura no microclima, espera-se que esta região apresente temperaturas homogêneas na praça e no entorno imediato. Já em cenário verticalizado (Figura 138), com o aumento da capacidade de verticalização do local, analisa-se que os cânions urbanos terão uma diminuição na temperatura do ar diurna e que a arborização mantenha a temperatura homogênea e com baixa amplitude no interior da praça.

Figura 137 - Fator de visão de céu - Cenário 2



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 138 - Fator de visão de céu - Cenário 2.1

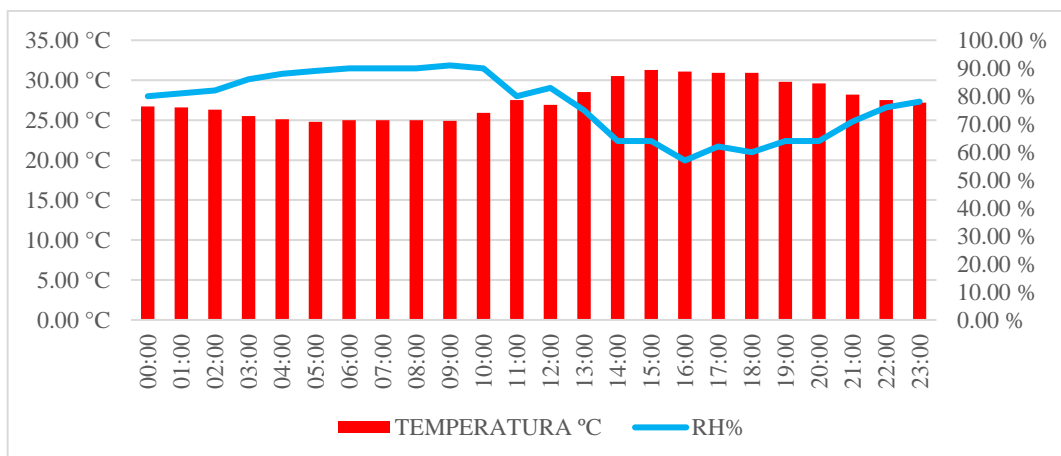


Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

### 5.4.3 Regiões 1

O gráfico 35 ilustra as condições de temperatura do ar e umidade no dia 16 de janeiro de 2020, a partir dos dados disponibilizados pela estação automática no site do INMET. A região 1 de análise apresentou um dia parcialmente nublado no período matutino, com mínima de 25.20 °C às 09h e máxima de 31.90°C às 15h.

Gráfico 35 - Temperatura e umidade do ar 16 de janeiro de 2020



Fonte: Baseado em INMET (2020).

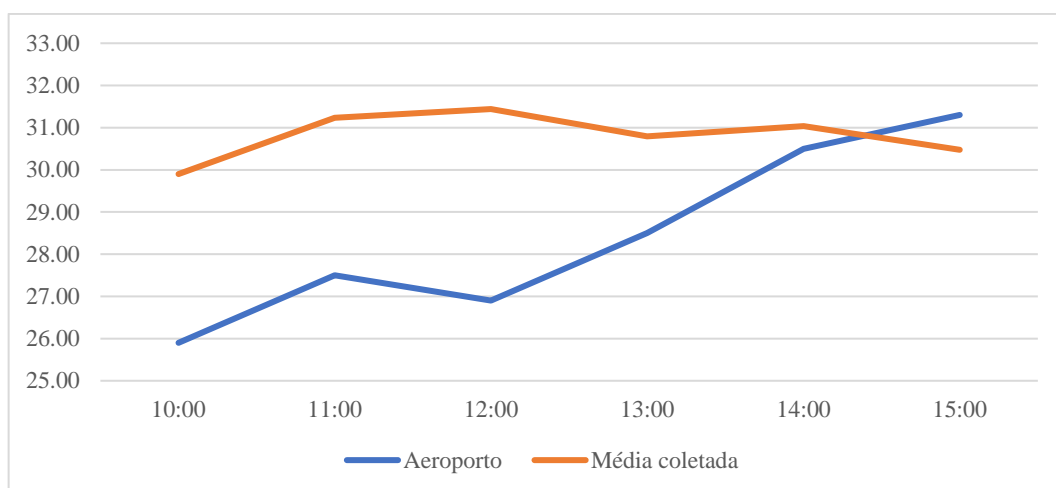
A partir da análise comparativa entre a média da temperatura do ar coletado nos pontos 1 e 2 ilustrados, especialmente na figura 139 e os dados disponíveis pelo INMET neste dia (Gráfico 36), constatou-se uma amplitude térmica menor esperada em relação a área 3. Justifica-se, portanto, por se tratar de uma área menos densa, com baixa verticalização, com áreas de ZEPH e ZPA além de uma extensa praça com cobertura arbórea e com revestimento da rua em paralelepípedo, tornando este local um espaço com menos capacidade de armazenamento de calor.

Figura 139 - Pontos de coleta de dados in loco - Região 1



Fonte: Baseado em GoogleEarth (2020).

Gráfico 36 - Dados aeroporto x média coletada - 16/01/2020



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

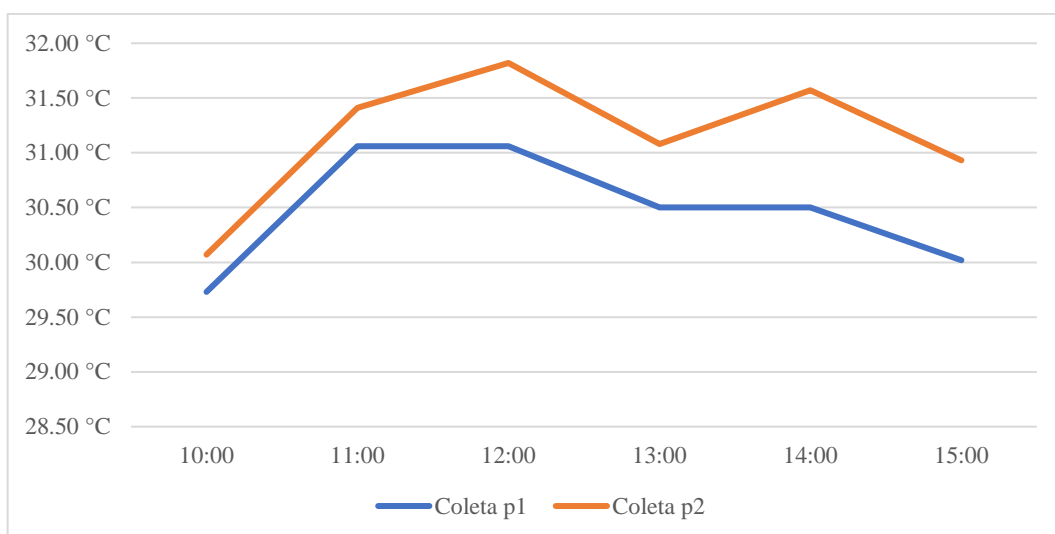
Os pontos 1 e 2, representados pela figura 140, apresentam uma distância considerável das ruas, não estando diretamente abaixo de cobertura vegetal e próximos do espelho d'água no centro da praça. Em relação a comparação dos dados P1 e P2, ilustrados no gráfico 37, observa-se uma esperada diferença de temperatura do ar a 1,5 metros do solo.

Figura 140 - Ponto de coleta P1 e P2



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

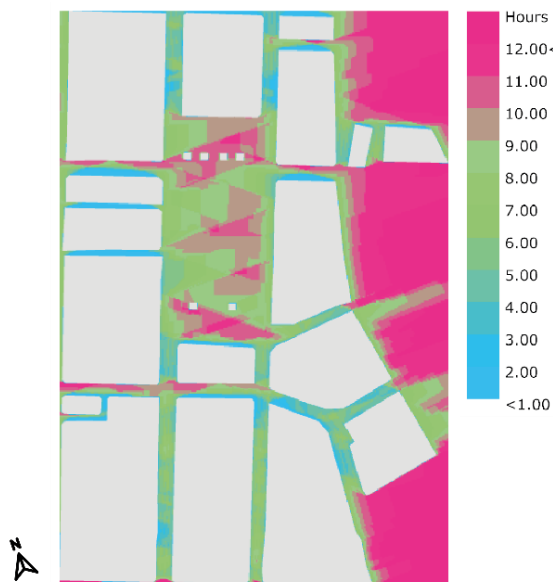
Gráfico 37 - Comparação ponto 1 e 2 - Região 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

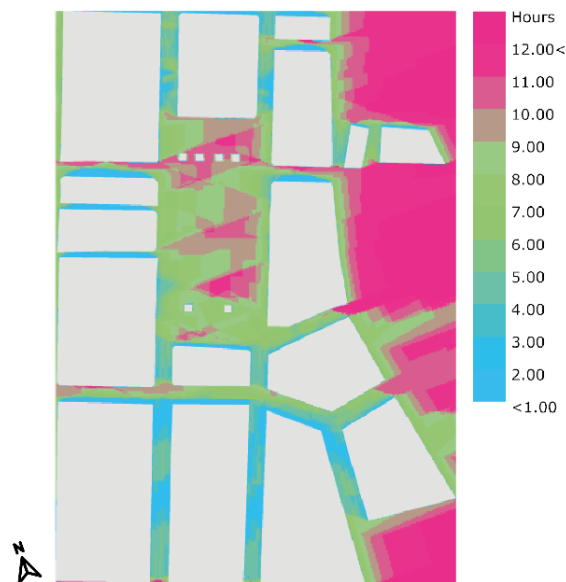
Essa diferença de temperatura se justifica em função da diferença de exposição solar entre os pontos de análise, sendo a P1 estando mais sujeita ao aquecimento solar em comparação ao P2, como a figura 141 elucidada. Em cenário verticalizado (Figura 142), de maneira empírica a partir das simulações da região 3, entende-se que a verticalização proposta, em relação à insolação direta, pouco interferiria nas áreas próximas a praça.

Figura 141 - Tempo de insolação - Cenário 1



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 142 - Tempo de insolação - Cenário 3.1



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

O impacto da verticalização pode ser melhor analisado a partir do fator de visão de céu exposto nas figuras 143 e 144. A figura 143, em cenário não verticalizado, apresenta SVF médio

de 0.5, com valores superiores a 0.75 no centro da praça e inferiores a 0.25 nos eixos carroçais, apontando um aquecimento solar maior no nível do pedestre. A figura 144, em cenário verticalizado, constatou-se um SVF menor no centro da praça além da homogeneização deste fator nas ruas circunscritas a praça, indicando um menor aquecimento solar no nível do pedestre nessas vias com pouco impacto no interior da praça.

Figura 143 - Fator de visão de céu - Cenário 1

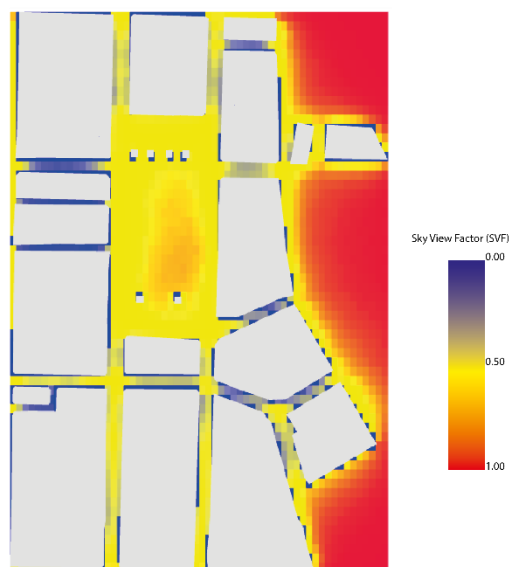
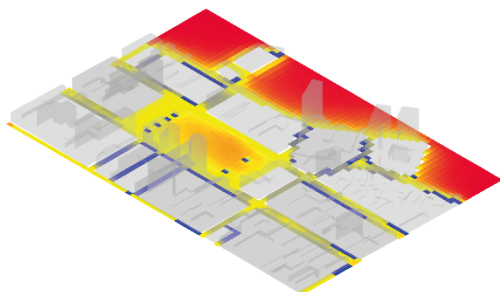
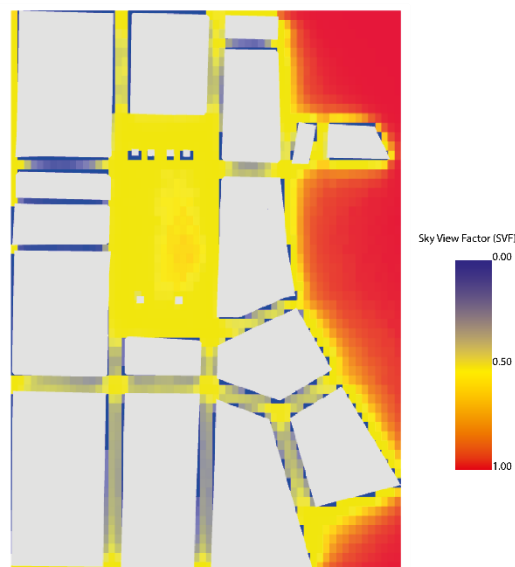
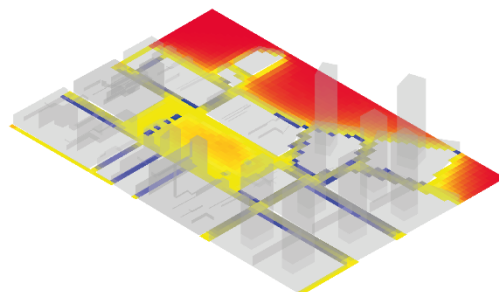


Figura 144 - Fator de visão de céu - Cenário 1.1



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Em uma análise empírica, entende-se que a verticalização desta região pouco afetará a distribuição solar na praça que por sua vez não mudará a temperatura do ar no período diurno. Ainda no mesmo período em cenário verticalizado, as vias circunscritas aos empreendimentos verticais propostos tendem a diminuir a temperatura do ar em virtude da proteção solar. No período noturno, estas vias de baixo fator de visão de céu tendem a apresentar temperaturas homogêneas inferiores às temperaturas diurnas em virtude do aumento do eixo carroçal e por consequência do fluxo de ar. Não espera-se modificações climáticas como a diminuição da temperatura do ar da região 3, neste caso, a ZEPH e ZPA mitigaram a produção de áreas verticalizadas no local.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação avaliou três regiões situadas no centro da cidade de Fortaleza, Ceará, com o intuito de cumprir o objetivo geral desta pesquisa, que era averiguar como os possíveis padrões construtivos impulsionados pela legislação urbanística podem modificar o microclima urbano.

Na região 1, que é a menor com capacidade construtiva média das áreas analisadas, constatou-se que a verticalização da região é atenuada pela presença da ZEPH, a qual possui área majoritária em relação a ZEDUS. Com relação a insolação do local no nível do pedestre, não foram observadas modificações para além dos cânions urbanos circunscritos às verticalizações propostas. Em relação ao impacto na ventilação, de forma semelhante à insolação, analisou-se que houve um aumento significativo no nível do pedestre, especificamente nos cânions urbanos alargados em função da legislação.

Em relação a praça localizada na região, verificou-se uma diminuição da velocidade do ar em função do aumento da vazão do local neste mesmo nível. Além disso, entende-se que as verticalizações propostas para esta área pouco impactariam no comportamento microclimático do local. Espera-se, assim, uma diminuição da temperatura do ar diurna e, para além disso, não se espera o aumento da temperatura diária média, uma vez que não se encontra pontos de estagnação de ar relevantes para a mitigação das trocas convectivas com o ar.

A região 2, sendo a área de capacidade construtiva média e com a maior área arbórea das regiões de análise e possuindo além da ZEPH a ZPA também, elucidou que os dados destas áreas de preservação não possuem o impacto apresentado na região 1. Em relação à insolação, constatou-se que houve uma diminuição significativa na capacidade de aquecimento solar no nível do pedestre em função do aumento dos anteparos verticais propostos, verificando, também, que a ZPA e a ZEPH desta região pouco mitigaram este processo. A afirmação anterior também é verdadeira em função da ventilação.

No sentido leste, as zonas de preservação ainda interferem de modo a mitigar possíveis efeitos à urbana. Já no sentido sudeste, a magnitude das verticalizações se sobrepõe as áreas de preservação, produzindo efeitos extensos de esteira e recirculação de ar. Portanto, a partir da verticalização do local, uma diminuição da qualidade do ar em razão da extensa região de recirculação de ar acima da área de praça. Em relação a temperatura do ar, observou-se uma diminuição da temperatura diurna, bem como na média diária sem impactos a uma possível formação ilha de calor em função da razão entre área construída, cobertura arbórea e corpo d'água.

Por fim, na região 3, com maior área construtiva deste trabalho e menor cobertura arbórea entre os objetos de estudo, foram identificados sérios atenuantes em relação ao microclima do local. Com relação à insolação no nível do pedestre, a verticalização proposta suprime de maneira significativa a capacidade de aquecimento solar no nível do pedestre, causando uma diminuição da temperatura vespertina. Todavia, com o aumento da quantidade de área aquecidas pelo sol, a capacidade térmica é aumentada, e assim, ocorre um aumento na temperatura média diária do ar, pelo aprisionamento das radiações de onda longa em áreas de baixo fator de visão de céu.

Assim, a ventilação do local e a velocidade do ar no nível do pedestre são potencializadas, principalmente, nas vias perpendiculares ao sentido do vento. Contudo, fora dos eixos de canalização do vento, verificou-se uma diminuição da velocidade do ar criando efeitos potencialmente danosos a salubridade urbana como regiões de esteira, recirculações do ar e mitigando a capacidade ventilativa de edificações no sotavento. A partir desse entendimento do impacto dos arruamentos, é possível ressaltar a importância da forma da malha urbana para a capacidade ventilativa no interior das cidades, sendo um fator imprescindível para a manutenção da salubridade bem como regulação térmica.

Portanto, entende-se que para a manutenção do microclima urbano face à verticalização proposta pela LUOS, faz-se necessária a inserção de cobertura arbóreas nestas áreas, assim, visando diminuir o ganho térmico pelas superfícies através do sol, uma vez que esse calor é dissipado pela evapotranspiração. Além disso, de maneira empírica a partir dos dados produzidos na região 3, entende-se que com o aumento da densidade construída a partir do modelo proposto em toda a área de ZEDUS, potencialmente, elevaria a temperatura média do centro da cidade.

Como consequência desta elevação de temperatura do ar, impactaria em aspectos como consumo de energia para climatização, mitigação da salubridade do ar urbano bem como da capacidade ventilativa em edificações de pequeno porte. Como aspectos positivos relacionados a verticalização do centro, aponta-se o aumento da velocidade do ar no nível do pedestre, bem como a intensificação de áreas sombreadas no mesmo nível. Entre as características que mitigam os possíveis efeitos danosos da verticalização propostos na LUOS, se indica o afastamento progressivo e o aumento das calçadas.

Como colaboração deste trabalho, para as futuras políticas públicas, aponta-se que em regiões verticalizadas são necessários eixos de calçada e rua maiores proporcionalmente para evitar efeitos aerodinâmicos danosos ao pedestre. Pois, assim, é possível permitir a penetração do ar na malha urbana; necessita-se o aumento de regiões com cobertura arbórea, áreas

permeáveis e espelhos d'água, auxiliando na regulação do microclima e a utilização de materiais com albedo mais elevado.

Para a contribuição deste trabalho ao campo do conhecimento científico, verifica-se que o fator de visão de céu é uma importante variável para o diagnóstico microclimático urbano, uma vez que resume as características morfológicas de um dado local. Todavia, deve-se ser relacionada a outros aspectos microclimáticos, como ventilação e características morfológicas do local para uma análise apurada, assim como já apontados nos estudos de Svensson (2011), Chen *et al.* (2012), Middle *et al.* (2018), Dirksen *et al.* (2019) e Baghaeipoor e Nasrollahi (2019). Os resultados desta pesquisa acrescentam dados sobre um possível impacto no microclima a partir da verticalização no centro da cidade de Fortaleza, apontando problemas e potencialidades. Além disso, este trabalho é uma investigação que deve ser averiguada em diversas morfologias urbanas e climas. Dessa forma, é possível produzir novos dados que continuem a fomentar discussões e novas pesquisas subsidiando novos projetos e políticas públicas, que incluam a prática de pesquisa científica visando a melhoria do espaço urbano.

## 6.1 LIMITAÇÕES DE PESQUISA E PROSPECÇÕES A TRABALHOS FUTUROS

Apesar da crescente capacidade de processamento de dados dos computadores atuais, e de ter utilizado um processador com 24 núcleos de processamento, as simulações supracitadas do ENVI-met necessitaram de cerca de 240 horas (10 dias x 24 horas) para o cenário 3 e 840 horas de processamento (25 dias x 24 horas) para o cenário 3.1. Sendo o menor cenário em relação a perímetro, a simulação microclimática necessitou 35 dias para finalização, sem considerar o tempo de modelagem e preparo dos arquivos climáticos. Considerando as demais áreas, necessitou-se de cerca de 5.760 horas utilizando o software de estudante do referido simulador. Portanto, extrapolando o tempo efetivo de pesquisa para a dissertação.

Deve se atentar para as limitações de previsão dos softwares. A simulação realizada no ENVI-met não possuiu variância na velocidade e direção do ar durante o dia, o que poderia modificar os dados coletados. Além disso, considerou-se materiais homogêneos aplicados em todas as faces, fato que não se comprova na realidade face a pluralidade construtiva nas cidades. Não foi possível considerar os transeuntes, veículos automotores e seus poluentes, o que certamente modificariam os dados simulados. As simulações realizadas no ANSYS, por sua vez, não consideraram as trocas térmicas que certamente haveria em um ambiente urbano, bem como foram desconsideradas as massas arbóreas. Como foi apresentado, estas modificaram a intensidade do vento.



Portanto, para trabalhos futuros com a utilização deste software de simulação microclimática, aconselha-se maior coleta de dados *in loco* para a comparação e a utilização do software Envi-MET em seu modo *Science*, o qual permite a utilização total de todos os núcleos disponíveis no computador, assim, diminuindo o tempo de processamento dos dados. Para além disso, com a maior capacidade de processamento de dados, infere-se no uso do módulo *Full Force* deste programa, o qual permite a modificação a cada 30 minutos da temperatura do ar bem como seu sentido, assim sendo possível realizar uma simulação mais apurada.

Aconselha-se também a simulação de pelo menos 48h, para o entendimento mais apurado de intensificação e criação de ilhas de calor em diferentes cenários morfológicos e variados climas. Neste trabalho, foi indicado a importância das coberturas arbóreas para a regulação do microclima urbano. Todavia, ainda se faz necessário estudos específicos considerando a morfologia de diferentes espécies vegetais e suas devidas contribuições.

Neste sentido, ambos os softwares são amplamente utilizados para estudos e consultorias e apresentam resultados proporcionais e condizentes com a realidade quando utilizados dentro de métodos específicos. Portanto, face à complexidade intrínseca das formas urbanas, o ENVI-met e o ANSYS, mesmo com diversas simplificações, são motores de cálculo eficiente para previsão de dados microclimáticos (ACERO; ARRIZABALAGA, 2016), bem como o ANSYS sendo apresentado em diversos estudos urbanos e métodos (COST, 2004; HARRIES, 2005; PRATA, 2005; BRANDÃO, 2009; LEITE, 2015; COSTA FILHO, 2017).

## REFERÊNCIAS

- ACERO, Juan Angel; ARRIZABALAGA, Jon. Evaluating the performance of ENVI-met model in diurnal cycles for different meteorological conditions. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 131, n. 1-2, p. 455-469, jan. 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/309741645\\_Evaluating\\_the\\_performance\\_of\\_ENVI-met\\_model\\_in\\_diurnal\\_cycles\\_for\\_different\\_meteorological\\_conditions](https://www.researchgate.net/publication/309741645_Evaluating_the_performance_of_ENVI-met_model_in_diurnal_cycles_for_different_meteorological_conditions). Acesso em: 31 maio 2020.
- ACIOLY, Claudio; DAVIDSON, Forbes. **Densidade urbana: um instrumento de planejamento e gestão urbana**. Rio de Janeiro: Mauad, 1998.
- ALLARD, Francis; GHIAUS, Christian; SZUCS, Agota. Natural ventilation in high-density cities. *In*: NG, Edward (org.). **Designing high-density cities for social and environmental sustainability**. Londres: Earthscan, 2010.
- AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. The Discovery of Global Warming. **American Institute of Physics**, [s. l.], 1 jan. 2020. Disponível em: <https://history.aip.org/climate/timeline.htm>. Acesso em: 26 maio 2020.
- ASHRAE. **Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, refrigerating and air conditioning engineers**. [S. l.]: Atlanta, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS IMOBILIÁRIAS (ABRAINC). Déficit habitacional é recorde no País. **ABRAINC**, [s. l.], 7 jan. 2019. Disponível em: <https://www.abrainc.org.br/noticias/2019/01/07/deficit-habitacional-e-recorde-no-pais/>. Acesso em: 31 maio 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3: desempenho térmico de edificações residenciais - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-2 (2003): Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1991.
- BAGHAEIPOOR, Golnar; NASROLLAHI, Nazanin. The Effect of Sky View Factor on Air temperature in High-rise Urban Residential Environments. **Journal of Daylighting**, [s. l.], v. 6, p. 42-51, jun. 2019. Disponível em: <http://solarlits.com/jd/6-42>. Acesso em: 27 set. 2020.
- BARBIRATO, Gianna Melo; SOUZA, Léo Cristina Lucas de; TORRES, Simone Carnaúba. **Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos**. Maceió: EDUFAL, 2007.
- BITTENCOURT, Leonardo; CÂNDIDO, Christhina. **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2005.

BRANDÃO, Rafael Silva. **As interações espaciais urbanas e o clima**: incorporação das análises térmicas e energéticas no planejamento urbano. 2009. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em:

[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-23032010-093854/publico/Tese\\_BRANDAO2009\\_cr.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-23032010-093854/publico/Tese_BRANDAO2009_cr.pdf). Acesso em: 23 mar. 2020.

BRANDÃO, Rafael Silva. Urban microclimate. *In*: GONÇALVES, Joana Carla Soares; UMAKOSHI, Érica Mitie. **The environmental performance of tall buildings**. London: Earthscan, 2010.

BRUSE, Michael; FLEER, Heribert. On the simulating surface-plant-air interactions inside urban environments. **Environ. Modell. Softw.**, [s. l.], v. 13, n. 3-4, p. 373-384, 2008.

Disponível em: <https://www.mssanz.org.au/MODSIM97/Vol%201/Bruse.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2020.

BRUSE, Michael; FLEER, Heribert. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environ. Modell. Softw.**, [s. l.], v. 13, n. 3-4, p. 373-384, 1998. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815298000425>. Acesso em: 4 mar. 2020.

BSPAR INCORPORAÇÕES. **Imóveis**: empreendimento comercial. Fortaleza - CE, [2020]. Disponível em: <https://www.bspar.com.br/imoveis/bs-design/>. Acesso em: 4 mar. 2020.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE). **Principles of natural ventilation**. Garston: BRE, 1978. (Digest, n. 210).

CFX. **CFX 5 Solver Models**. Diddcot Oxfordshire: CFX, 2003.

CHANDLER, T. Jeff. **Urban climatology and its relevance to urban design**. Geneva: WMO, 1976.

CHAPMAN, Sarah *et al.* The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. **Landscape Ecol**, [s. l.], v. 32, p. 1921-1935, ago. 2017.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10980-017-0561-4#citeas>. Acesso em: 31 maio 2020.

CHEN, Kai *et al.* Air pollution reduction and mortality benefit during the COVID-19 outbreak in China. **Planetary Health**, [s. l.], v. 4, n. 6, p. 1-3, maio 2020. Disponível em: [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(20\)30107-8/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(20)30107-8/fulltext). Acesso em: 29 maio 2020.

CLIMATE. **Repository of free climate data for building performance simulation**. [S. l.], 2020. Disponível em:

[http://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_3\\_South\\_America/BRA\\_Brazil/index.html](http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html). Acesso em: 11 mar. 2020.

COLMEIA. **Humberto Santana Business**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.colmeia.com.br/empreendimentos/fortaleza/humbertosantana/>. Acesso em: 17 jun. 2020.

COST. **Cost Action 14**: recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. Brussels: COST, 2004.

COSTA FILHO, Amando C. **Rugosidade e porosidade do tecido urbano como critérios de análise qualitativa da ventilação natural em cidades litorâneas**. 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://goo.gl/VcKq5n>. Acesso em: 15 ago. 2018.

CÓSTOLA, Daniel. **Ventilação por ação do vento no edifício**: procedimentos para quantificação. 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-26102010-144530/pt-br.php>. Acesso em: 27 set. 2018.

CÓSTOLA, Daniel; ALUCCI, Márcia P.; ETHERIDGE, David. Caracterização de janelas do cálculo de vazão por meio do coeficiente de descarga. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2009, Natal. **Anais [...]**. Natal: ANTAC, 2009. Disponível em: <http://docplayer.com.br/80348444-Caracterizacao-de-janelas-no-calculo-de-vazao-por-meio-do-coeficiente-de-descarga.html>. Acesso em: 21 mar. 2020.

CRAWLEY, Drury B. Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? **ASHRAE 1998 TRANSACTIONS**, [s. l.], p. 1-18, 14 jan. 1998. Disponível em: [https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/weather/weather\\_files/whichweatherdatashouldyouuseforenergysimulations.pdf](https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/weather/weather_files/whichweatherdatashouldyouuseforenergysimulations.pdf). Acesso em: 31 maio 2020.

DIAS DE SOUSA CONSTRUÇÕES. **Surge o marco arquitetônico de Fortaleza**. Guararapes, [20--]. Disponível em: <https://diasdesousa.com.br/empreendimentos/wstc/>. Acesso em: 27 maio 2020.

DIRKSEN, Everett M. *et al.* Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. **Urban Climate**, [s. l.], v. 30, p. 1-10, dez. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095519300604>. Acesso em: 31 maio 2020.

DUARTE, Denise Helena Silva; SERRA, Geraldo Gomes. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e proposta de um indicador. **Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 7-20, abr./jun. 2003. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3447>. Acesso em: 31 maio 2020.

ENVI\_MET. **Árvores e vegetação**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.envi-met.com/trees-and-vegetation/>. Acesso em: 31 maio 2020.

FIALHO, Edson Soares. Ilha de calor: reflexões acerca de um conceito. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, ed. esp., p. 61-76, 2012. Disponível em: <https://revista.ufr.br/actageo/article/download/1094/867;ilha>. Acesso em: 21 maio 2020.

FORTALEZA. Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente. **Lei complementar nº 236, de 11 de agosto de 2017**: parcelamento, uso e ocupação do solo. Fortaleza - CE: Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2017. Disponível em: [https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/images/urbanismo-e-meio-ambiente/legislacao-municipal/lei\\_complementar\\_236\\_2017.pdf](https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/images/urbanismo-e-meio-ambiente/legislacao-municipal/lei_complementar_236_2017.pdf). Acesso em: 27 mar. 2020.

FREITAS, Ruskin Marinho de. **Entre mitos e limites**: as possibilidades do adensamento construtivo face à qualidade de vida no ambiente urbano. 2005. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2005. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6771>. Acesso em: 31 maio 2020.

GALDIES, Charles; LAU, Hok Sin. Urban heat island effect, extreme temperatures and climate change: a case study of Hong Kong SAR. *In*: LEAL FILHO, W. *et al.* **Climate change, hazards and adaptation options**. Springer: Cham, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/339281978\\_Urban\\_Heat\\_Island\\_Effect\\_Extreme\\_Temperatures\\_and\\_Climate\\_Change\\_A\\_Case\\_Study\\_of\\_Hong\\_Kong\\_SAR](https://www.researchgate.net/publication/339281978_Urban_Heat_Island_Effect_Extreme_Temperatures_and_Climate_Change_A_Case_Study_of_Hong_Kong_SAR). Acesso em: 31 maio 2020.

GALERIA DA ARQUITETURA. **Centurion**. [S. l.], [2016]. Disponível em: [https://www.galeriadaarquitetura.com.br/projeto/novaes-arquitetura\\_/centurion/408](https://www.galeriadaarquitetura.com.br/projeto/novaes-arquitetura_/centurion/408). Acesso em: 21 jun. 2020.

GALVANI, Emerson. Ocorrência de inversão térmica no perfil topoclimático do Pico da Bandeira, Parque Nacional do Alto Caparaó, Brasil. *In*: SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA, 6.; SEMINÁRIO IBERO AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA, 2., 2010, Coimbra. **Anais [...]**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2010. Disponível em: [http://lcb.fflch.usp.br/sites/lcb.fflch.usp.br/files/upload/paginas/INVERSAO\\_TERMICA\\_NO\\_PERFIL\\_PICO\\_DA\\_BANDEIRA.pdf](http://lcb.fflch.usp.br/sites/lcb.fflch.usp.br/files/upload/paginas/INVERSAO_TERMICA_NO_PERFIL_PICO_DA_BANDEIRA.pdf). Acesso em: 27 maio 2020.

GARRATT, J. R. **The atmospheric boundary layer**. [S. l.]: Cambridge, 1992.

GEIGER, Rudolf. **Manual de climatologia**: o clima da camada de ar junto ao solo. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1961.

GIVONI, Baruch. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: John Wiley and Sons, 1994.

GOLANY, Gideon S. Urban design morphology and thermal performance. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 455-465, fev. 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231095002669>. Acesso em: 21 jun. 2020.

GONÇALVES, Joana Carla Soares. **A sustentabilidade do edifício alto**: uma geração de edifícios altos e sua inserção urbana. 2003. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) -

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.  
Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001343054>. Acesso em: 23 maio 2020.

GONÇALVES, Joana Carla Soares; BODE, Klaus (org.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

GUPTA, Vinod. **Thermal efficiency of building clusters: an index for non airconditioned buildings in hot climates**. New Delhi - IN: School of Planning and Architecture, 1987.

HALIPAH, Ibraim Siti *et al.* The impact of road pavement on Urban Heat Island (UHI) Phenomenon. **International Journal of Technology**, [s. l.], v. 9, n. 8, p. 1-12, dez. 2018.

Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/330008343\\_The\\_Impact\\_of\\_Road\\_Pavement\\_on\\_Urban\\_Heat\\_Island\\_UHI\\_Phenomenon](https://www.researchgate.net/publication/330008343_The_Impact_of_Road_Pavement_on_Urban_Heat_Island_UHI_Phenomenon). Acesso em: 31 maio 2020.

HARRIES, Alan. **Notas de aula**. In: WORKSHOP: CFX – FAU-USP. São Paulo: [s. n.], 2005.

HEAVISIDE C.; VARDOULAKIS S.; CAI, XM. Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK. **Environ Health**, [s. l.], v. 15, n. 27, 2016. Disponível em: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-016-0100-9>. Acesso em: 27 maio 2020.

HUI, Sam C. M. Low energy building design in high density urban cities. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 24, n. 3-4, p. 627-640, 2001. Disponível em:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.200.2548&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 21 maio 2020.

HUTTNER, Sebastian; BRUSE, Michael; DOSTAL, Paul. Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities. **5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology**, [s. l.], p. 307-312, out. 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/237304053\\_Using\\_ENVI-met\\_to\\_simulate\\_the\\_impact\\_of\\_global\\_warming\\_on\\_the\\_microclimate\\_in\\_central\\_European\\_cities](https://www.researchgate.net/publication/237304053_Using_ENVI-met_to_simulate_the_impact_of_global_warming_on_the_microclimate_in_central_European_cities). Acesso em: 25 mar. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação brasileiros com data de referência 1º de julho de 2019**. Brasília - DF: IBGE, 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101662.pdf>. Acesso em: 23 maio 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas**. Brasília - DF, 1961-2010. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/servicos/normais-climatol%C3%B3gicas>. Acesso em: 20 jan. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas**. Brasília - DF, 2009. Disponível em:

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 30 maio 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global CO<sub>2</sub> emissions in 2019**. [S. l.], 11 fev. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>. Acesso em: 31 maio 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2018**. [S. l.], nov. 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>. Acesso em: 21 jun. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7726: 1998** - Ergonomics of thermal environment - Instruments for measuring physical quantities. Geneva: ISO, 1998.

IRABI, Matheus Martins de Araújo; SILVA, Kamila Madureira da; VIEIRA, Alexandre Berbamin. A territorialização das políticas públicas no município de Dourados - MS: o caso da setorização do PMCMV e o SUS. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE GESTÃO, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO*, 3., 2019, Naviraí - MS. **Anais [...]**. Naviraí - MS: UFMS, 2019. Disponível em: [https://periodicos.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/view/8715/pdf\\_293](https://periodicos.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/view/8715/pdf_293). Acesso em: 31 maio 2020.

IZARD, Jean-Louis *et al.* **Morphologie, végétal et microclimat urbains**: cas d'Aix-en-Provence et Nîmes. Marcelha: Groupe ABC, Ecole d'Architecture de Marseille-Luminy, 1997.

JACOBS, Cor *et al.* Are urban water bodies really cooling? **Urban Climate**, [s. l.], v. 32, jun. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095519301002>. Acesso em: 17 mar. 2020.

JOHNSON, I. D.; WATSON, I. D. The determination of view-factors in urban canyons. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, [s. l.], v. 23, p. 329-335, 1984. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/jamc/article/23/2/329/352640/The-Determination-of-View-Factors-in-Urban-Canyons>. Acesso em: 31 jul. 2020.

KATZCHNER, L. Urban climate studies as tools for urban planning and architecture. *In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 4., 1997, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: FAUFBA/LACAM-ANTAC, 1997.

KHAN, Ansar *et al.* City-scale Modeling of Urban Heat Islands for Kolkata. *In: LEAL FILHO, W. et al. Climate change, hazards and adaptation options*. Springer: Cham, 2020. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37425-9\\_20](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37425-9_20). Acesso em: 27 maio 2020.

KÖPPEN-GEIGER. **Mapas mundiais de classificação climática Köppen-Geiger**. [S. l.], 2019. Disponível em: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>. Acesso em: 14 nov. 2020.

LAMBERTS, Roberto *et al.* **Desempenho térmico de edificações**. Santa Catarina: UFSC, 2016. Disponível em: [http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161\\_v2016.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf). Acesso em: 28 jan. 2020.

LANDSBERG, Helmut Erich. **The urban climate**. New York: Academic Press, 1981.

LEITE, Carlos. **Cidades sustentáveis, cidades inteligentes**: desenvolvimento sustentável num planeta urbano. Porto Alegre: Bookman, 2012.

LEITE, Renan Cid Varela. **Cidade, vento, energia**: limites de ampliação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-15072015-142805/publico/TESE\\_RENAN\\_ALTERAcoES.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-15072015-142805/publico/TESE_RENAN_ALTERAcoES.pdf). Acesso em: 23 maio 2020.

LEITE, Renan Cid Varela. **Fortaleza**: terra do vento a influência da mudança de padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido. 2010. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-10012011-111509/pt-br.php>. Acesso em: 21 mar. 2020.

LEITE, Renan Cid Varela; FROTA, Anésia Barros; NAZARETH, Samuel B. M. A Influência da Densificação Urbana sobre o conforto térmico no interior de apartamentos residenciais. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 15., 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa - PB: USP, 2019. Disponível em: [https://www.fau.usp.br/arquivos/informativo/Informativo%2024\\_Final1.pdf](https://www.fau.usp.br/arquivos/informativo/Informativo%2024_Final1.pdf). Acesso em: 18 jun. 2020.

LI, Danny H. W.; WONG, S. L. Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings. **Applied Energy**, [s. l.], v. 84, n. 12, p. 1199 -1209, dez. 2007. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v84y2007i12p1199-1209.html>. Acesso em: 18 jun. 2020.

LIU, Ana. **Diretrizes para projetos de edifícios de escritórios**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19102010-163058/publico/Dissertacao\\_Ana\\_Wansul\\_Liu.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19102010-163058/publico/Dissertacao_Ana_Wansul_Liu.pdf). Acesso em: 27 mar. 2020.

LIU, Yuan *et al.* Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. **Nature** **582**, [s. l.], p. 558-560, abr. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2271-3>. Acesso em: 11 maio 2020.

LOMBARDO, Magda. **Ilha de calor nas metrópoles**: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hecitec, 1985.

LOPES, Antonio M. S. **Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano**: vento, ilha de calor de superfície e balanço energético. 2003. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003. Disponível em: <http://edicoes-ceg.vitraldigital.com/publicacao.asp?id=382&lang=en>. Acesso em: 21 maio 2020.

LORENZI, Harri. **Árvores brasileiras e manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 7. ed. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos de Flora, 2016.



MACIEL, Carolina. **Condições microclimáticas de espaços abertos**: simulação de estratégias por meio do software ENVI-MET. 2014. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Universidade Federal do Mato Grosso, Mato Grosso, 2014. Disponível em: <http://pgfa.ufmt.br/index.php/br/utilidades/arquivos/banco-de-teses-do-programa/300-carolina-de-rezende-maciel-1/file>. Acesso em: 26 fev. 2020.

MAKVANDI, Mehdi *et al.* The Interactive Impact of Building Diversity on the Thermal Balance and Micro-Climature Change under the Influence of Rapid Urbanization. **Sustainability**, [s. l.], p. 1-20, mar. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/6/1662>. Acesso em: 5 maio 2020.

MARTINS, D. J. *et al.* Ensaio sobre a utilização da automação de aberturas na simulação do desempenho térmico de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2009, Natal. **Anais [...]**. Natal: ANTAC, 2009.

MASCARÓ, Lúcia (coord.). **Estudo da influência do adensamento da cidade de Porto Alegre na ventilação urbana**. Porto Alegre: UFRGS, 1996.

MASCARÓ, Lúcia. **Energia na edificação**: energia para minimizar seu consumo. São Paulo: Projetos editores associados, 1985.

MIANA, Anna Christina. **Adensamento e forma urbana**: inserção de parâmetros ambientais no processo de projeto. 2010. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-19012011-092832/publico/TESE\\_MIANA.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-19012011-092832/publico/TESE_MIANA.pdf). Acesso em: 31 maio 2020.

MIDDEL, Ariane *et al.* Sky View Factor footprints for urban climate modeling. **Urban Climate**, [s. l.], v. 25, p. 120-134, set. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095518301883>. Acesso em: 11 maio 2020.

MOHAJERANI, Abbas; BAKARIC, Jason; JEFFREY-BAILEY, Tristan. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 197, p. 522-538, jul. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479717303201?via%3Dihub>. Acesso em: 11 maio 2020.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: USP, 1976.

MONTEIRO, Carlos Augusto Figueiredo; MENDONÇA, Francisco. **Clima urbano**. São Paulo: Contexto, 2003.

MOURA, Marcelo de Oliveira. **O clima urbano de Fortaleza sob o nível do campo térmico**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/8232>. Acesso em: 23 maio 2020.

NAÇÕES UNIDAS. **Emissões de gás carbônico do setor de construção chegaram a 76 gigatoneladas em 2010-2016.** [S. l.], 20 dez. 2017. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/emissoes-de-gas-carbonico-do-setor-de-construcao-chegaram-a-76-gigatoneladas-em-2010-2016/>. Acesso em: 21 maio 2019.

NAZARETH, Samuel Bertrand *et al.* A volumetria edificada e seus impactos na ventilação natural urbana: um estudo de caso em Fortaleza, Ceará. *In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 15., 2019, João Pessoa - PB. **Anais [...]**. João Pessoa - PB: ANTAC, IESP, 2019. Disponível em: <https://www.even3.com.br/encac2019/>. Acesso em: 27 mar. 2020.

NICHOL, Janet; HANG, To Pui; NG, Edward. Temperature projection in a tropical city using remote sensing and dynamic modeling. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 42, p. 2921-2929, maio 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00382-013-1748-2#citeas>. Acesso em: 31 maio 2020.

NÚÑEZ, Maxmiliano; OKE, Timothy R. The Energy Balance of an Urban Canyon. **Journal of Applied Meteorology**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 11-19, jan. 1977. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/260784082\\_The\\_Energy\\_Balance\\_of\\_an\\_Urban\\_Canyon](https://www.researchgate.net/publication/260784082_The_Energy_Balance_of_an_Urban_Canyon). Acesso em: 11 maio 2020.

NUNZIO, Antonello D. Dragonfly. **GitHub**, [s. l.], 2019. Disponível em: [https://github.com/AntonelloDN/df\\_envimet](https://github.com/AntonelloDN/df_envimet). Acesso em: 10 mar. 2020.

OKE Timothy R. Towards better scientific communication in urban climate. **Theoretical and applied climatology**, Viena, v. 84, n. 1-3, p. 179-190, 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/226281190\\_Towards\\_Better\\_Scientific\\_Communication\\_in\\_Urban\\_Climate](https://www.researchgate.net/publication/226281190_Towards_Better_Scientific_Communication_in_Urban_Climate). Acesso em: 18 maio 2020.

OKE, Timothy R. **Boundary Layer Clima**. 2. ed. London: Methuen, 1987.

OKE, Timothy R. **Boundary Layer Climates**. Londres: Methuen, 1978.

OKE, Timothy R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. **Royal Meteorological Society**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 237-254, jul./set. 1981. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.3370010304>. Acesso em: 11 maio 2020.

OKE, Timothy R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 7, n. 8, p. 769-779, ago. 1973. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0004698173901406?via%3Dihub>. Acesso em: 31 maio 2020.

OKE, Timothy R. *et al.* The Energy balance of Central Mexico City During the Dry Season. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 33, n. 24-25, p. 3919-3930, out. 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135223109900134X>. Acesso em: 21 maio 2020.

OKE, Timothy R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 11, n. 1-3, p. 103-113, mar. 1988. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0378778888900266>. Acesso em: 11 maio 2020.

OLIVEIRA, Marcos José de *et al.* Ciclos climáticos e causas naturais das mudanças do clima. **Terræ Didática**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 149-184, 2017. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/TED/article/view/13185#:~:text=A%20peri%C3%B3dica%20mudan%C3%A7a%20clim%C3%A1tica%20na,de%20fatores%20terrestres%20e%20astron%C3%B4micos.&text=Ciclos%20clim%C3%A1ticos%20de%20per%C3%ADodos%20m%C3%A9dios,grandes%20planetas%20do%20Sistema%20Solar>. Acesso em: 21 maio 2020.

OLIVEIRA, Paulo Marcos. **Cidade apropriada ao clima: a forma urbana como instrumento de controle do clima urbano**. Brasília - DF: UnB, 1988.

OXFORD ADVANCED LEARNER'S DICTIONARY. **Vortex**. Oxford, 1 set. 2018. Disponível em: [https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/american\\_english/vortex](https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/american_english/vortex). Acesso em: 11 maio 2020.

PENG, Lei *et al.* Wind weakening in a dense high-rise city due to over nearly five decades of urbanization. **Building and Environment**, [s. l.], v. 138, p. 207-220, jul. 2018. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318302488?casa\\_token=kywgg6-9ukAAAAAA:nODXFHK-bfbF9M5MKTt4T\\_nrz2yYy39t-irWORFf6ttuvxUKn8knzBavPJbPzLi8ryIQg1CifVo](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318302488?casa_token=kywgg6-9ukAAAAAA:nODXFHK-bfbF9M5MKTt4T_nrz2yYy39t-irWORFf6ttuvxUKn8knzBavPJbPzLi8ryIQg1CifVo). Acesso em: 5 maio 2020.

PEREIRA, Enio *et al.* Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. **Solar Energy**, [s. l.], v. 68, n. 1, p. 91- 107, mar. 2000. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/222545978\\_Effects\\_of\\_burning\\_of\\_biomass\\_on\\_satellite\\_estimations\\_of\\_solar\\_irradiation\\_in\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/222545978_Effects_of_burning_of_biomass_on_satellite_estimations_of_solar_irradiation_in_Brazil). Acesso em: 18 mar. 2020.

PERKINS, Sid. Core Concept: Albedo is a simple concept that plays complicated roles in climate and astronomy. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 116, n. 51, p. 253639-25371, dez. 2019. Disponível em: <https://www.pnas.org/content/116/51/25369>. Acesso em: 19 mar. 2020.

PIQUET, Jean. **Turbulent flows: models and Physics**. 2. ed. rev. [S. l.]: Spriger, 1999.

PORTO, Fabrício. Centurion. **Galeria da Arquitetura**, [s. l.], [2016]. Disponível em: [https://www.galeriadaarquitetura.com.br/projeto/novaes-arquitetura\\_/centurion/408](https://www.galeriadaarquitetura.com.br/projeto/novaes-arquitetura_/centurion/408). Acesso em: 8 mar. 2020.

PRATA, Alessandra Rodrigues. **Impacto de altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. 2005. Tese (Doutorado em Tecnologia de Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16131/tde-20012010-113103/en.php>. Acesso em: 21 mar. 2020.

PRATA, Ligia *et al.* A influência da mudança em padrões de ocupação do solo sobre as condições ambientais urbanas: o caso do Poço da Draga, em Fortaleza-CE. *In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 15., 2019, João Pessoa - PB. **Anais [...]**. João Pessoa - PB: ANTAC, IESP. Disponível em: <https://www.even3.com.br/encac2019/>. Acesso em: 27 mar. 2020.

PRATA-SHIMOMURA, Alessandra Rodrigues. **Relatório 3**. São Paulo: FAPESP, 2010.

RIBEIRO, Nair; RUFINO, Iana Alexandra A.; MORAIS, Juliana M. S. Costa. Simulação de ventilação natural em maio urbano: o caso dos edifícios monolíticos largamente usados no "programa minha casa minha vida. *In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 15., 2019, João Pessoa - PB. **Anais [...]**. João Pessoa - PB: ANTAC, IESP. Disponível em: <https://www.even3.com.br/encac2019/>. Acesso em: 27 mar. 2020.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhino 6 Features**. [S. l.], 1 jan. 2019. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/6/features>. Acesso em: 10 mar. 2020.

ROMERO, Marta Adriana B. **A arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília - DF: UnB, 2001.

ROMERO, Marta Adriana B. Correlação entre o microclima urbano e a configuração do espaço residencial de Brasília. **Fórum Patrimônio**, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 9-22, 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/306352461\\_Correlacao\\_entre\\_o\\_microclima\\_e\\_a\\_configuracao\\_do\\_espaco\\_residencial\\_de\\_Brasilia](https://www.researchgate.net/publication/306352461_Correlacao_entre_o_microclima_e_a_configuracao_do_espaco_residencial_de_Brasilia). Acesso em: 20 jul. 2020.

ROMERO, Marta Adriana B. **Princípios Bioclimáticos para o desenho urbano**. 2. ed. São Paulo: ProEditores, 2000.

RUIZ, M. *et al.* Suitable configurations for forested urban canyons to mitigate the UHI in the city of Mendoza, Argentina. **Urban Climate**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 197-212, dez. 2015. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095515000206?casa\\_token=R6ZG4WNnJjQAAAAA:OVI59CWb-Y5dtgdUKuieJZEfiyykiToZGv5JoBhj\\_WlvcMTop6tjattsaxdVpeYMxTGzNZvBm8c](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095515000206?casa_token=R6ZG4WNnJjQAAAAA:OVI59CWb-Y5dtgdUKuieJZEfiyykiToZGv5JoBhj_WlvcMTop6tjattsaxdVpeYMxTGzNZvBm8c). Acesso em: 5 maio 2020.

SANTAMOURIS, M. *et al.* On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. **Solar Energy**, [s. l.], v. 70, n. 3, p. 201-216, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X00000955#:~:text=Calculations%20based%20on%20urban%20climatic,buildings%20located%20in%20suburban%20areas.&text=Compared%20to%20the%20air%20flow,reduced%20to%2010%20times>. Acesso em: 8 mar. 2020.

SECRETARIA DE CULTURA (SECULT). **Bens Tombados**. Fortaleza - CE, 4 jan. 2013. Disponível em: <https://www.secult.ce.gov.br/category/patrimonio-cultural/bens-tombados-fortaleza/>. Acesso em: 21 maio 2020.

SHARAG, Eldin. **Predicting Natural Ventilation in Residential Buildings in the Context of Urban Environments**. 1998. Tese (Ph. D.) - University of California, Berkeley, 1998. Disponível em: <http://escholarship.org/uc/item/3hg066qm>. Acesso em: 29 ago. 2018.

STEWART, Ian; OKE, Tim. Newly developed “thermal climate zones” for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. **Preprints**, [s. l.], p. 11–15, jan. 2009. Disponível em: [https://www.ams.confex.com/ams/89annual/techprogram/paper\\_150476.htm](https://www.ams.confex.com/ams/89annual/techprogram/paper_150476.htm). Acesso em: 31 maio 2020.

STEYN, Douw G. The calculation of view factors from fisheye-lens photographs. **Atmos-Ocean**, [s. l.], v. 3, n. 18, p. 245-258, 1980. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07055900.1980.9649091>. Acesso em: 21 maio 2020.

STRØMANN-ANDERSEN, Jakob; SATTRUP, Peter Andreas. The urban canyon and building energy use: urban density versus daylight and passive solar gains. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 8, p. 2011-2020, ago. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811001605>. Acesso em: 5 maio 2020.

SVENSSON, Marie K. Sky View Factor analysis - implications for urban air temperature differences. **Meteorological Applications**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 201-211, dez. 2006. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1017/S1350482704001288>. Acesso em: 31 maio 2020.

THE EUROPEAN UNION. **Eurocode 1: actions on structures - Part 1-4: general actions - Wind actions**. Bruxelas: CEN, 2005. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.4.2005.pdf>. Acesso em: 21 maio 2020.

TSOKA, Sophia; TSIKALOUKAKI, A.; THEODOSIOU, Theodore. Analyzing the ENVI-met microclimate model’s performance and assessing cool materials and urban vegetation applications-a review. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 43, p. 55-76, nov. 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/327080886\\_Analyzing\\_the\\_ENVI-met\\_microclimate\\_model's\\_performance\\_and\\_assessing\\_cool\\_materials\\_and\\_urban\\_vegetation\\_applications-A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/327080886_Analyzing_the_ENVI-met_microclimate_model's_performance_and_assessing_cool_materials_and_urban_vegetation_applications-A_review). Acesso em: 6 mar. 2020.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. 2019 Global Status Report for Buildings and Construction: towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. **Global Alliance for Buildings and Construction**, [s. l.], 22 jan. 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/sites/default/files/2020-03/GSR2019.pdf>. Acesso em: 5 maio 2020.

UNITED NATIONS POPULATION FUND (UNFPA). **Population dynamics in the least developed countries: challenges and opportunities for development and poverty reduction**. United Nations. New York: UNFPA, 2011.

UNITED NATIONS POPULATION FUND (UNFPA). **World urbanization prospects: the 2009 revision**. New York: UNFPA, 2010.

ZENG, Liyue *et al.* A fast approach for large-scale Sky View Factor estimation using street view images. **Building and Environment**, [s. l.], v. 135, p. 74-84, maio 2018. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318301380?casa\\_token=2N8PI6d0j5kAAAAA:HcpytpbGrE8WQNfCSl\\_Viw2SAtCJvPt-i3r2UqiKyZk2qK3vqJkLjtgRYGT-HW53YO3jeAmW0S0](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318301380?casa_token=2N8PI6d0j5kAAAAA:HcpytpbGrE8WQNfCSl_Viw2SAtCJvPt-i3r2UqiKyZk2qK3vqJkLjtgRYGT-HW53YO3jeAmW0S0). Acesso em: 31 maio 2020.

ZHAO, C. *et al.* Urban Planning indicators, morphology and climate indicators: a case study of north-south transect of Beijing, China. **Building and Environment**, [s. l.], v. 46, n. 5, p. 1174-1183, maio 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132310003616>. Acesso em: 18 maio 2020.