

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO - FAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
DOUTORADO CIDADES

RAFFAELA GERMANO DE LIMA

**O IMPACTO DOS PARÂMETROS URBANÍSTICOS NO DESEMPENHO DA
VENTILAÇÃO NATURAL URBANA: O CONTROLE DA OCUPAÇÃO DO SOLO A
PARTIR DOS RECUOS PROGRESSIVOS**

Maceió
2019

RAFFAELA GERMANO DE LIMA

**O IMPACTO DOS PARÂMETROS URBANÍSTICOS NO DESEMPENHO DA
VENTILAÇÃO NATURAL URBANA: O CONTROLE DA OCUPAÇÃO DO SOLO A
PARTIR DOS RECUOS PROGRESSIVOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do grau de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Salazar Bittencourt.

Maceió
2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

L732i Lima, Raffaella Germano de.

O impacto dos parâmetros urbanísticos no desempenho da ventilação natural urbana: o controle da ocupação do solo a partir dos recuos progressivos / Raffaella Germano de Lima. – 2020.

211 f. : il. : figs. ; grafs. ; tabs. color.

Orientador: Leonardo Salazar Bittencourt.

Tese (doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2019.

Bibliografia. f. 187-199.

Apêndices: f. 200-211.

1. Ventilação natural. 2. Porosidade. 3. Recuos progressivos. 4 Pilotis. I. Título.

CDU: 72: 697.921.2

RAFFAELA GERMANO DE LIMA

O IMPACTO DOS PARÂMETROS URBANÍSTICOS NO DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL URBANA: o controle da ocupação do solo a partir dos recuos progressivos

Tese apresentada à banca de Defesa do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração em Cidades, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em: 05/12/2019.

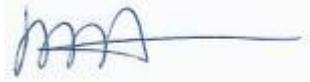
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Leonardo Salazar Bittencourt – UFAL
Orientador



Prof.ª Dr.ª Claudia Mariz de Lyra Barroso Krause – UFRJ
Examinadora externa



Prof.ª Dr.ª Virgínia Maria Dantas de Araújo – UFRN
Examinadora externa



Prof.ª Dr.ª Juliana Oliveira Batista – UFAL
Examinador interno



Prof. Dr. Ricardo Victor Rodrigues Barbosa – UFAL
Examinador interno

À Alice e Arthur, minhas maiores fontes de inspiração!

AGRADECIMENTOS

Ao Carlinhos, meu amor, companheiro e amigo, que vivenciou e dividiu comigo todas as fases dessa longa e tortuosa jornada! Meu maior incentivador para começar e principalmente finalizar o doutorado. Muito obrigada por se fazer presente na minha vida e suprir minhas ausências em alguns momentos com os nossos filhos!

À Alice, minha princesinha, que do seu jeito entendia a importância deste trabalho para as nossas vidas! E que sem o seu amor e incentivo nada faria sentido!

Ao Arthur, que veio na hora marcada por Deus e fez desse momento ainda mais desafiador, mas acima de tudo, trouxe mais amor e alegria para a minha vida!

À minha mãe, por tanto me ajudar com o meu Arthur, sem a qual a escrita desta tese seria impossível. A senhora é uma das principais responsáveis por todas as minhas conquistas!

Aos meus irmãos, Lucas e Gustavo, por respeitarem o meu momento e entenderem as minhas ausências.

Às minhas Chicas lindas, pela amizade e por tornar esse momento mais leve! Em especial à Gabi, por todas as nossas conversas e troca de ideias.

Às minhas amigas, Jussara e Camila, pela amizade e incentivo.

Ao meu orientador, Leonardo Bittencourt, por todos os ensinamentos, atenção e confiança.

Aos professores examinadores: Juliana Oliveira, Ricardo Victor Barbosa, Cláudia Krause e Virgínia Araújo, pelas valiosas contribuições.

Ao professor Christiano Cantarelli, pelos ensinamentos com a parte da estatística.

Aos colegas do doutorado, por dividirem comigo as dificuldades e conquistas.

Ao GECA - Grupo de Estudos em Conforto Ambiental, por todas as amizades, descobertas e aprendizados ao longo da minha formação acadêmica. E a todos os seus membros, em especial à Melina e Alexandre Sacramento por muito me ajudarem com o uso da ferramenta *Phoenics*.

À CAPES e FAPEAL, pelo suporte financeiro à pesquisa.

Ao IFAL, por garantir a minha dedicação a este trabalho, concedendo-me a licença para capacitação.

A Deus por me mostrar que tudo isso seria possível, enchendo-me de forças quando eu nem sabia que as tinha, acalmando meu coração nos momentos de maiores angústias e agraciando-me com bençãos, para me mostrar que a vida é bem maior!

RESUMO

Regiões de clima quente úmido, como a cidade de Maceió-AL, apresentam pequenas flutuações diárias de temperatura do ar e alta umidade. Para a obtenção de um melhor desempenho térmico, as construções devem evitar ganhos de calor e dissipar o calor produzido internamente, assim como o absorvido pela envoltória. A ventilação natural exerce função fundamental para essa dissipação de calor. O objetivo geral desta pesquisa de doutorado é investigar o efeito da porosidade da malha urbana a partir de diferentes recuos progressivos, associados a outros parâmetros urbanísticos e o seu impacto na ventilação natural, para o contexto da cidade de Maceió-AL. Buscou-se investigar sete adaptações da fórmula de cálculo dos recuos progressivos existentes na legislação urbanística de Maceió. Para tal, analisou-se comparativamente o desempenho da ventilação natural em diferentes cenários criados de acordo com parâmetros estabelecidos pela legislação, bem como em cenários propostos a partir da utilização máxima do coeficiente de aproveitamento do terreno e evitando-se o controle da altura do gabarito. Para isso foram realizadas simulações de modelos computacionais em ambiente CFD, com o programa *Phoenix 2018 v1.0*. Foram simulados 32 modelos construtivos, com ângulo de incidência do vento normal à malha (90°) ou oblíqua a mesma (135°), que representam a duas direções predominantes de incidência de vento da região. Além disso, considerou-se a existência ou não do pilotis no partido arquitetônico. Análises estatísticas também foram desenvolvidas a fim de identificar as variáveis de maior impacto para a ventilação natural. Os resultados indicaram que os cenários urbanos modelados apresentaram-se bastantes sensíveis à orientação do vento, sendo a incidência oblíqua (135°) à malha edificada a que promoveu as máximas velocidades do vento. O efeito em seção do pilotis esteve condicionado ao local onde foram situados os pontos de medição, uma vez que a presença do seu trecho de área construída afetou os resultados das velocidades do vento. Por fim, verificou-se que o aumento da porosidade da malha urbana a partir do dimensionamento dos afastamentos resultou em melhoras significativas da ventilação natural, principalmente ao nível do pedestre. E a sua relação com maiores alturas dos edifícios denotaram também melhor desempenho, principalmente nas regiões mais distantes do solo.

Palavras-chave: Ventilação natural. Porosidade. Recuos progressivos. Pilotis.

ABSTRACT

Regions of hot humid climate, such as Maceió-AL, present small daily fluctuations of air temperature and high humidity. For best thermal performance, buildings should avoid heat gain and dissipate heat produced internally as well as the heat absorbed by the envelope. Natural ventilation plays a fundamental role in this heat dissipation. The general objective of this doctoral research is to investigate the effect of the porosity of the urban mesh from different progressive recoils, associated with other urbanistic parameters and its impact on natural ventilation, for the context of Maceió-AL. We sought to investigate seven adaptations of the calculation formula of progressive recoils existing in the urban legislation of Maceió. For this purpose, the performance of natural ventilation was analyzed comparatively in different scenarios created according to parameters established by the legislation, as well as in scenarios proposed based on the maximum utilization of the land use coefficient and avoiding the control of the height of the site template. For this, simulations of computational models were performed in CFD environment, with the program Phoenics 2018 v1.0. Thirty-two construction models were simulated, with normal wind incidence angle (90 °) or oblique (135 °), representing the two prevailing wind incidence directions of the region. In addition, the existence or not of the pilotis in the architectural party was considered. Statistical analyzes were also developed to identify the most impacting variables for natural ventilation. The results indicated that the modeled urban scenarios were quite sensitive to wind orientation, and the oblique incidence (135 °) to the built mesh promoted the maximum wind speeds. The sectioned effect of the pilotis was conditioned to where the measuring points were located, as the presence of its built-up area affected the wind speed results. Finally, it was found that the increased porosity of the urban mesh from the dimensioning of the distances resulted in significant improvements in natural ventilation, especially at pedestrian level. And its relationship with higher building heights also showed better performance, especially in the most distant regions of the ground.

Keywords: Natural ventilation. Porosity. Progressive recoils. Pilotis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edifícios sem recuos laterais.....	23
Figura 2 - Trecho do bairro da Jacarecica - litoral Norte de Maceió.....	24
Figura 3 - Classe tipológica 3.....	25
Figura 4 - Classe tipológica 4.....	25
Figura 5 - Quadra de referência como unidade mínima de projeto e mais oito quadras no entorno imediato.....	30
Figura 6 - Três zonas formadas no escoamento do vento.....	33
Figura 7: Fluxo com rugosidade isolada.....	34
Figura 8: Fluxo com interferência de esteira.....	34
Figura 9: Fluxo turbulento.....	34
Figura 10 - Níveis das camadas urbanas.....	38
Figura 11 - Princípio da aderência.....	39
Figura 12 - Gradiente do vento para diferentes configurações de áreas.....	40
Figura 13 - Esquema da mudança de direção em virtude da ilha de calor.....	41
Figura 14 - Definição das dimensões de superfícies utilizadas como medida de densidade urbana.....	42
Figura 15 - Exemplo de cálculo da área frontal em (a) método tradicional - negligenciando a elevação do terreno, (b) modificado.....	43
Figura 16 - Efeito do perfil da encosta no padrão de vento.....	48
Figura 17 - Vento Anabático. A circulação é no sentido anti-horário no lado esquerdo da montanha e no sentido horário no lado direito da montanha.....	48
Figura 18 - Perfis esquemáticos do fluxo do vento na parede e na inclinação do terreno. (a) ilustração 3D; (b) ilustração 2D.....	50
Figura 19 - Modelo esquemático para avaliar a ventilação em região montanhosa.....	51
Figura 20 - Distribuição da temperatura do ar. a) Edifícios de 10 metros; b) Edifícios de 20 metros; c) Edifícios de 60 metros; d) Edifícios de 100 metros.....	51
Figura 21 - Renovação do ar. a) Edifícios de 10 metros; b) Edifícios de 20 metros; c) Edifícios de 60 metros; d) Edifícios de 100 metros.....	52
Figura 22: (a) Diagrama esquemático do programa de rastreamento de partículas de fluidos. (b) Um dos casos de verificação do modelo de rastreamento de partículas fluidas (vista superior).....	53
Figura 23: Variação de altura dos edifícios.....	53
Figura 24 - Perfil vertical do cânion urbano representando a relação H/W (a); e visão tridimensional do cânion com destaque para as áreas consideradas para o cálculo do comprimento de rugosidade (b).....	55
Figura 25 - Nove modelos projetados para testar os efeitos de diferentes morfologias de construção no desempenho da ventilação natural.....	55
Figura 26 - Três estágios do procedimento de otimização do projeto.....	57
Figura 27 - Comparação da corrente de ar: (a) construção otimizada; B) Edifício convencional 1; e (c) Edifício Convencional 2.....	58

Figura 28 - a) Esquema blocos pontuais; b) blocos laminares; c) Arranjo aleatório de bloco pontual; d) Arranjo estratificado de bloco pontual.....	61
Figura 29 - Planos de layout (a) sem disposição e (b) com disposição, (c) mostrando diferentes níveis de disposição.	62
Figura 30 - Variáveis de simulação.	63
Figura 31 - Modelos propostos por Bittencourt; Cruz e Lôbo.	64
Figura 32 - Modelos de simulação de Marques, 2003.....	65
Figura 33 - Gráfico das médias das velocidades máximas dos ventos em cada modelo.....	65
Figura 34 - Cenários propostos. a) situação atual; b) PD de 1984; c) PD de 1994; d) PD de 1999.	66
Figura 35 - Nós e elementos presentes em uma malha de simulação CFD.....	71
Figura 36 - Módulos que compõem o Phoenics.	72
Figura 37 - Vista aérea do litoral norte.....	75
Figura 38 - Mapa de macrozoneamento de	75
Figura 39 - Distribuição de frequência mensal de direção do vento da cidade de Maceió – período de 2003- 2012.....	78
Figura 40 - Exemplo de cálculo de coeficiente de aproveitamento (CA).	80
Figura 41 - Taxa de ocupação do terreno a partir da projeção horizontal da edificação.	81
Figura 42 - Influência dos pavimentos na taxa de ocupação do terreno.....	81
Figura 43 - Identificação dos recuos do terreno.	82
Figura 44 - Esquema da influência do avanço compensatório na insolação nas unidades habitacionais.	83
Figura 45 - Proposta de escalonamento dos edifícios para o litoral norte de Maceió.	85
Figura 46 - Verticalização do bairro Guaxuma.	85
Figura 47 - Campanha publicitária que exemplifica os empreendimentos que estão sendo construídos a partir da faixa de 50m da praia de Guaxuma.....	86
Figura 48 - Mapa bairro de Guaxuma.	87
Figura 49 - Ocupação horizontal do Bairro de Guaxuma.....	87
Figura 50 - Trecho da Planície litorânea do bairro Guaxuma.	88
Figura 51 - Esquema do cenário urbano em planta baixa - modelo hipotético.	89
Figura 52 - Esquema geral do cenário urbano - vista em perspectiva.	90
Figura 53 - Incidências do vento consideradas nas simulações.....	93
Figura 54 - Localização dos quatro pontos de referência para extração dos resultados - Planta Baixa.....	94
Figura 55 - Alturas dos pontos de referência - Vista Vertical.....	94
Figura 56 - Explicação dos itens que compõem a fórmula de recuo progressivo.	96
Figura 57 - Definição da disposição e dimensionamento do Pilotis, em planta.....	97
Figura 58: Nomeclatura dos modelos utilizados.	99
Figura 59 - Esquema dos grupos de análise definidos para a pesquisa.	100
Figura 60 - Valores de ΔC_p dos cenários com recuo R1, em seus oito pontos de interesses.	101
Figura 61 - Domínio calculado, representado pelo WIND, modelo virtual ao centro.	104
Figura 62 - Configuração da malha.	107
Figura 63: Gráfico de erros e spot values da simulação de modelo M19 - edifícios sem encosta, recuos R1, com vento 90° (leste) e com pilotis.	109

Figura 64 - Velocidades do vento (m/s). Com encosta x Sem encosta – M1, M50, M18 e M34 (arranjos sem pilotis)	122
Figura 65 - Velocidades do vento (m/s). Com encosta x Sem encosta – M2, M51, M19 e M35.	122
Figura 66: Velocidade do vento (m/s) dos modelos sem pilotis e incidência a 135° (sudeste).	125
Figura 67 - a) velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M1;b) velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M3.....	126
Figura 68 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° à 1,50m do solo no modelo M5;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° à 1,50m do solo no modelo M7.....	127
Figura 69 - Perfil vertical de velocidade do vento modelos M1_S/EN_SE_R1_SPI, M3_S/EN_SE_R2_SPI, M5_S/EN_SE_R3_SPI e M7_S/EN_SE_R4_SPI, respectivamente.	128
Figura 70 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M1_S/EN_SE_R1_SPI, M3_S/EN_SE_R2_SPI, M5_S/EN_SE_R3_SPI e M7_S/EN_SE_R4_SPI, respectivamente.	129
Figura 71 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M9;b) velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M11.....	130
Figura 72 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M13;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M15.....	130
Figura 73 - Perfil vertical de velocidade do vento modelos M9_S/EN_SE_R5_SPI, M11_S/EN_SE_R6_SPI, M13_S/EN_SE_R7_SPI e M15_S/EN_SE_R8_SPI, respectivamente.	131
Figura 74 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M9_S/EN_SE_R5_SPI, M11_S/EN_SE_R6_SPI, M13_S/EN_SE_R7_SPI e M15_S/EN_SE_R8_SPI, respectivamente.	132
Figura 75: ΔC_p dos modelos sem pilotis e vento a 135° (sudeste).	133
Figura 76 - Visualização dos campos de pressão em planta com incidência a 135° à 1,50 m / 16,5 m (2/3 da altura média dos edifícios) / 36,5 m do solo no modelo M1_S/EN_SE_R1_SPI.	134
Figura 77 - Visualização dos campos de pressão em planta com incidência a 135° a 1,50 m / 22.4 m (2/3 da altura média dos edifícios) / 74 m do solo no modelo M15_S/EN_SE_R8_SPI.	134
Figura 78 - Indicação do ΔC_p nos pontos de interesse 3, 5, 6 e 4, 7, 8 - modelo M1. b)Indicação do ΔC_p nos pontos de interesse 3, 5, 6, e 4, 7, 8 - modelo M15.	134
Figura 79 - Pontos extras para análise do pilotis a 1,5 m do solo.	137
Figura 80 - Velocidade do vento (m/s) dos modelos com pilotis e incidência a 135° (sudeste).	138
Figura 81 - a) Visualização da vel. do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo 02.	138

Figura 82 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° à 1,50m do solo no modelo M6.....	139
Figura 83 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M10;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M12.....	140
Figura 84 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M14.b) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M16.....	140
Figura 85 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M2_S/EN_SE_R1_PI, M4_S/E_SEN_R2_PI, M6_S/EN_SE_R3_PI e M8_S/EN_SE_R4_PI, respectivamente.	142
Figura 86 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M10_S/EN_SE_R5_PI, M12_S/EN_SE_R6_PI, M14_S/EN_SE_R7_PI e M16_S/EN_SE_R8_PI, respectivamente.	143
Figura 87 - Croquis do fluxo do vento a 135° sobre o edifício – com e sem pilotis.	144
Figura 88 - Gráfico comparativo entre modelos com e sem pilotis a 1,5 m do solo, orientação Sudeste. Recuos R6 e R7, respectivamente.....	145
Figura 89 - Comportamento do vento nos pontos 1 e 9, junto ao pilotis – modelo M2_S/EN_SE_R1_PI.....	146
Figura 90 - Comportamento do vento nos pontos 3 e 10, junto ao pilotis – modelo M2_S/EN_SE_R1_PI.....	147
Figura 91: Comportamento do vento nos pontos 4 e 11, junto ao pilotis – modelo M2_S/EN_SE_R1_PI.....	147
Figura 92 - ΔCP dos modelos com pilotis e vento a 135° (sudeste).....	148
Figura 93 - Indicação do ΔC_p nos pontos de interesse 3, 5 e 6 - Modelo M2 e M4.	148
Figura 94 -Variação de pressão nas fachadas dos edifícios de maior altura - modelo M8. ...	149
Figura 95 - Velocidade do vento (m/s) dos modelos sem pilotis e incidência a 90° (leste)...	151
Figura 96 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M18.....	152
Figura 97 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50 m do solo no modelo M22;.....	152
Figura 98 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M26;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M28.....	153
Figura 99 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50 m do solo no modelo M30;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50 m do solo no modelo M32.....	153
Figura 100 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M18_S/EN_LE_R1_SPI, M20_S/EN_LE_R2_SPI, M22_S/EN_LE_R3_SPI e M24_S/EN_LE_R4_SPI, respectivamente.	155
Figura 101 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M26_S/EN_LE_R5_SPI, M28_S/EN_LE_R6_SPI, M30_S/EN_LE_R7_SPI e M32_S/EN_LE_R8_SPI, respectivamente.	156
Figura 102 - ΔCP dos modelos sem pilotis e vento a 90° (leste).....	157

Figura 103 - a) Visualização dos campos de pressão em planta com incidência a 90° a 1,50 m; b) 26,4 m (2/3 da altura média dos edifícios); c) 74 m do solo no modelo 32.....	158
Figura 104 - Velocidade do vento (m/s) dos modelos com pilotis e incidência a 90° (leste).	160
Figura 105 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M19;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° à 1,50m do solo no modelo M21.....	161
Figura 106 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M23.a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M25.....	161
Figura 107 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M27; b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M29.....	162
Figura 108 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M31;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M33.....	162
Figura 109 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M19_S/EN_LE_R1_SPI, M21_S/EN_LE_R2_SPI, M23_S/EN_LE_R3_SPI e M25_S/EN_LE_R4_SPI, respectivamente.	163
Figura 110 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M27_S/EN_LE_R5_SPI, M29_S/EN_LE_R6_SPI, M31_S/EN_LE_R7_SPI e M33_S/EN_LE_R8_SPI, respectivamente.	164
Figura 111- Gráfico comparativo entre modelos com e sem pilotis a 1,5 m do solo, orientação Leste. Recuos R6 e R7, respectivamente.....	165
Figura 112 - Croqui do fluxo do vento a 90° sobre o edifício.....	165
Figura 113 - Comportamento do vento nos pontos 1 e 9, junto ao pilotis – modelo M19_S/EN_LE_R1_PI.....	167
Figura 114 - Comportamento do vento nos pontos 3 e 10, junto ao pilotis – modelo M19_S/EN_LE_R1_PI.....	167
Figura 115 - Comportamento do vento nos pontos 4 e 11, junto ao pilotis – modelo M19_S/EN_LE_R1_PI.....	168
Figura 116 - ΔCP dos modelos com pilotis e vento a 90° (leste).	168
Figura 117 - Velocidade média do ar (m/s), piores desempenhos.	172
Figura 118 - Velocidade média do ar (m/s), melhores desempenhos.....	173
Figura 119 - Variação do ΔCp nos pontos de interesse dos cenários analisados - melhores desempenhos.....	174
Figura 120 - Variação do ΔCp nos pontos de interesse dos cenários analisados - piores desempenhos.....	175
Figura 121 - M7_S/EN_SE_R4_SPI, M15_S/EN_SE_R8_SPI, M8_S/EN_SE_R4_PI, M16_S/EN_SE_R8_PI - Modelos cujo a canalização e fluxo descendente do ar contribuiu para maiores velocidades nos pontos 4, 7 e 8.....	176
Figura 122: M24_S/EN_LE_R4_SPI, M32_S/EN_LE_R8_SPI, M25_S/EN_LE_R4_PI e M33_S/EN_LE_R8_PI - Modelos cujo a heterogeneidade do entorno a barlavento resultou em maiores velocidades nos pontos 3, 5 e 6.....	176
Figura 123 - Gráfico Valores Preditos x Valores Observados.	178

Figura 124 - Gráfico valores observados x resíduos.	179
Figura 125 - Gráficos valores preditos x resíduos.	179
Figura 126 - Plotagens de superfícies em função da velocidade do vento (m/s). a) localização x λ_p ; b) localização x orientação; c) localização x pilotis.	180
Figura 127 - Plotagens de superfícies em função da velocidade do vento (m/s). a) λ_p x orientação; b) orientação x pilotis.	181

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais efeitos aerodinâmicos do vento sobre as edificações.	35
Quadro 2 - Valores calculados de Z_0 para tecidos	46
Quadro 3 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R1; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R1; c) Vista dos modelos M1_S/EN_SE_R1_SPI e M18_S/EN_LE_R1_SPI; d) Vista dos modelos M2_S/EN_SE_R1_PI e M19_S/EN_LE_R1_PI.	112
Quadro 4 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R2; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R2; c) Vista dos modelos M3_S/EN_SE_R2_SPI e M20_S/EN_LE_R2_SPI; d) Vista dos modelos M4_S/EN_SE_R2_PI e M21_S/EN_LE_R2_PI.	113
Quadro 5 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R3; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R3; c) Vista dos modelos M5_S/EN_SE_R3_SPI e M22_S/EN_LE_R3_SPI; d) Vista dos modelos M6_S/EN_SE_R3_PI e M23_S/EN_LE_R3_PI.	114
Quadro 6 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R4; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R4; c) Vista dos modelos M7_S/EN_SE_R4_SPI e M24_S/EN_LE_R4_SPI; d) Vista dos modelos M8_S/EN_SE_R4_PI e M25_S/EN_LE_R4_PI.	116
Quadro 7 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R5; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R5; c) Vista dos modelos M9_S/EN_SE_R5_SPI e M26_S/EN_LE_R5_SPI; d) Vista dos modelos M10_S/EN_SE_R5_PI e M27_S/EN_LE_R5_PI.	117
Quadro 8: a) Planta baixa dos modelos com recuos R6; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R6; c) Vista dos modelos M11_S/EN_SE_R6_SPI e M28_S/EN_LE_R6_SPI; d) Vista dos modelos M12_S/EN_SE_R6_PI e M29_S/EN_LE_R6_PI.	118
Quadro 9 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R7; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R7; c) Vista dos modelos M13_S/EN_SE_R7_SPI e M30_S/EN_LE_R7_SPI; d) Vista dos modelos M14_S/EN_SE_R7_PI e M31_S/EN_LE_R7_PI.	119
Quadro 10 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R8; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R8; c) Vista dos modelos M15_S/EN_SE_R8_SPI e M32_S/EN_LE_R8_SPI; d) Vista dos modelos M16_S/EN_SE_R8_PI e M33_S/EN_LE_R8_PI.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de Z_0 para diferentes tipos de superfícies.....	44
Tabela 2 - Rugosidade típica e outras propriedades aerodinâmicas para áreas urbanas homogêneas.....	45
Tabela 3 - Síntese dos resultados das simulações de Lima e Bittencourt.....	67
Tabela 4: Comportamento médio dos principais parâmetros meteorológicos de Maceió - Normais Climatológicas (1981-2010).	77
Tabela 5 - Fórmulas para cálculo dos recuos mínimos obrigatórios, em metros.	83
Tabela 6 - Fórmulas para cálculo dos recuos mínimos obrigatórios presentes no Código de Urbanismo e Edificações de Maceió, em metros – Situação 2.....	95
Tabela 7 - Propostas a serem investigadas para alteração da fórmula de recuos.	96
Tabela 8 - Matriz de simulação.	98
Tabela 9 - Dimensionamento das janelas de acordo com a área de piso.....	103
Tabela 10 - Cálculo do domínio.	104
Tabela 11 - Coeficientes de rugosidade de terreno.....	105
Tabela 12 - Dados de altura de rugosidade efetiva.....	106
Tabela 13 - Configuração dos atributos do vento.....	106
Tabela 14 - Controle de relaxamento.	108
Tabela 15 - Características das variáveis para análise estatística.	111
Tabela 16 - Resumo dos principais resultados. Modelos sem Pilotis e vento a 135°.....	136
Tabela 17 - Velocidades do vento na área edificada do pilotis x área livre do pilotis – incidência do vento a 135°.....	145
Tabela 18 - Resumo dos principais resultados. Modelos com Pilotis e vento a 135°.....	150
Tabela 19 - Resumo dos principais resultados. Modelos sem Pilotis e vento a 90°.....	159
Tabela 20 - Velocidades do vento na área edificada do pilotis x área livre do pilotis – incidência do vento a 90°.....	166
Tabela 21 - Resumo dos principais resultados. Modelos com Pilotis e vento a 90°.....	170
Tabela 22 - Grau de adensamento dos modelos com resultados mais significativos.	171
Tabela 23 - Coeficientes do modelo de regressão.	177
Tabela 24 - Dados de velocidade do vento (m/s) - modelos sem pilotis e vento a 135°.....	200
Tabela 25 - Dados de velocidade do vento (m/s) - modelos com pilotis e vento a 135°.....	200
Tabela 26 - Dados de velocidade do vento (m/s) - modelos sem pilotis e vento a 90°.....	201
Tabela 27 - Dados de velocidade do vento (m/s) - modelos com pilotis e vento a 90°.....	201
Tabela 28 - Dados de ΔC_p - modelos sem pilotis e vento a 135°.	202
Tabela 29 - Dados de ΔC_p - modelos com pilotis e vento a 135°.....	202
Tabela 30 - Dados de ΔC_p - modelos sem pilotis e vento a 90°.	203
Tabela 31 - Dados de ΔC_p - modelos com pilotis e vento a 90°.....	203

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Objetivos	26
1.1.1 Objetivo geral	26
1.1.2 Objetivos Específicos	26
1.2 Estrutura da tese	27
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 O clima urbano e o ambiente construído.....	29
2.2 A ventilação natural no meio urbano.....	31
2.2.1 Efeitos aerodinâmicos do vento.....	32
2.2.2 Os campos de pressão devido à ação do vento.....	36
2.2.3 Perfil do vento em cidades	38
2.2.4 O papel da ventilação natural no desempenho térmico do ambiente construído	40
2.3 O desenho urbano e a ventilação urbana.....	41
2.3.1 Efeitos da rugosidade urbana	42
2.3.2 Relevo e a ventilação no meio urbano	47
2.4 Métodos para estimativa da ventilação natural	67
2.4.1 O Programa Phoenics 2018 v1.0, potencial e limitações	71
2.5 Síntese do capítulo.....	72
3. UNIVERSO DE ANÁLISE – A CIDADE DE MACEIÓ E SEU LITORAL NORTE	
74	
3.1 O Perfil climático e estratégias bioclimáticas para edificações na cidade de Maceió-AL	76
3.2 O Código de Urbanismo e Edificações e o Plano Diretor de Maceió e o conforto ambiental	79
3.3 Delimitação do recorte espacial	86
3.4 Definição dos cenários urbanos	88
3.5 Síntese do capítulo.....	90
4. MATERIAIS E MÉTODO	92
4.1 Definição dos parâmetros a serem investigados e matriz de simulação	92
4.1.1 A incidência do vento	93
4.1.2 Recuo progressivo	94
4.1.3 Pilotis	96

4.1.4	Matriz de simulação.....	97
4.2	Análise Paramétrica.....	99
4.3	Coefficientes de pressão (C_p) nas fachadas dos edifícios.....	100
4.4	Etapas de configuração do software <i>Phoenix</i>	101
4.4.1	Definição do modelo	102
4.4.2	Geometria do domínio.....	103
4.4.3	Correção da velocidade do vento de acordo com o grau de rugosidade do entorno	104
4.4.4	Configuração da malha.....	106
4.4.5	Configuração dos parâmetros de relaxamento e escolha de um modelo de turbulência.....	108
4.5	Análise dos resultados.....	109
4.6	Descrição dos edifícios que compoem a malha.....	112
4.6.1	Modelos com recuos R1	112
4.6.2	Modelos com recuos R2	113
4.6.3	Modelos com recuos R3	114
4.6.4	Modelos com recuos R4	115
4.6.5	Modelos com recuos R5	116
4.6.6	Modelos com recuos R6	117
4.6.7	Modelos com recuos R7	118
4.6.8	Modelos com recuos R8	119
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	121
5.1	Modelos sem pilotis e vento a 135° (SUDESTE)	124
5.1.1	Análise dos coeficientes de pressão (C_p) nos modelos sem pilotis e com incidência a 135° (sudeste).....	133
5.2	Modelos com pilotis e vento a 135° (SUDESTE).....	136
5.2.1	Análise dos coeficientes de pressão (C_p) nos modelos com pilotis e com incidência a 135° (sudeste).....	148
5.3	Modelos sem pilotis e vento a 90° (LESTE).....	151
5.3.1	Análise dos coeficientes de pressão (C_p) nos modelos sem pilotis e com incidência a 90° (leste).....	157
5.4	Modelos com pilotis e vento a 90° (LESTE)	160
5.4.1	Análise dos coeficientes de pressão (C_p) nos modelos com pilotis e com incidência a 90° (leste).....	168
5.5	Análise do grau de adensamento dos cenários	171

5.6	Análise dos principais resultados encontrados.....	172
5.7	Análise estatística dos dados	177
5.7.1	A influência das variáveis para o desempenho da ventilação natural	177
6.	CONCLUSÃO.....	183
6.1	Limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.....	186
	REFERÊNCIAS.....	187
	APÊNDICE A – Dados de velocidades do vento dos modelos extraídos das simulações.....	200
	APÊNDICE B – Dados de Diferença de coeficiente de pressão (ΔC_p).	202
	APÊNDICE C - Comportamento do vento nos pontos localizados nas áreas obstruídas e desobstruídas dos pilotis.	204

1. INTRODUÇÃO

A influência das ações antrópicas sobre a cidade e seu reflexo no clima local vem sendo tema de muitas pesquisas ao longo das últimas décadas. As modificações do uso do solo, geradas principalmente pela urbanização, alteram significativamente o equilíbrio do meio ambiente e o clima local.

Na grande maioria das cidades brasileiras, o acelerado processo de urbanização não foi acompanhado de um planejamento urbano eficiente. Isso se deve a fatores como a ausência ou ineficiência de políticas públicas de controle e normalização do uso do solo urbano. Essa condição tem levado as cidades a reproduzirem modelos urbanos de baixa qualidade ambiental, com malhas urbanas desordenadas, acentuada verticalização, uso intensivo do solo e a proliferação de assentamentos irregulares (GOMES; LAMBERTS, 2009).

A cidade, enquanto base para as relações sociais e econômicas, pode ser entendida como um ponto focal de consumo de energia. Suas características morfológicas, infraestruturas e dinâmicas socioeconômicas definirão o desempenho térmico e consumo energético dessa cidade.

Nos últimos séculos, o relativo baixo custo de energia contribuiu para o aumento da dispersão das atividades urbanas e para o decréscimo da densidade de muitas cidades do planeta. Esse tipo de ordenação espacial urbana resultou na separação física e difusão das diversas atividades urbanas o que, para muitos autores, seria um aspecto que produziu o aumento do consumo de energia, devido à necessidade de um incremento do transporte de massa, das redes de infraestrutura, como também, do aumento da circulação de transportes individuais. Além do consumo de energia por transportes, tem-se o aumento da poluição ambiental (STEEMERS, 2003).

No Brasil, essa realidade é evidenciada, dentre outras situações, nos empreendimentos dos programas de habitação popular, a exemplo do Programa Minha Casa, Minha Vida. Esses empreendimentos, na sua maioria, atendem ao padrão de construções de residências, situadas em áreas distantes dos centros urbanos, onde o valor da terra é mais baixo e muitas vezes sem infraestrutura adequada, aumentando ainda mais a dispersão das cidades e suas consequências já citadas (NASCIMENTO; TOSTES, 2011).

Contraopondo-se a este fenômeno urbano, autores como Edwards (2008) e Gonçalves et al. (2015) defendem que modelos urbanos com alta densidade construtiva, baseados na diversidade de usos do solo, exercem um menor impacto nas emissões de CO₂ se comparados às cidades menos compactas, onde é necessário maiores deslocamentos. As altas densidades construtivas trazem como vantagem, desde que devidamente dimensionadas, o compartilhamento de infraestruturas: energia, redes de água e esgoto, drenagem, transportes públicos, dentre outros serviços. Esse compartilhamento em um primeiro momento pode vir a reduzir o consumo *per capita* de energia, em relação a áreas menos adensadas.

Inúmeras pesquisas sobre a sustentabilidade das cidades defendem a ideia de que uma das necessidades atuais das aglomerações urbanas é uma maior densidade de ocupação (DUARTE, 2015; GONÇALVES et al. 2015; GONÇALVES et al. 2011; EDWARDS, 2008).

[...] É preciso pensar um novo modelo de cidade, assim como os arquitetos e planejadores dos séculos XIX e XX também o fizeram. Por mais que haja críticas, a cidade modernista foi uma solução para os problemas do final do século XIX e de boa parte do século XX. Hoje as demandas são outras. O mundo está novamente em um ponto de inflexão e, desta vez, enfrentando a iminência de escassez de recursos, de mudança de matriz energética, de mudanças climáticas etc (DUARTE, 2015. p.160).

Por outro lado, as diferentes estruturas do meio urbano fortemente adensado podem desencadear distintos efeitos nas variáveis climáticas. Pesquisas a respeito dessa relação entre forma urbana e clima justificam-se pelo agravamento dos problemas ambientais nas cidades, em virtude da influência da configuração urbana na qualidade de vida e no consumo energético do tecido urbano.

As alterações no meio provocadas pelo processo de urbanização das cidades podem influenciar as características referente à radiação, umidade do ar e ventilação natural, alterando, em consequência, os balanços térmicos e hidrológicos naturais (OKE, 1987).

No que tange às edificações, as características de cânion urbano, a orientação da implantação e o dimensionamento dos lotes e quadras, se não bem planejados, podem afetar a disponibilidade de luz e ventilação natural no interior dos edifícios, refletindo diretamente no seu desempenho térmico e energético (MARTINS, 2014).

Duarte (2015) afirma que um dos maiores desafios das cidades latino-americanas em relação ao adensamento está em preservar a qualidade dos espaços públicos, dos espaços de

transição entre os edifícios e a mobilidade. Apesar disso, viabilizar espaços urbanos compactos e adensados traz grandes vantagens e seus impactos negativos podem ser atenuados a partir do planejamento de infraestrutura adequada e excelência no desenho urbano e no projeto dos edifícios.

Essas relações complexas entre clima urbano, forma da cidade e consumo energético nas edificações constituem-se ainda em assuntos que merecem destaque nas pesquisas sobre sustentabilidade das cidades, e remetem a questões como as formuladas por Duarte (2015): Como se deve adensar? Adensar quanto? Com quais arranjos construtivos? Como associar adensamento com qualidade ambiental? Com qual padrão de ocupação das quadras? Sob quais condições? Torres? Lâminas? Ocupação perimetral? Quais são os efeitos microclimáticos de diferentes arranjos de quadra possíveis com alta densidade e com diferentes tipologias de edifícios? São questionamentos que têm motivado inúmeras pesquisas no âmbito da ocupação urbana, com o propósito de se identificar as condições mais adequadas de apropriação dos espaços livres ainda existentes nas cidades.

A apreciação das principais estratégias bioclimáticas para regiões quentes e úmidas revelam que tais regiões apresentam pequenas flutuações diárias de temperatura do ar e alta umidade. Para a obtenção de um melhor desempenho térmico, as construções devem evitar ganhos de calor pela radiação solar e dissipar o calor produzido internamente, assim como o absorvido na envoltória. A ventilação natural exerce função fundamental para essa dissipação. Além disso, uma ventilação eficiente é capaz de promover o necessário arejamento e amenizar o excesso de umidade, removendo vapores e evitando a saturação do ar estagnado (OLGYAY, 1998).

O vento, por se tratar de um fluido, tem o seu movimento alterado de acordo com os obstáculos encontrados ao longo do seu percurso. A topografia, por exemplo, pode gerar os ventos de vale e montanha (LEITE, 2010). Com isso, as diferentes morfologias urbanas, associadas ao sítio em que estão inseridas, podem condicionar e afetar o microclima local, como também desencadear distintas respostas no comportamento dos ventos.

A literatura também demonstra que a rugosidade e porosidade urbana causam interferências significativas no movimento do ar em maior ou menor intensidade, a depender do nível e configuração desses parâmetros. Desta forma, a presente pesquisa pretende avaliar o efeito da variação dos recuos progressivos e suas possíveis combinações com os demais

parâmetros urbanísticos no desempenho da ventilação natural, para um recorte espacial representativo da cidade de Maceió-AL.

O processo de verticalização das cidades representa a multiplicação desse solo urbano, através da articulação dos agentes públicos e privados interessados na sua reprodução e valorização. Isso resulta na transformação espacial e paisagística da cidade, como também na sua estrutura socioeconômica (ZACARIAS; RIBEIRO, 2016).

A estrutura das cidades brasileiras é marcada pelo seu dualismo. Apresentam áreas, muitas vezes restritas, com um cenário de urbanização apto à sua ocupação com condições de moradia e toda a infraestrutura necessária, como também apresentam extensas áreas sem qualquer atributos de urbanidade.

Segundo Zacarias e Ribeiro (2016), essas áreas privilegiadas das cidades, por serem escassas e apresentarem um elevado valor no preço da terra, contribuem para que sua ocupação ocorra de diferentes maneiras, principalmente multiplicando-se em altura até onde a legislação assim permitir. O reflexo dessa nova configuração espacial, na maioria das vezes, é a elitização e o comprometimento da qualidade ambiental, pois lotes com padrão de ocupação horizontal dão lugar a ocupações verticalizadas e nem sempre essa reconfiguração é acompanhada de melhorias na infraestrutura da área.

O comportamento descrito acima, existente na quase totalidade das grandes cidades brasileiras é também verificado na cidade de Maceió-AL. Na década de 1980, a capital alagoana passou um intenso crescimento imobiliário de edificações verticalizadas, sobretudo na área da planície litorânea, nos bairros da Jatiúca, Ponta Verde e Pajuçara. Inicialmente a área citada foi ocupada por grandes sítios, clubes e casas de veraneio restrita às famílias de alta renda. Já ao final da década de 1970 surgem os primeiros edifícios multifamiliares de até 17 pavimentos (Figura 1).

Figura 1 - Edifícios sem recuos laterais.



Fonte: Cruz (2001).

Essa nova configuração levou ao crescimento da densidade urbana da área e trouxe problemas com a infraestrutura existente, a exemplo de abastecimento de água e energia elétrica (CRUZ, 2001).

Ao longo dos últimos anos, a cidade de Maceió-AL foi ganhando dois novos eixos de expansão: em direção a região dos tabuleiros, parte alta da cidade, caracterizada por uma ocupação mais espalhada de edificações unifamiliar e multifamiliar; e na faixa litorânea, ao norte da cidade, onde o forte interesse imobiliário vem destinando para esta área uma ocupação predominantemente verticalizada.

O litoral Norte de Maceió, apresenta dois tipos de relevo característicos, a planície costeira de altitude, variando de 2 a 8 metros, e os tabuleiros com altitude de até 60 metros. A legislação urbanística do município estabelece para essa região da cidade, mais precisamente para o bairro de Guaxuma, uma altura de gabarito máxima para edifícios a serem construídos de até 20 pavimentos, o que equivale aproximadamente a 60 metros de altura. Acredita-se que a implantação dos futuros empreendimentos, já conjecturados para essa área de expansão da cidade, pode exercer influência na ventilação local, necessitando assim ser investigado (Figura 2).

Figura 2 - Trecho do bairro da Jacareica - litoral Norte de Maceió.



Fonte: Google Earth (2017).

Segundo Cruz (2001), já no ano de 1982, a nova realidade de padrão construtivo verticalizado provocou preocupação para a equipe responsável pela elaboração do Plano Diretor da época que percebeu a necessidade de estabelecer restrições mais severas ao ato de construir na região litorânea, de modo a preservar o meio ambiente e a qualidade de vida da população local. Já naquela época, tal postura enfrentou resistência do setor da construção civil e imobiliário. Uma das restrições estaria na limitação da altura do gabarito das edificações, e uma das alegações para tal controle seria preservar as condições de ventilação natural para as áreas localizadas a sotavento da orla marítima, evitando assim o surgimento de barreiras que bloqueassem os ventos dominantes, advindos do quadrante leste.

Ao longo das discussões e revisões da legislação urbanística do município de Maceió, a garantia da manutenção dos padrões de ventilação natural foi e, até os dias atuais, continua sendo um dos argumentos principais para o controle da limitação do gabarito das edificações, para a área litorânea da cidade como um todo. No entanto, Cruz (2001), já relatava a ausência de estudos técnicos que comprovassem e quantificassem os reais impactos da ocupação da malha urbana na faixa da planície litorânea por edificações verticais.

Martins (2014) catalogou cinco classes tipológicas de arranjos urbanos mais recorrentes na cidade de Maceió e avaliou, a partir de cálculo simplificado, o perfil de vento para cada uma dessas classes, tendo como objetivo indicar o efeito do fator ventilação nas análises morfoclimáticas do estudo e conseqüentemente a sua influência no cálculo do fluxo radiativo, objetivo principal da sua pesquisa. Segundo a autora, as áreas mais adensadas (centro comercial da cidade – Classe 3) e verticalizadas (orla marítima – classe 4) apresentaram os maiores valores de rugosidade e as menores médias mensais de velocidade do ar, uma vez que os edifícios emitem mais energia térmica radiante, pois a diferença de temperatura entre as superfícies e o seu ambiente circundante passa a ser maior. No entanto, o

efeito do movimento do ar como intensificador ou atenuador do efeito da emissão de radiação no infravermelho nas superfícies foi relativamente restrito (Figuras 3 e 4).

Figura 3 - Classe tipológica 3.



Fonte: Martins (2014).

Figura 4 - Classe tipológica 4.



Fonte: Martins (2014).

Como recorte espacial desta tese, optou-se pelo estudo de uma área do município de Maceió-AL, que ainda se encontra em processo inicial de expansão urbana, correspondente a um dos vetores de expansão dessa malha urbana, direcionado para a região do litoral norte. Essa área apresenta um rico patrimônio natural e fragilidade ambiental, caracterizada por áreas de planície e com regiões que apresentam pequenas encostas de até 60 metros de altura, tais características necessitam ser estudadas a fim de se planejar um crescimento urbano eficiente, sem que isso comprometa a qualidade de vida dos cidadãos.

Nos anos de 2015 e 2016, novas discussões e oficinas de debates foram desenvolvidas com o objetivo de revisar o Plano Diretor vigente do município de Maceió. Um dos aspectos mais debatidos relacionou-se à restrição da altura dos edifícios na região do litoral norte, por se tratar da área de expansão da cidade e de grande interesse imobiliário para um futuro adensamento. Sabe-se da importância desse controle da altura, uma vez que limitaria o número de pavimentos a ser construído, o que poderia impactar o fluxo do vento no meio urbano, como também no sombreamento da praia.

Para Umakoshi (2014), na expansão urbana, o adensamento construtivo produzido por ocupações de tipologia vertical é a melhor alternativa para amenizar os impactos ambientais no meio, no tocante à ventilação. Sendo assim, busca-se compreender se o aumento da porosidade da malha urbana, através da ampliação dos recuos estabelecidos pelo código de urbanismo e edificações, mantendo-se o mesmo coeficiente de aproveitamento dos terrenos (CA), afeta mais do que a altura dos edifícios para o desempenho da ventilação natural.

Torna-se necessária a avaliação específica de diferentes arranjos espaciais urbanos para determinar o impacto desses parâmetros construtivos sobre o comportamento da ventilação natural.

A realização de pesquisas para estimar o impacto da variação dos parâmetros urbanísticos que regulam as ocupações na região do litoral norte de Maceió-AL pode contribuir para subsidiar futuras revisões dos instrumentos urbanísticos vigentes, identificando os aspectos que necessitam ser aprimorados, revistos ou inclusos, de modo a alcançar uma melhor qualidade do ambiente construído através do aproveitamento da ventilação natural e melhorar o potencial construtivo dos terrenos, trata-se de uma alternativa a mais para a economia de energia nesses espaços urbanos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da porosidade da malha urbana resultante de diferentes combinações de recuos progressivos e alturas dos edifícios, de modo a verificar qual o melhor desempenho da ventilação natural.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar diferentes combinações de recuos progressivos aplicáveis às edificações localizadas na Zona ZR-5 da cidade de Maceió-AL, com o objetivo de proporcionar um aumento da porosidade da malha urbana e o desempenho da ventilação natural;
- Examinar o desempenho da ventilação natural a partir da liberação da altura dos edifícios associada a diferentes formas de cálculos dos recuos progressivos, de modo a manter o coeficiente de aproveitamento admitido pela legislação da cidade de Maceió-AL;

- Identificar quais os melhores arranjos urbanos propostos, no que se refere ao desempenho da ventilação natural.

1.2 Estrutura da tese

A presente tese está estruturada em 6 seções. Inicia-se com uma seção introdutória, que trata da problemática do tema abordado e da justificativa para a sua escolha, diante do contexto atual das pesquisas em ventilação no meio urbano.

A segunda seção descreve a fundamentação teórica que nortearam o desenvolvimento desta pesquisa. Composto por quatro subseções: o clima urbano e o ambiente construído, onde são abordados conceitos preliminares; fenômenos gerais da urbanização e suas implicações na formação de microclimas; legislação de uso e ocupação do solo. Em seguida, aborda-se a ventilação natural no meio urbano; os efeitos aerodinâmicos; campos de pressão e o perfil do vento nas cidades; e o papel da ventilação natural no desempenho térmico do ambiente construído. A subseção 2.3 é reservada para discorrer a relação do desenho urbano e a ventilação urbana, abordando os efeitos da rugosidade urbana, relevo, porosidade, densidade construtiva e verticalização. Na subseção 2.4 são descritos os métodos disponíveis para a estimativa da ventilação natural, bem como as ferramentas computacionais existentes, com destaque para o programa CFD *Phoenix* 2018 v1.0, que será utilizado no presente trabalho.

Na seção 3 é caracterizado o universo de análise desta pesquisa, são descritos o perfil climático e as estratégias bioclimáticas para edificações na cidade de Maceió. Além disso, é analisada a legislação urbanística e os parâmetros reguladores da ocupação do solo que afetam a ventilação natural, finalizando com a delimitação do recorte espacial.

A seção 4 apresenta os materiais e métodos utilizados no trabalho, onde são descritas as configurações necessárias para o desenvolvimento das simulações computacionais que serão realizadas com o programa *Phoenix*. O capítulo ainda contém os parâmetros a serem investigados, a definição do modelo e cenários urbanos.

A quinta seção aborda as análises dos resultados das simulações computacionais, como também as discussões geradas a partir da análise comparativa entre cada cenário. Em seguida, é realizado o tratamento estatístico dos dados com o objetivo de investigar o comportamento das variáveis e suas relações de dependências, utilizando para isto a técnica de Regressão Linear Múltipla.

Na sexta e última seção são apresentadas as conclusões finais, relacionadas aos objetivos propostos e resultados encontrados. Em seguida são citadas as limitações encontradas na pesquisa, como também as recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O clima urbano e o ambiente construído

O clima pode ser definido como a imagem característica e permanente do tempo de uma determinada localidade, em meio às suas constantes variações. Para Givoni (1976), a formação do clima de uma região é dada pela combinação e variação de elementos, dos quais os principais a serem considerados para o desenho dos edifícios e para o conforto humano seriam a radiação solar, temperatura e umidade do ar, ventos e precipitações. A formação do clima urbano se dará a partir da interação desse clima com as características do espaço urbanizado de uma dada região (DUARTE, 2015).

O fenômeno da urbanização representa uma realidade que trouxe grandes benefícios à sociedade, mas na maioria das vezes tem sido marcado pelo crescimento excessivo e desordenado do solo urbano. Esse crescimento tem gerado, como pontos negativos, a alteração no clima original e a formação de microclimas diferenciados em diversos pontos do tecido urbano. Cada edifício e conjunto desses são responsáveis por uma alteração microclimática, que somadas criam um clima característico da área (NUCCI, 2008; LEITE, 2015).

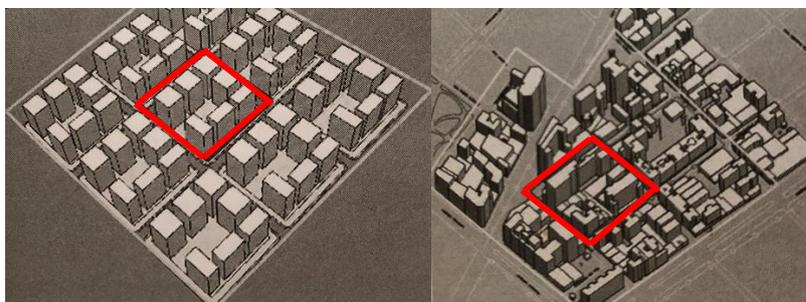
A substituição da superfície natural por outras de maior capacidade térmica provoca alterações no balanço de energia, levando a variações na temperatura e umidade do ar em escalas local e mesoclimática. A canalização dos cursos d'água e retirada da camada de vegetação preexistente modificam a permeabilidade do solo. A constante modificação na morfologia urbana através da incorporação cada vez maior de edifícios compromete a porosidade ao vento e redireciona as correntes de ar, alterando seu comportamento em termos de velocidade e produzindo elevada turbulência (LEITE, 2015, p.47).

O estudo do clima urbano investiga a interação dos ambientes construídos com a atmosfera, que leva a criação de inúmeros microclimas locais, com o objetivo de promover a melhoria da qualidade ambiental da cidade, gerando espaços convidativos ao convívio social, e ao mesmo tempo minimizando o consumo de energia dos edifícios (OLGYAY, 1998; DUARTE, 2015).

Para Taesler (1986 *apud* DUARTE, 2015), do ponto de vista do planejador urbano e do projeto de edifícios, a importância do estudo do clima no meio está em analisar seus impactos na economia, função, segurança do ambiente construído e na saúde e bem-estar da população, de modo a auxiliar nas medidas de planejamento.

Nessa interação entre o edifício e o meio urbano, não há como se avaliar um edifício isolado, fora do seu contexto urbano e climático, mas sim, pensar sobre um grupo de edifícios, e que, segundo Duarte (2015), deve ser de no mínimo uma escala de nove quadras, de modo a considerar o que ocorre no entorno imediato de uma determinada quadra de referência, esta seria a unidade mínima de projeto (Figura 5).

Figura 5 - Quadra de referência como unidade mínima de projeto e mais oito quadras no entorno imediato.



Fonte: Adaptado de Duarte (2015).

A análise do desempenho do edifício visto como um elemento isolado, pode levar a conclusões superficiais, uma vez que seu desempenho pode ser influenciado pela qualidade do espaço urbano onde está inserido.

Para Duarte (2015), as atividades de planejamento e projeto podem até certo ponto controlar as variáveis ambientais, na medida em que a legislação de uso e ocupação do solo e seus códigos de edificações agreguem objetivamente informações da climatologia para o desenho urbano e entendam o papel dos edifícios na estratégia de climatização das cidades.

Bittencourt, Monteiro e Yannas (2015), destacam que os códigos de edificações necessitam ser revistos no intuito de adicionar restrições que impossibilitem os edifícios atuarem como barreiras construtivas bloqueadoras do aproveitamento das características ambientais positivas, a exemplo do acesso à luz e à ventilação natural em climas tropicais. Uma alternativa seria o incentivo ao uso do pilotis e de pavimentos vazados nos edifícios, de forma a favorecer uma maior permeabilidade da malha urbana aos ventos predominantes.

2.2 A ventilação natural no meio urbano

O vento é proveniente do movimento atmosférico, gerado na troposfera, em relação à superfície da terra. Esse movimento é causado pelo desequilíbrio da distribuição da radiação, além de fatores como a topografia, distribuição das superfícies continentais e oceânicas e as correntes oceânicas (AYOADE, 1986).

O gradiente de pressão horizontal é o principal responsável pelo movimento do ar das áreas de alta pressão para áreas de menor pressão. Percebe-se esse movimento em regiões litorâneas na formação das brisas diurnas, no sentido do mar para a terra; e noturnas, no sentido oposto. Durante o dia, a terra se aquece mais rapidamente que o mar e a diferença de pressão faz com que o ar se movimente em direção à terra. Sem a fonte de calor do sol, o efeito contrário acontece durante a noite, quando a água demora mais tempo para esfriar que a terra, formando assim uma brisa terral (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005).

A massa de ar atmosférica em contato com a superfície terrestre gera o efeito de fricção, e o grau de rugosidade da superfície vai determinar o nível desse efeito.

Na escala local, as variações que ocorrem são devido às características do terreno. A topografia, por exemplo, pode gerar os ventos de vale e montanha, e a variação de temperatura na superfície do mar e da terra gera as brisas marítimas e terrestres (LEITE, 2010).

As **brisas terrestres e marítimas** se desenvolvem principalmente nas costas tropicais e ocorrem pela diferença de pressão entre o continente e o mar, com origem nas diferenças térmicas entre as superfícies terrestres e as massas de água (AYOADE, 1986), como já mencionado anteriormente.

Os **ventos de vale e de montanha** são gerados pelo aquecimento diferenciado da superfície montanhosa, que é responsável pelos gradientes de pressão que forçam os movimentos do ar entre vales e montanhas. Ao longo do dia, encostas são mais aquecidas do que as regiões mais baixas, formando na região mais elevada uma área de baixa pressão receptora de ventos. Dessa forma, os ventos se deslocam em sentido ascendente, o que pode levar à formação de nuvens e precipitação (AYOADE, 1986). À noite ocorre o inverso, uma vez que as regiões mais altas perdem calor rapidamente.

As brisas de vale e montanha são mais intensas em dias claros de verão, quando o vento predominante é mais calmo e em regiões onde a declividade é acentuada.

No Brasil, a sua dimensão continental engloba direta ou indiretamente todas as massas de ar responsáveis pelas condições climáticas da América do Sul, sendo predominantes os ventos alísios de sentido sudeste. Essas massas de ar originam-se de fenômenos dinâmicos, como os centros de pressão, os ciclones, os anticiclones móveis e outros. Todos os sistemas de pressão e de massas de ar se fortalecem ou enfraquecem e deslocam-se segundo os paralelos e meridianos terrestres acompanhando o movimento aparente do sol no decorrer do ano (PADARATZ, 1977; AYOADE, 1986).

2.2.1 Efeitos aerodinâmicos do vento

O vento, assim como os líquidos e outros tipos de gases, é considerado um fluido, e de acordo com Brunetti (2008), qualquer fluido se deforma continuamente quando submetido a uma força tangencial constante, o que impossibilita uma nova configuração de equilíbrio estático. Sendo assim, o escoamento do vento pode ocorrer de forma laminar ou turbulenta.

Brunetti (2008) descreve escoamento laminar como aquele em que há o deslocamento das partículas em lâminas individualizadas, sem trocas de massa entre elas. Já o escoamento turbulento é o movimento em que as partículas apresentam um movimento aleatório, ou seja, a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do fluido.

Para melhor entender os tipos de escoamento dos fluidos, pode-se recorrer à experiência de Reynolds de 1883 que, a partir da observância da estabilidade do fluxo, definiu o movimento do fluido como laminar ou turbulento a partir de um valor numérico adimensional dado pela relação das seguintes variáveis:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Re = número de Reynolds (adimensional)

ρ = densidade do ar $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
 v = velocidade do vento $\left(\frac{m}{s}\right)$;

$D = \text{diâmetro da largura do obstáculo (m)}$;
 $\mu = \text{viscosidade dinâmica do fluido } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \text{s}\right)$.

A viscosidade dinâmica é a propriedade que indica a maior ou a menor dificuldade do fluido escoar. Possui diferentes valores para cada fluido e também varia para um mesmo fluido, principalmente em relação à temperatura. Nos líquidos, quanto maior a temperatura, menor a sua viscosidade, enquanto que nos gases, quanto maior a temperatura, maior a sua viscosidade (BRUNETTI, 2008).

Reynolds chegou aos seguintes valores:

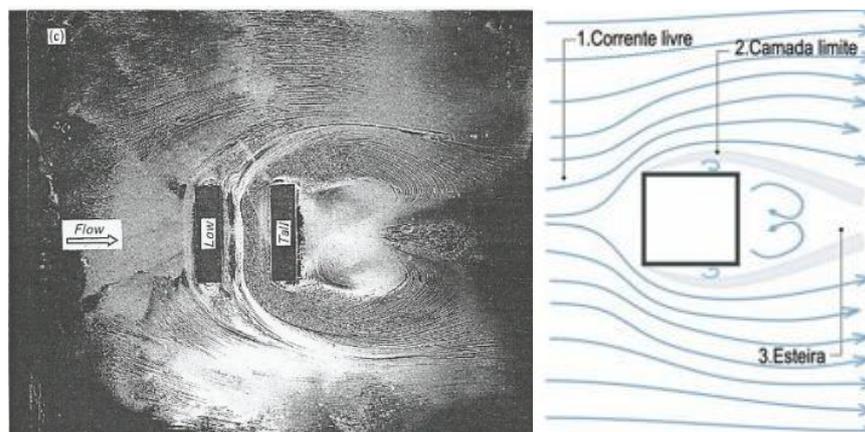
$Re < 2000$ Escoamento laminar

$2000 < Re < 2400$ Escoamento de transição

$Re > 2400$ Escoamento turbulento

No entorno das construções, o escoamento do ar pode se apresentar em três tipos de regiões: fluxo livre (corrente de ar localizada a barlavento do edifício e sem a interferência dele); camada limite (gerada na separação entre o fluxo livre e a região de re-circulação do fluxo); e região de re-circulação (esteira ou sombra de vento), formada por uma zona turbulenta de vórtices e refluxos de baixa velocidade (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005), conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Três zonas formadas no escoamento do vento.

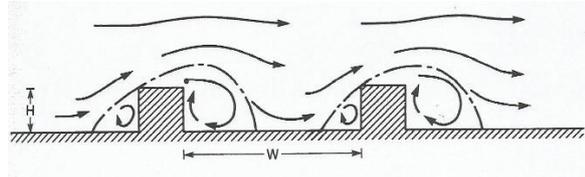


Fonte: (OKE, 1987; BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2005).

A configuração do arranjo dos edifícios pode causar interferências no movimento do ar, estabelecendo três tipos de fluxos (OKE, 1987; SILVA, 2014):

- I. Fluxo com rugosidade isolada: quando o espaçamento entre as edificações não interfere no fluxo de ar nos obstáculos que se localizam a sotavento (lado oposto do qual sopra o vento) (Figura 7).

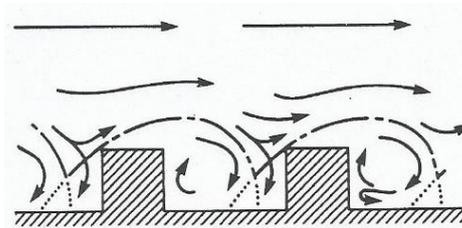
Figura 7: Fluxo com rugosidade isolada.



Fonte: Oke (1987)

- II. Fluxo com interferência de esteira: quando ao atingir os obstáculos a sotavento, a esteira do vento causa interferência no fluxo de ar (Figura 8);

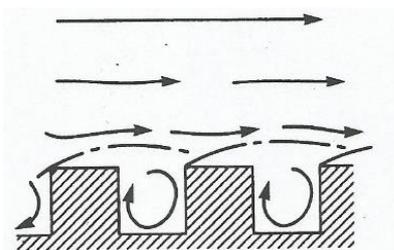
Figura 8: Fluxo com interferência de esteira.



Fonte: Oke (1987)

- III. Fluxo turbulento: quando uma estreita distância entre dois obstáculos resulta no desvio do fluxo de ar para cima deles, o que ocasiona um movimento turbulento no espaço que compõe o arranjo (Figura 9).

Figura 9: Fluxo turbulento.

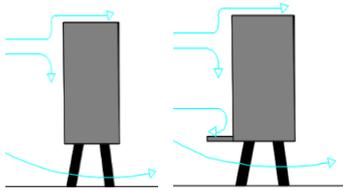
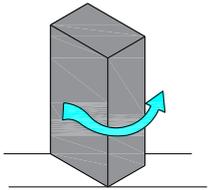
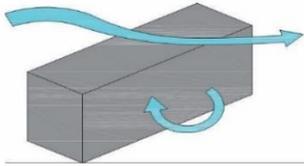
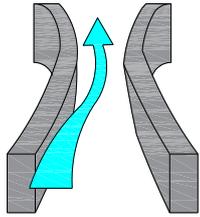


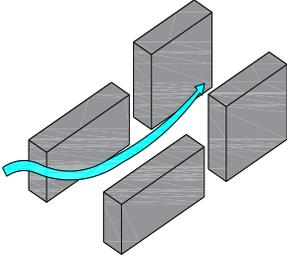
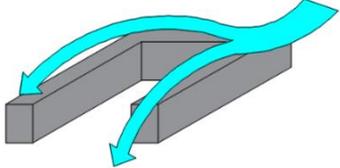
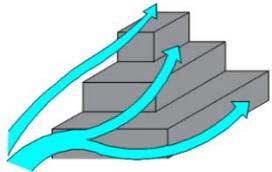
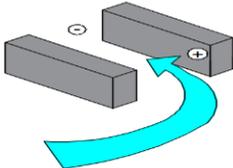
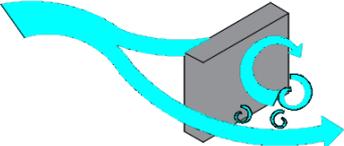
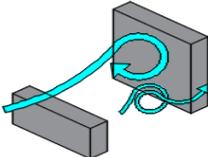
Fonte: Oke (1987).

Di Sabatino et al. (2008) descrevem que em arranjos urbanos reais, a variação de altura dos edifícios afeta o fluxo e resulta em níveis mais altos de turbulência no topo do arranjo, essa variabilidade de altura reduz a probabilidade **fluxo turbulento** (*Skimming flow*) e melhora a troca de fluidos entre o dossel e o fluxo acima.

Gandemer, em 1978, estudou e catalogou uma série de efeitos aerodinâmicos do vento, conforme Quadro 1:

Quadro 1: Principais efeitos aerodinâmicos do vento sobre as edificações.

<p>Efeito de pilotis – é o fenômeno de movimento de ar sob o edifício, em que a corrente de entrada ocorre de forma difusa, mas a saída em jatos de vento. Esses jatos de ventos de grande intensidade geram efeitos indesejáveis, mas que podem ser atenuados ao se implantar o edifício paralelo ao vento dominante; dispor a base do edifício com vegetação ou construção; evitar o uso de pilotis de forma contínua na sua base; e ao se dividir os fluxos de ar à beira das construções, com o aumento da porosidade o volume do edifício. Marquises também podem ser usadas para diminuir a velocidade do vento no trecho do pilotis.</p>	
<p>Efeito de esquina – é o fenômeno de corrente de ar nos ângulos das construções, que deve ser evitado em áreas densamente construídas. Seus efeitos indesejáveis são sentidos diretamente a nível do pedestre e podem ser atenuados ao considerar os cantos dos edifícios de forma arredondada; considerar as construções em vários níveis decrescentes; e prever o adensamento imediato das esquinas.</p>	
<p>Efeito de barreira – é o fenômeno de corrente de ar com desvio em espiral, geralmente utilizado como proteção dos ventos. O fenômeno pode ser potencializado ou atenuado a partir dos espaçamentos dados entre os edifícios e da disposição de sua malha.</p>	
<p>Efeito de Venturi - a corrente de ar é conduzida por um coletor de correntes de ar formado pelas construções projetadas num ângulo aberto ao vento. Seus efeitos indesejáveis podem ser minimizados ao construir a massa edificada na menor altura possível; com o adensamento do entorno imediato; ao dispor de braços porosos (espaçamento maior que a altura média do edifício) e ao se reduzir o comprimento destes braços porosos.</p>	

<p>Efeito de canalização – é o fenômeno de corrente de ar que escoar através de um canal formado pela massa edificada. Sua formação ocorre em espaços construídos de paredes pouco porosas e com espaçamento igual ou inferior aos das construções. Pode ser amenizado com um traçado de rua sob uma incidência entre 90° e 45°; espaçamentos com larguras superiores a duas vezes a altura das edificações e de maneira a introduzir as perdas de carga; e espaçamento que definam mal as ligações entre os edifícios.</p>	
<p>Efeito de malha – escoamento através de um arranjo de edifícios que forma pátios centrais ou bolsões. Fenômeno que produz um efeito indesejável para o clima quente e úmido, por reduzir a penetração do vento, devido à união dos edifícios.</p>	
<p>Efeito de pirâmide – é o fenômeno de escoamento do vento através da disposição dos edifícios em forma piramidal. Não oferece resistência ao escoamento da corrente de ar em nenhuma direção, pois sua geometria favorece a dissipação da energia do vento, o que contribui para a melhor ventilação dos edifícios do entorno.</p>	
<p>Efeito de união de zonas de pressão diferentes – ocorre por entre os edifícios dispostos ortogonalmente à direção dos ventos. Geram massas de ar de pressões diferentes que se interligam e promove a velocidade do escoamento do ar no sentido das pressões decrescentes. A altura dos edifícios exerce uma grande influência neste fenômeno.</p>	
<p>Efeito de esteira – é o efeito gerado pela união de zonas de pressão diferentes e pela ação turbulenta do ar. O fenômeno induz o ar a circular em forma de redemoinho na parte posterior do edifício. O comprimento da esteira está relacionado com a altura, largura e espessura do edifício.</p>	
<p>Efeito de redemoinho ou wise – é o fenômeno que ocorre em edifícios de grande altura em que o vento que incide diretamente na fachada produz uma área turbulenta na base do edifício. O efeito é reforçado com a presença de um edifício mais baixo.</p>	

Fonte: Adaptado de Gandemer (1978).

2.2.2 Os campos de pressão devido à ação do vento

A maioria desses efeitos aerodinâmicos é resultado dos campos de pressão gerados pelo movimento do vento que ao incidir sobre um obstáculo gera uma distribuição de pressão ao seu redor, e que pode causar pressões positivas (com a capacidade de empurrar a superfície

do corpo), e ou negativas (que exerce uma força de sucção). A pressão real do vento em um determinado ponto deste obstáculo é o produto da pressão dinâmica (Pd), que representa a energia cinética total do ar que atinge um corpo, e um coeficiente de correção (coeficiente de pressão – Cp).

O valor de coeficiente de pressão sobre a fachada principal de um edifício é condição essencial para as análises da ventilação. Define-se Cp como o quociente adimensional entre a pressão dinâmica medida em um ponto x na fachada do edifício (Px) e a pressão dinâmica do fluxo de ar (vento) não perturbado a barlavento (Pd), conforme expressa a equação 2 (CÓSTOLA; ALLUCI, 2011):

$$Cp = \frac{Px}{Pd} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$$Pd = \frac{\rho \cdot Vref^2}{2} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: ρ é a massa específica do ar (kg/m^3); $Vref$ é a velocidade do vento tomada na altura do edifício (m/s).

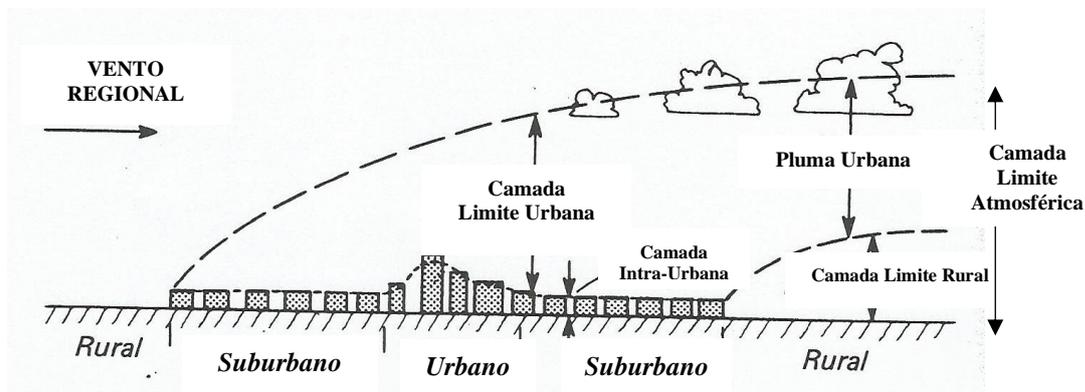
Os valores de coeficiente de pressão (Cp) variam em função da forma e porosidade do edifício, da geometria do entorno, e da direção do vento. Tradicionalmente são obtidos em testes de túnel de vento, mas pesquisas mais recentes já indicam para a possibilidade da obtenção de Cp através de simulações em CFDs desde que seja considerado aspectos como: a rugosidade do entorno do edifício; a densidade da malha adotada; e sensibilidade ao perfil do vento (BITTENCOURT, CÂNDIDO, 2005; CÓSTOLA, ALLUCI, 2011).

Apesar dos valores de Cp nas fachadas serem fundamentais para as análises sobre o vento, a capacidade de ação da ventilação natural sobre um arranjo é determinada a partir da diferença entre as pressões que incidem sobre as fachadas em que se localizam as aberturas de entrada e saída do ar (ΔCp). Segundo Leite (2015), o (ΔCp) constitui uma das variáveis que melhor sinaliza esse potencial do uso da ventilação natural em edifícios.

2.2.3 Perfil do vento em cidades

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é a faixa entre a superfície terrestre e a atmosfera onde o fluxo do ar sofre a influência do atrito da terra. É a região onde o escoamento do vento apresenta um gradiente vertical de velocidade. Segundo Oke (1987), a CLA é subdividida em Camada Limite Urbana e Camada Intra-urbana, como pode ser observado na Figura 10. Ela é delimitada de acordo com as características da superfície da topografia natural e das obstruções naturais e artificiais, até um nível onde a velocidade do vento se torna constante (SILVA, 2014).

Figura 10 - Níveis das camadas urbanas.



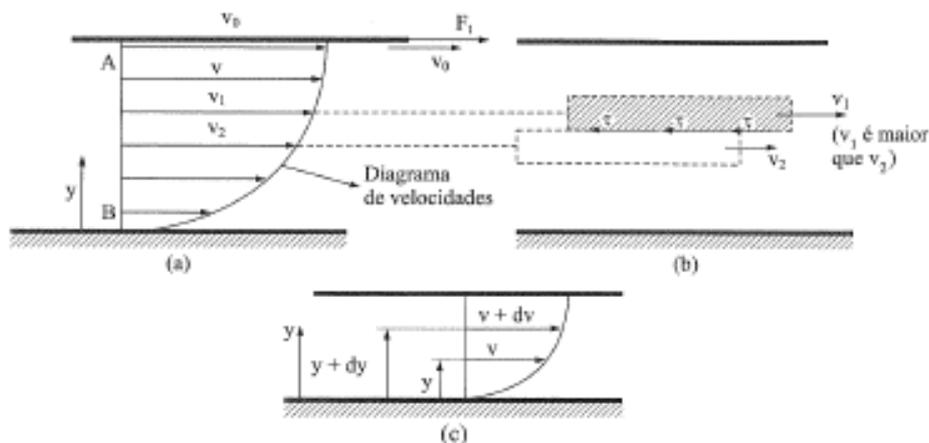
Fonte: Adaptado de Oke (1987).

A Camada Limite Urbana é importante para a ventilação, pois recebe impacto direto da rugosidade do meio urbano. Já a Camada Limite Intra-Urbana é composta por áreas não edificadas inseridas no ambiente construído, como ruas, praças, afastamento entre os edifícios, etc. Essa última camada pode apresentar diferentes condições de velocidades do ar, devido à interferência das características do meio edificado (SILVA, 2014).

Como já dito, os perfis típicos de vento são influenciados pelas características da superfície a ser ultrapassada, o que resulta em perfis com diferenças em altura. O fluxo de ar, ao entrar em contato com superfícies rugosas, sofre diferentes efeitos de fricção e é o grau de rugosidade das superfícies que compõe a cidade que determina a intensidade de tais efeitos.

Ao analisar a velocidade do vento ao longo de um eixo vertical, observa-se que essa velocidade varia de zero (na superfície terrestre), até uma velocidade idêntica à do fluxo livre de obstruções, gerando o que se chama de gradiente da velocidade do vento (SILVA, 2014). Esse fenômeno é explicado na mecânica dos fluidos, baseado na Lei de Newton da viscosidade, como o princípio da aderência: as partículas de um fluido em contato com uma superfície sólida irão apresentar a mesma velocidade do contorno sólido. Nota-se tal fenômeno na experiência de duas placas separadas entre si, com um fluido preenchendo esse espaço. Inicialmente as placas permanecerão em repouso, ao aplicar-se uma força F_t junto à placa superior, a partir de um dado instante essa placa vai se deslocar no fluido a uma velocidade constante V_0 (denominada de velocidade limite), enquanto que junto à placa inferior, estará com velocidade nula. As camadas intermediárias deverão se adaptar às extremas, adquirindo velocidades que variam de V_0 à nula, como pode ser identificado na Figura 11 (BRUNETTI, 2008).

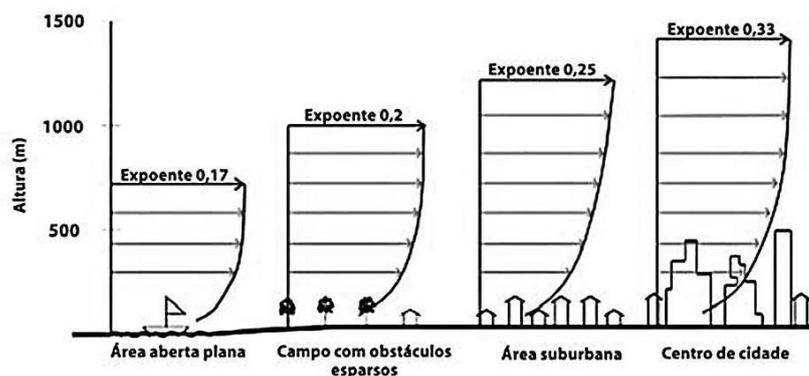
Figura 11 - Princípio da aderência.



Fonte: Brunetti (2008).

Ou seja, o ponto onde o vento é distante dos efeitos superficiais, onde já não existe a influência do atrito da terra, é chamado de altura do gradiente, e esta é definida em função da rugosidade do entorno. Áreas de campos abertos, áreas suburbanas ou cidades, apresentam diferentes alturas de gradientes. Sendo assim, a velocidade do vento na altura das aberturas de entrada do vento nas construções varia de acordo com o entorno circundante (BITTENCOURT, CÂNDIDO, 2005; OKE, 1987), conforme indica a Figura 12.

Figura 12 - Gradiente do vento para diferentes configurações de áreas.



Fonte: Jackman, 1980 *apud* Bittencourt e Cândido, 2005.

2.2.4 O papel da ventilação natural no desempenho térmico do ambiente construído

No ambiente construído, a ventilação natural pode exercer três funções principais: a renovação do ar, o resfriamento psicofisiológico e o resfriamento convectivo.

Potencializar a ventilação natural tem sido uma estratégia tradicionalmente utilizada, especialmente em regiões de climas quente e úmido, pois se apresenta como uma grande alternativa para economia de energia e para a melhoria da saúde dos usuários, uma vez que pode reduzir a dependência do uso de sistema de ventilação mecânica, por reduzir a carga térmica dos edifícios, bem como melhorar a qualidade do ar interior.

Em regiões que apresentam baixa velocidade do ar, o conforto térmico é tão sensível à temperatura radiante quanto à temperatura do ar (CLARK, 1989). Já em regiões bem ventiladas, o desempenho térmico pode ser avaliado a partir da temperatura do ar como parâmetro de conforto, ao invés da temperatura radiante, sem que se produzam erros significativos. O movimento do ar reduz a temperatura efetiva, que expressa o efeito combinado entre temperatura do ar, umidade relativa, radiação e movimento do ar; devido à evaporação do suor da pele e as trocas convectivas entre a corrente de ar e o corpo humano (ASHLEY e SHERMAN, 1984).

Zhou et al. (2014) afirmam que os principais fatores que afetam a movimentação do ar natural ao redor e dentro dos edifícios incluem: o meio e as suas características; a forma do edifício e o design de sua envoltória; e o planejamento e design dos ambientes internos.

No Brasil, país de clima tropical, de grande extensão territorial, em 99% do seu território é recomendável a ventilação natural como estratégia de resfriamento passivo, exceto para as cidades localizadas na Zona Bioclimática¹ 1, por apresentarem baixas temperaturas, sendo em 53,7% das cidades citadas pela norma recomendado a sua utilização cruzada de forma permanente e nas demais regiões de forma seletiva (ABNT, 2005).

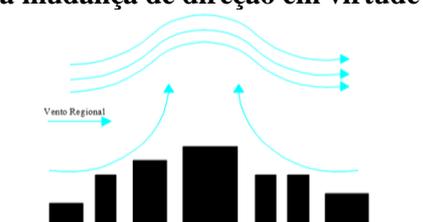
Liping; Hien e Li (2007) apontaram que no projeto de construção naturalmente ventilado, em climas quentes úmidos, deve-se observar às orientações, dispositivos de sombreamento, seleções de materiais e tamanhos das aberturas.

Em uma escala microclimática, a ventilação afeta diretamente os pedestres e as edificações, através das perdas de calor por convecção. O movimento do ar no meio urbano é definido e controlado a partir das massas edificadas, de sua forma, dimensões, de sua justaposição e da vegetação presente.

2.3 O desenho urbano e a ventilação urbana

No meio urbano existem outros fatores que influenciam as correntes de ar no nível local, como a forma das configurações urbanas. As características do meio urbano podem provocar alterações no seu microclima, e as diferenças de temperatura entre áreas vizinhas podem vir a alterar o vento regional e, inclusive, aumentar suas turbulências, gerando brisas locais que partem das áreas menos adensadas para as mais urbanizadas, como ocorre na formação das ilhas de calor. Dependendo da intensidade da ilha de calor formada, o vento regional pode ser afetado em sua direção e velocidade (Figura 13).

Figura 13 - Esquema da mudança de direção em virtude da ilha de calor.



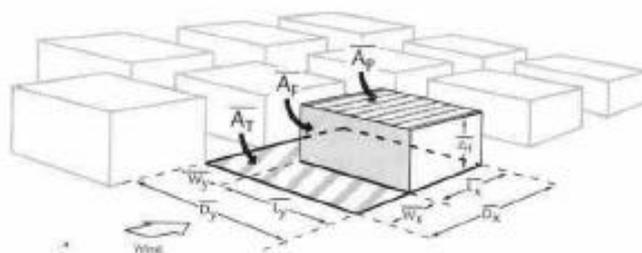
Fonte: Autora (2017).

¹ A Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações, NBR 15220:2005 (ABNT, 2005), estabelece o zoneamento bioclimático para o Brasil, apontando recomendações e estratégias construtivas para edificações unifamiliares de interesse social, de acordo com as suas características climáticas.

2.3.1 Efeitos da rugosidade urbana

O escoamento do fluxo do vento também varia em função do tipo de superfície e do padrão de adensamento das áreas urbanas. Autores como Grimond e Oke (1999) desenvolveram alguns parâmetros da forma da cidade com o objetivo de dimensionar o grau de adensamento de determinada porção do território, e que pode vir a contribuir para o estudo do conforto térmico em áreas urbanas ventiladas (CHEN et al., 2017). Como parâmetros da forma têm-se o índice da área plana $\lambda_p = AP/AT$ e o índice da área frontal $\lambda_F = AF/AT$, onde AT é igual a área total em planta da superfície analisada, AP é a área de projeção dos edifícios em planta e AF é a área total das fachadas voltadas para o vento dominante, como demonstra a Figura 14.

Figura 14 - Definição das dimensões de superfícies utilizadas como medida de densidade urbana.

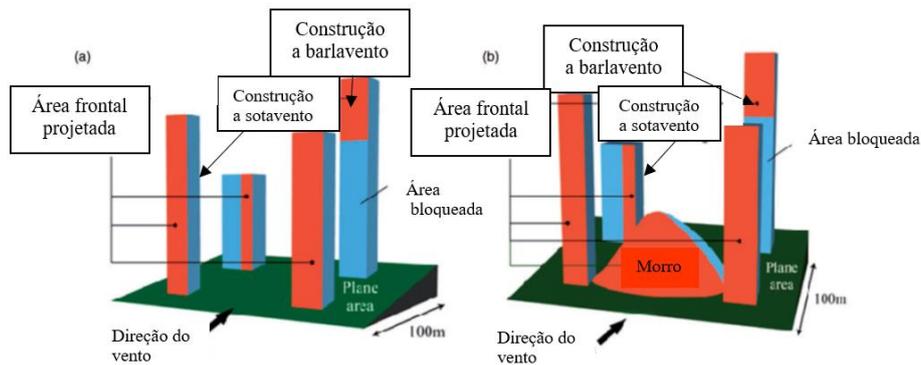


Fonte: Grimond e Oke (1999).

Tradicionalmente, o índice de área frontal é função da direção do vento e dos edifícios, onde é computada a área integrada de cada fachada do arranjo, posicionada para a direção do vento dominante e dividida pela área total plana. O método foi criado para se aplicar em locais de topografia praticamente plana, para não haver influência das condições de relevo na estimativa da rugosidade (FERREIRA, 2009).

No entanto, Chen et al. (2017) modificaram o método de cálculo de Grimond e Oke (1999) para considerar a presença da topografia. O estudo foi feito a partir da análise detalhada sobre a comparação do potencial de ventilação com e sem a topografia, de modo a melhorar a precisão do resultado na aplicação dos índices λ_P e λ_F para regiões montanhosas de terrenos complexos, a exemplo da cidade de Renhuai, em Guizhou, na China (Figura 15).

Figura 15 - Exemplo de cálculo da área frontal em (a) método tradicional - negligenciando a elevação do terreno, (b) modificado.



Fonte: adaptado de Chen et al. (2017).

$$\lambda_{f(\theta)} = \frac{A_{F(\theta)} Z_{meanT}}{A_T} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$\lambda_{f(\theta)}$ é o índice de área frontal voltada para o vento dominante;

$A_{F(\theta)}$ é a área total das fachadas das edificações voltada para o vento dominante;

A_T é a área total em planta da superfície analisada;

Z_{meanT} é a altura média da área plana.

$$\lambda_p = A_p / A_t \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

λ_p é o índice de área plana;

A_p é a área de projeção dos edifícios em planta;

A_t é a área total em planta da superfície analisada.

Esses parâmetros da forma contribuem para o entendimento do que ocorre quando em uma determinada superfície são adicionados obstáculos que fazem com que o solo adquira maior rugosidade. A partir de um determinado padrão de densidade (λ_p), os elementos não representam mais obstáculos isolados e passam apenas para reduzir a resistência aerodinâmica. Em seu limite extremo ($\lambda_p = 1$), a proximidade do arranjo construtivo é tão grande que passa a formar uma nova superfície, desviando com isso o fluxo de ar para cima dos obstáculos, como explicado anteriormente no item 2.2.1 (FERREIRA, 2009).

Segundo Chen et al. (2017), para adquirir informações das características da geometria ou textura da superfície, vários parâmetros de rugosidade devem ser estudados, a exemplo do deslocamento do plano zero (Z_d), do comprimento de rugosidade (Z_o), da densidade do índice da área plana (λp), índice da área frontal (λF), da altura média ponderada da área frontal (Z_h), dentre outros. Os parâmetros mais usados, segundo os autores, são Z_d e Z_o . Essas variáveis estão relacionadas com a forma, altura, densidade do recorte urbano, dentre outras.

O comprimento de rugosidade (Z_o) corresponde à altura a partir do solo em que a velocidade do vento é igual a zero, considerando que o perfil do vento possui uma variação logarítmica com a altitude. Já o deslocamento do plano zero (Z_d) representa o nível onde o fluxo médio de quantidade de movimento é absorvido. Uma maneira de determinar esse fator em uma área de edifícios é calcular a altura média deles. Considerando ser apenas os prédios as barreiras para o fluxo, o Z_d se localizará a $2/3$ da altura média dos edifícios (LOPES, 2003).

O valor de Z_o é influenciado por inúmeros fatores, fazendo com que seu processo de resolução seja bastante complexo. Deste modo, não existe uma unanimidade quanto ao melhor método de dimensionamento de Z_o . Ferreira (2009), em sua pesquisa, fez um compêndio das principais publicações que sugerem classes de rugosidade e respectivos valores para Z_o de acordo com a característica da cobertura do solo (Tabela 1). Para a presente tese será utilizado o dado de comprimento de rugosidade de 0.03, conforme será melhor explicado no item 4.5.

Tabela 1 - Valores de Z_o para diferentes tipos de superfícies.

Tipo de cobertura	Z_o (m)		
	Davenport	Spera	Atlas Europeu
Mar aberto ou corpos d'água	0,0002	0,0001 a 0,001	0,0001
Praias, áreas planas sem obstáculos, solo coberto por neve	0,005	0,0001 a 0,002	-
Pradarias, tundra e aeroportos	0,03	-	0,01
Áreas com plantas baixas e poucos obstáculos	0,10	0,002 a 0,30	0,03 a 0,10
Culturas agrícolas de altura variável e obstáculos dispersos	0,25	-	0,15 a 0,30
Áreas intensamente cultivadas com muitos obstáculos agrupados, separados por espaços abertos, ou áreas com edifícios baixos (subúrbios)	0,50	0,40	0,50
Áreas ocupadas por obstáculos regulares e de mesma altura (áreas florestadas, áreas urbanas densamente ocupadas com prédios com pouca variação altimétrica)	1,0	1,2	-
Centros de cidades com edifícios de diferentes alturas	$\geq 2,0$	3,0	1,0

Fonte: Ferreira (2009).

A determinação da rugosidade de um tecido urbano pode ser feita a partir de dois tipos de métodos: morfométricos e anemométricos. O método anemométrico é realizado a partir de observações de campo de vento, com a finalidade de verificar os padrões aerodinâmicos, através de relações teóricas provenientes do comportamento logarítmico do vento. Já o método morfométrico utiliza algoritmos que relacionam parâmetros aerodinâmicos com medidas da morfologia da superfície (GRIMMOND e OKE, 1999). Os autores sugerem que quando não for possível realizar medições ou análises morfométricas no tecido urbano, que sejam utilizados valores típicos das propriedades aerodinâmicas (Tabela 2).

Tabela 2 - Rugosidade típica e outras propriedades aerodinâmicas para áreas urbanas homogêneas.

Forma da superfície urbana	Zh (m)	Zd (m)	Zo (m)	Cd (x 10 ⁻²)
Baixa altura e densidade Residencial – 1 ou 2 andares, jardins, residência e pequeno comércio.	5 - 8	2 - 4	0,3 – 0,8	0,6 - 1
Média altura e densidade – 2 ou 3 andares, igrejas, escolas,	7 - 14	3,5 - 8	0,7 – 1,5	0,9 - 1,5
Alta altura e densidade - Residencial < 6 andares, fábrica, universidade	11 - 20	7 - 15	0,8 – 1,5	1,0 – 1,6
Arranha-céu - Núcleos urbanos ou suburbio com torres de blocos, ambientes urbanos densos	>20	>12	> 2,0	>1,9

Fonte: Adaptado de Grimmond e Oke (1999).

Onde:

Zh = altura média ponderada da área frontal;

Zd = deslocamento do plano zero;

Z0 = comprimento de rugosidade;

Cd = coeficiente de arrasto para obstáculos isolados.

A partir do método morfométrico, alguns autores desenvolveram equações matemáticas para determinar o comprimento de rugosidade no tecido urbano. Segundo Grimmond e Oke (1999) e Ferreira (2009), os modelos mais amplamente utilizados são:

Macdonald et al. (1998):

(Equação 6)

$$\frac{z_d}{z_H} = 1 + \alpha^{-\lambda_P} (\lambda_P - 1)$$

$$\frac{z_0}{z_H} = \left(1 - \frac{z_d}{z_H}\right) \exp \left\{ - \left[0,5 \beta \frac{C_D}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{z_H}\right) \lambda_F \right]^{-0,5} \right\}$$

Lettau (1969) apud Grimmond e Oke (1999):

(Equação 7)

$$z_0 = 0,5 \overline{z_H} \lambda_F$$

Regra Prática (GRIMMOND e OKE, 1999):

(Equação 8)

$$z_0 = f_0 \overline{z_H}$$

Ferreira (2009) utilizou os três modelos citados anteriormente, a fim de determinar o comprimento de rugosidade em trechos urbanos de Belo Horizonte, e obteve os seguintes valores para cada tipologia de arranjo analisada (Quadro 2):

Quadro 2 - Valores calculados de Zo para tecidos urbanos de Belo Horizonte.

Trecho urbano	Zo (m)		
	Macdonald et al	Lettau	Regra prática
Presidente JK	0,14	0,08	0,33
Pampulha Pa	0,12	0,11	0,66 0,39
Prado Pr	0,05	0,21	
Lourdes Lo	2,43	2,55	1,97
Centro Ce	0,76	6,09	3,80

Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

A partir de simulações paramétricas com o software WindMap, Ferreira (2009) verificou que o programa apresentou diferentes respostas no comportamento do vento para cada valor de Zo aplicado. Sendo o método da Regra prática o único que apresentou estimativas que satisfizessem respectivamente aos limites do software e aos critérios estabelecidos por Grimmond e Oke (1999).

Chen, LU e YU(2017), a partir da equação de Bottema (1997); Bottema e Mestayer (1998), destinada para grupos de construções regulares. Estabeleceu ajustes para a sua aplicação em grupos de construções irregulares:

$$Z_0 = (Z_h - Z_d) \exp\left(-\frac{0.4}{\sqrt{\lambda_f}}\right) \quad (\text{Equação 9})$$

Onde: Z_0 é o comprimento de rugosidade;
 Z_h é a altura média ponderada da área frontal;
 Z_d é deslocamento do plano zero;
 λF é o índice da área frontal.

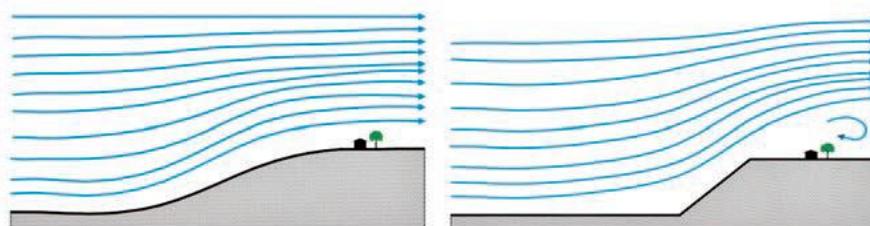
O objetivo dos autores foi verificar a relação entre o índice de área frontal e corredores urbanos de ventilação para a região montanhosa de Renhuai, na China.

A mensuração dos padrões de rugosidade se torna importante para o entendimento do comportamento do vento sobre uma dada superfície. Desta forma, para a presente tese, paralelamente às simulações, são dimensionados o grau de adensamento dos cenários urbanos simulados, utilizando-se para isto o índice da área plana (λp) e o índice da área frontal (λF).

2.3.2 Relevo e a ventilação no meio urbano

A configuração da topografia pode promover a alteração da velocidade e direção do vento, como também do teor de umidade de uma determinada região. Em terrenos inclinados, o comportamento do vento pode ocorrer de maneira diferente quando essa inclinação for mais suave ou mais acentuada. Em declividades acentuadas poderá ainda existir a separação do fluxo do ar, criando zonas de recirculação do ar (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2005) (Figura 16).

Figura 16 - Efeito do perfil da encosta no padrão de vento.

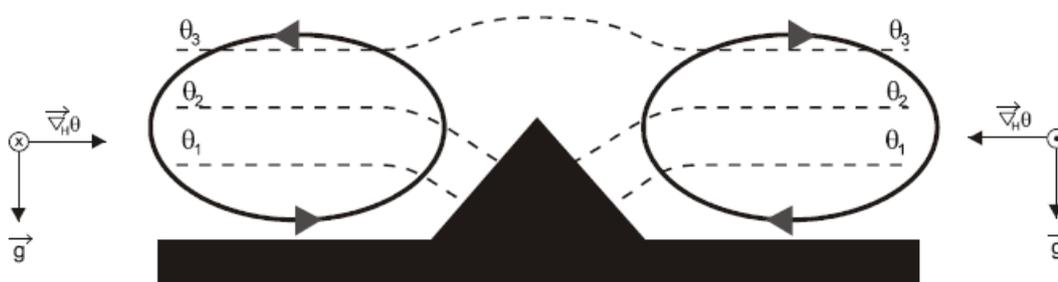


Fonte: Adaptado de Aynsley, Melbourne e Vickery (1977).

Segundo Lee e Kimura (2001), na mesoescala, as circulações atmosféricas do tipo vale / montanha, que estão associadas com a influência térmica da topografia e da ocupação do solo, são denominadas Ventos Anabáticos. Ocorrem geralmente em conjunto com as variações espaciais dos ciclos diurnos de calor sensível e estão fortemente relacionadas com as modificações da camada limite atmosféricas observadas em regiões com topografia e ocupação do solo complexas.

Sousa (2006) define o vento Anabático como o escoamento que se forma na encosta de uma montanha, resultante da diferença de aquecimento entre o ar próximo à superfície (ar mais quente) e o ar afastado da superfície a mesma altura (ar mais frio). Este escoamento ocorre no período diurno no sentido da região mais baixa para a região mais alta, conforme Figura 17.

Figura 17 - Vento Anabático. A circulação é no sentido anti-horário no lado esquerdo da montanha e no sentido horário no lado direito da montanha.



Fonte: SOUSA (2006).

Sousa (2006) investigou a influência da ocupação e da topografia na camada limite planetária sobre a cidade de São Paulo, a partir de simulações computacionais de modelos teóricos e representativos. Através do estudo foi verificado que em situações da existência da topografia real, mas sem a presença da ocupação urbana, houve a tendência ao aumento da

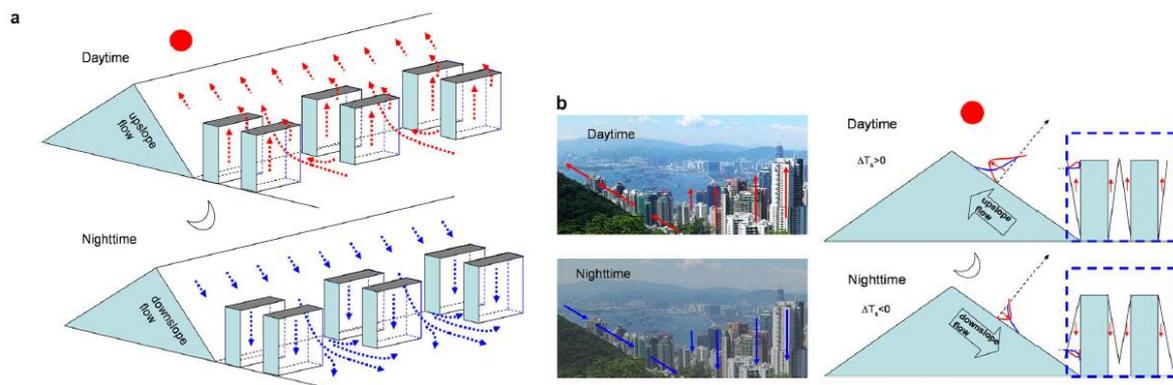
turbulência e da circulação do tipo vale-montanha. Nos cenários onde foi considerada a presença de uma malha urbana homogênea, verificou-se maior intensidade dos efeitos de turbulência.

Outros estudos já foram realizados sobre a influência de terrenos em aclives sobre a ventilação no meio urbano, com a finalidade de avaliar o seu resultado no transporte e dispersão de poluentes, no desempenho térmico nas superfícies externas dos edifícios, como também o impacto das cargas de vento nas estruturas e sobre edificações de mesma configuração. Nos estudos encontrados, observa-se que as pesquisas sempre foram direcionadas a um meio urbano homogêneo, sem a heterogeneidade da altura dos edifícios e dos afastamentos entre eles.

A literatura indica que a ventilação natural pode sofrer influência da configuração do relevo e das diferenças de temperatura do ar do ambiente, como também de ocupações urbanas complexas (BODHISATTA, 2014; LUO e LI, 2011; ZARDI e WHITEMAN, 2012; YANG e LI, 2009). Um dos fenômenos mais recorrentes é o de convecção natural, que é geralmente associada às diferenças de densidade do fluido, induzida por diferenças de temperatura e que segundo Luo e Li (2011), são mais presentes em regiões com a ausência ou pequena intensidade de ventos.

Yang e Li (2009), por meio de câmera infravermelho, avaliaram e quantificaram a ventilação urbana entre edifícios e encosta na região de Hong Kong. Observaram que o aquecimento das superfícies das paredes dos edifícios e da encosta da montanha durante o dia produziu flutuações ascendentes do ar vindo da enseada. Durante a noite ocorre o efeito contrário e há um fluxo descendente do ar, devido ao resfriamento das superfícies (Figura 18).

Figura 18 - Perfis esquemáticos do fluxo do vento na parede e na inclinação do terreno. (a) ilustração 3D; (b) ilustração 2D.



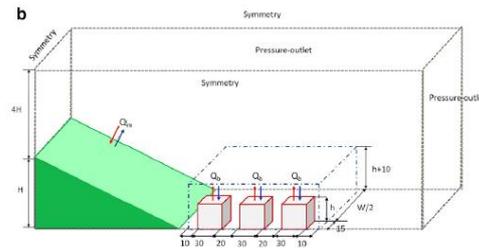
Fonte: YANG e LI (2009).

Os autores afirmam que esse tipo de corrente de ar prevalecem na ventilação de cidades cujo fluxo dos ventos dominantes são fracos, ou seja, são de baixa intensidade. Os fluxos ascendentes são também mecanismos cruciais de transporte de poluentes atmosféricos em terrenos complexos (YANG e LI, 2009; REUTEN, 2006).

Luo e Li (2011) avaliaram parametricamente em CFD a ventilação em modelos de cidades de região montanhosa e que apresentam ventilação de baixa intensidade, a exemplo de Tóquio, no Japão; Los Angeles e Phoenix, nos EUA, e Hong Kong. Para os autores, em regiões que apresentam ventilação com baixa intensidade, a exemplo das já citadas, a solução disponível para a ventilação é através do fluxo de ar induzido termicamente, que se desenvolve a partir da diferença de temperatura entre a superfície e o ar ambiente, ocasionada pela variação de densidade. Essa diferença no peso específico promove a convecção natural, o que faz com que o fluxo ascendente se desenvolva.

Em tal estudo paramétrico, o ângulo da inclinação da montanha (20°) e a altura da montanha (500 m) foram considerados constantes e as variáveis foram a intensidade de aquecimento / resfriamento das construções e montanhas e a altura das edificações (10, 20, 60 e 100 m – considerada uma altura por vez), conforme Figura 19.

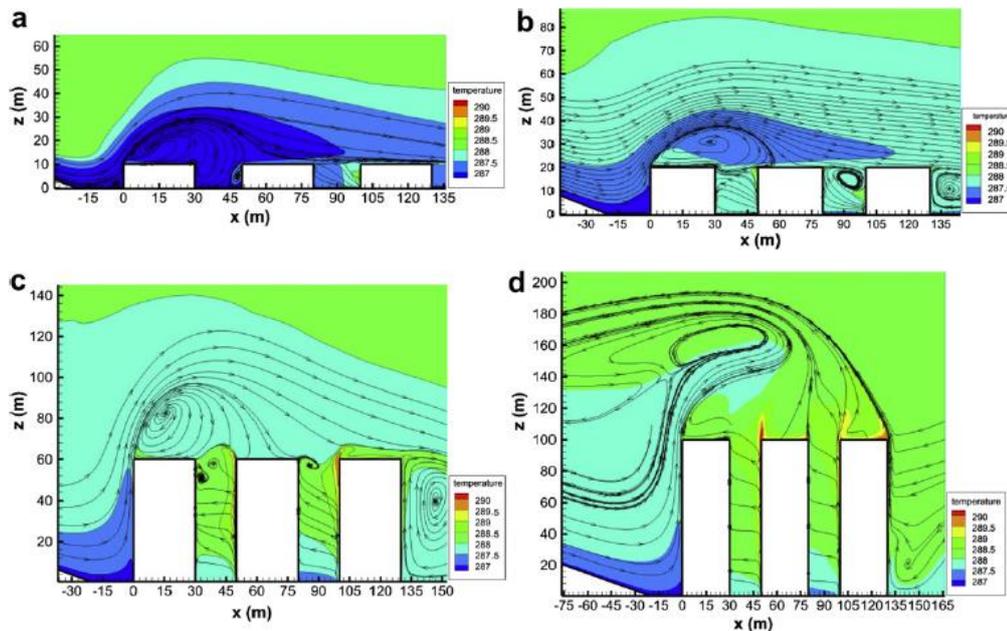
Figura 19 - Modelo esquemático para avaliar a ventilação em região montanhosa.



Fonte: Luo e Li (2011).

A análise do efeito da alteração de altura da construção revela que tal variável é um parâmetro significativo para o fluxo convectivo natural. Em termos de temperatura do ar, encontrou-se temperatura mais baixa nos cânions de ruas dos modelos com prédios mais baixos (Figura 20).

Figura 20 - Distribuição da temperatura do ar. a) Edifícios de 10 metros; b) Edifícios de 20 metros; c) Edifícios de 60 metros; d) Edifícios de 100 metros.



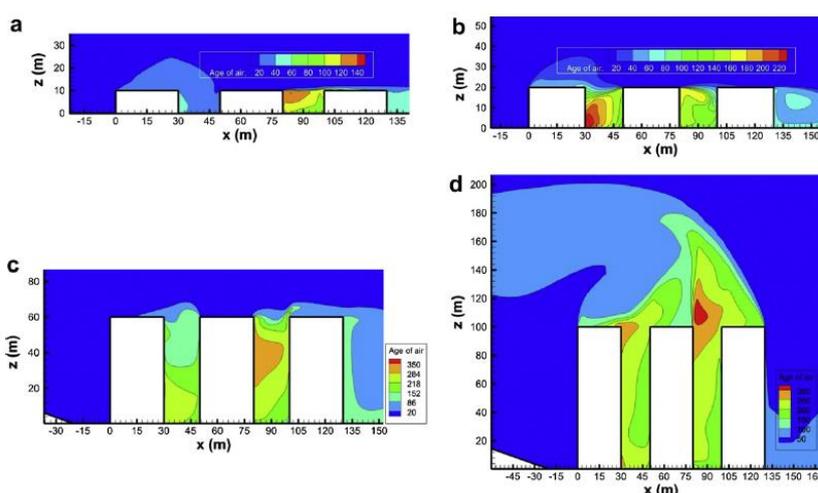
Fonte: Luo e Li (2011).

Para edifícios de grande altura, o vento descendente ocorreu a diminuição do ambiente térmico ao nível do pedestre. Por outro lado, houve um aumento da temperatura com a altura devido à natureza do fluxo convectivo nos níveis superiores (Figura 20).

A taxa de renovação do ar foi mais baixa no nível dos edifícios de 60 metros, causando uma maior estagnação do ar (Figura 21).

Para os edifícios de grande altura (100 metros), a estagnação do ar foi menor ao nível do pedestre e aumenta nos pontos mais altos do edifício. A razão para isto é que a partir de certa altura dos edifícios, o vento não consegue penetrar entre as edificações, seguindo paralelamente a camada urbana limite. O fluxo descendente penetra apenas através das ruas secundárias convergindo para a rua principal, fazendo com que o ar na parte mais baixa do cânion urbano seja renovado e as temperaturas sejam mais baixas (Figuras 20 e 21).

Figura 21 - Renovação do ar. a) Edifícios de 10 metros; b) Edifícios de 20 metros; c) Edifícios de 60 metros; d) Edifícios de 100 metros.



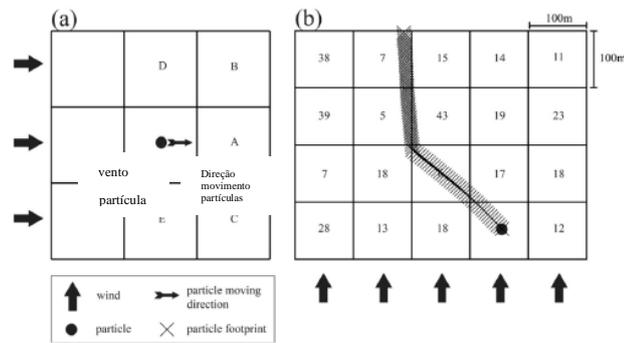
Fonte: Luo e Li (2011).

Segundo os autores, em condições de regiões com vento estagnado é preciso prestar mais atenção em diminuir a temperatura do topo dos edifícios altos, porque o ar quente (que subiu por convecção) não se dissipa facilmente. Uma solução seria a utilização de paredes vegetadas ou tetos verdes. Vale salientar que não foram consideradas variações de altura para um mesmo cenário, ou seja, foram simulados cenários com edifícios de mesma altura.

Yim; Fung; Ng (2014) desenvolveram um indicador para avaliar o potencial de ventilação do ar e dispersão de poluentes no dossel urbano para o terreno complexo de Hong Kong. Nos cálculos de tal indicador envolveram variação de velocidade e direção do vento. Um programa de rastreamento de partículas fluidas foi desenvolvido e aplicado para identificar os principais caminhos de vento na região urbanizada de *Kowloon West*, em uma área de aproximadamente 5,5 a 6 km de extensão. Foi verificado que o transporte de partículas dentro de uma cidade depende não só do arrasto gerado pela morfologia do edifício, mas também da interação entre fluxos e diferentes obstáculos no meio urbano como árvores, trânsito e outros obstáculos.

Os resultados indicaram que o arrasto na camada urbana pode ser um indicador de avaliação eficiente para o planejamento urbano quando se lida com a poluição do ar urbana em uma escala de vizinhança, pois é possível identificar os caminhos dos ventos, as áreas críticas de ventilação, como também o tempo para dispersão dos poluentes (Figura 22).

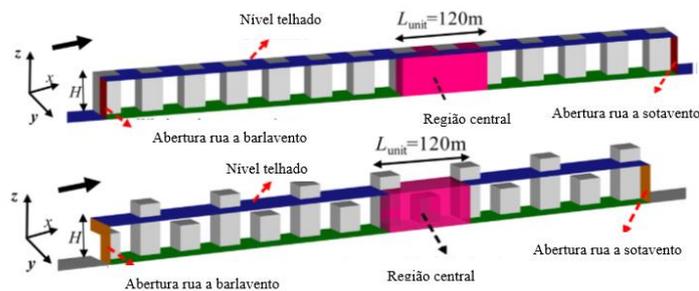
Figura 22: (a) Diagrama esquemático do programa de rastreamento de partículas de fluidos. (b) Um dos casos de verificação do modelo de rastreamento de partículas fluidas (vista superior).



Fonte: adaptado de Yim; Fung; NG (2014).

Lin et al. (2014) avaliaram a ventilação na camada do dossel urbano para diferentes escalas urbanas, arranjos urbanos, direção dos ventos e variação de altura dos edifícios, mas com a mesma densidade média do edifício, sob condições atmosféricas neutras (Figura 23).

Figura 23: Variação de altura dos edifícios.



Fonte: adaptado de LIN, et al. (2014).

As taxas de renovação do ar diminuem à medida que a escala urbana aumenta. A forma urbana (390 x 390 m) quadrada apresentou melhor desempenho da ventilação com direção de vento à 0° , em relação aos oblíquos (15° , 30° e 45°). Já a forma urbana retangular (570 x 270m) teve a pior ventilação global, mas apresentou melhor desempenho sob direção dos ventos oblíquos. A variação de altura dos edifícios melhorou a troca de ar vertical através

da camada superior das ruas, fortaleceu os fluxos de ar perto dos edifícios mais altos e enfraqueceu o vento perto dos edifícios mais baixos. Mas seus efeitos para a taxa de renovação do ar da camada urbana geral foram pequenos.

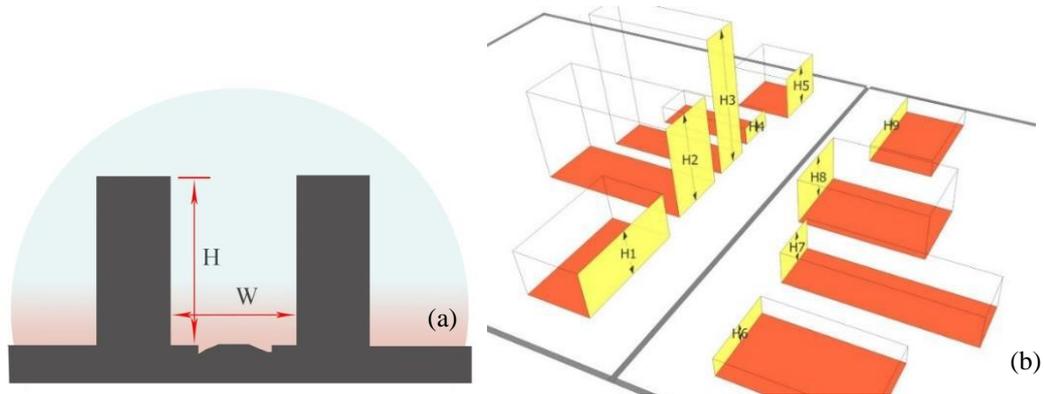
2.3.3 Porosidade, densidade construtiva, edifícios altos e a ventilação urbana

Além da rugosidade, já citada, existem outros condicionantes urbanos responsáveis pela modificação do perfil do vento, como: a porosidade, densidade construída e ocupação do solo; horizontalidade e verticalidade construtiva, presenças de massas d'água, e vegetação (NG et al., 2011). Tais fatores podem afetar de maneira significativa a permeabilidade do vento nos ambientes construídos, resultando em áreas com fortes correntes de vento ou em zonas de estagnação de ar. Esses fatores podem afetar o conforto térmico do pedestre ao ar livre e a dispersão de poluentes, gerados pelo tráfego urbano.

Sacre (1983) afirma que para uma mesma altura, de cerca de 20 m a cima do solo, pode-se observar uma velocidade média, em torno de 20 a 30% menor na cidade, em relação a áreas menos adensadas. Por outro lado, a turbulência aumenta na ordem de 50 a 100%. Fatores como a orientação das ruas e das quadras urbanas também podem influenciar o comportamento do escoamento do ar na malha urbana.

Oke (1987) mostra o efeito da orientação e também do prospecto médio em cânions urbanos. Em malhas urbanas extremamente densas e rugosas, onde há a existência de grandes prospectos médios, a velocidade do vento é reduzida e o calor mais dificilmente dissipado. Cânion Urbano seria a região entre as fachadas, edifícios opostos e o plano da rua que os separa. Seu prospecto médio seria a relação H/W (Altura dos edifícios e a Largura da via), e tal relação reduz o *Sky View Factor* (SVF - fator de céu visível). O autor destaca a importância do parâmetro SVF ao se analisar as trocas de calor e radiação dentro do cânion urbano. Além disso desenvolve uma fórmula matemática em que a máxima intensidade da ilha de calor é correlacionada diretamente com o SVF (Figura 24).

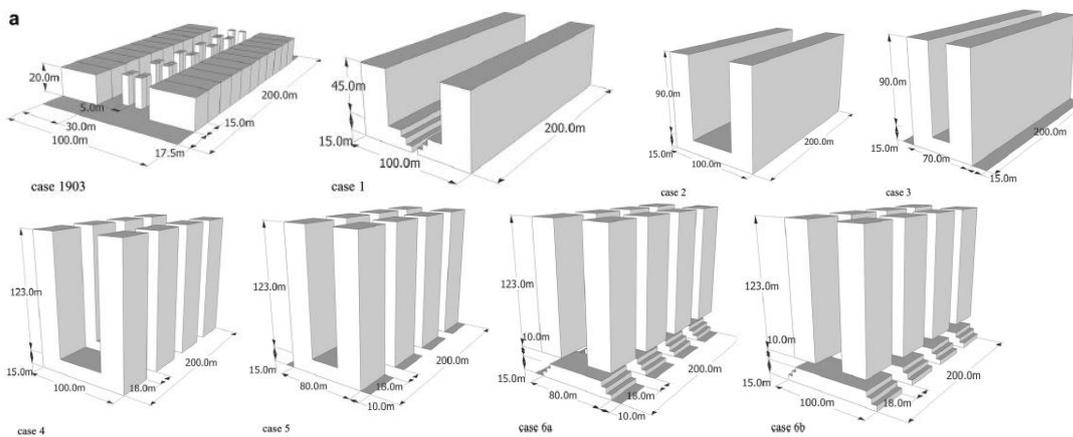
Figura 24 - Perfil vertical do cânion urbano representando a relação H/W (a); e visão tridimensional do cânion com destaque para as áreas consideradas para o cálculo do comprimento de rugosidade (b).

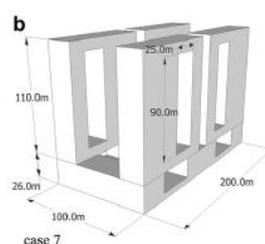


Fonte: (NAKATA-OSAKI; SOUSA; RODRIGUES, 2016).

Yuan e Ng (2011) utilizaram o modelo matemático de turbulência *RANS k- ω SST* (*Shear Stress Transport*) para simular o fluxo de ar nas zonas urbanas em torno de nove cenários de edifícios para Hong Kong (Figura 25), a partir de simulações computacionais paramétricas. Para isto utilizou o programa *Fluent*, que se baseia na dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics — CFD*), a fim de avaliar o efeito da porosidade construtiva sobre a ventilação natural.

Figura 25 - Nove modelos projetados para testar os efeitos de diferentes morfologias de construção no desempenho da ventilação natural.





caso 1903: forma urbana em 1903;
 caso 1: forma urbana atual;
 caso 2: forma urbana futura, com torres de 90m de altura e 100% de taxa de cobertura (100% SC);
 caso 3: semelhante ao caso 2, mas com 70% de taxa de cobertura (70% SC);
 caso 4: semelhante ao caso 2, mas com separação das construções e altura das torres de 123 m;
 caso 5: combinação do caso 3 e 4;
 caso 6a: semelhante ao caso 5, mas com pódio e área vazada de 10 m de altura;
 caso 6b: semelhante ao caso 6a, mas com taxa de cobertura de 100% (100% SC);

Fonte: Adaptado de Yuan e NG (2011).

A análise numérica permitiu comparar os efeitos de diferentes modificações de morfologia do edifício sobre a ventilação natural ao nível do pedestre.

Este estudo também resultou em uma classificação de velocidade do vento baseado no conforto térmico ao ar livre. Isso foi feito a partir da frequência relativa da velocidade do vento no nível do pedestre e no nível do perfil vertical da velocidade média do vento, de modo a avaliar o desempenho da ventilação natural nos *canyons* urbanos. No estudo paramétrico computacional, a classificação da velocidade do vento foi derivada com base na Temperatura Equivalente (PET) para avaliar seu efeito no conforto térmico exterior. Definiram tais níveis de classificação: **Nível 1:** $u < 0,3$ m/s - Estagnada; **Nível 2:** $0,6$ m/s $> u \geq 0,3$ m/s – Pobre; **Nível 3:** $1,0$ m/s $> u \geq 0,6$ m/s - Baixa; **Nível 4:** $1,3$ m/s $> u \geq 1,0$ m/s - Satisfatória e; **Nível 5:** $u \geq 1,3$ m/s – Boa.

A partir dos resultados, os autores teceram algumas considerações:

- Na configuração da malha urbana, as ruas principais devem ser dispostas ao longo da direção do vento predominante e a eficiência do modelo de edifício vai depender da orientação em relação a esse vento;
- O desempenho da ventilação urbana no nível do pedestre vai depender da porosidade construtiva;
- A redução da taxa de cobertura do solo melhora o desempenho da ventilação natural no nível do pedestre;
- Incorporar no volume do edifício espaços vazados, na direção do vento dominante, melhora o desempenho da ventilação no nível do pedestre;

- A permeabilidade do vento na camada do pódio é muito útil para liberar fluxo de ar nos canyons de rua.

Em meio aos avanços tecnológicos que possibilitam a conquista de edifícios cada vez mais altos, diversas questões relacionadas às vantagens e desvantagens quanto ao consumo energético, custos de operação e manutenção predial, efeitos psicológicos de alturas excessivas e riscos de impacto ambiental vêm desafiando os paradigmas da verticalidade (GONÇALVES e ROMERO, 2002).

Para Gonçalves et al. (2015), em edifícios altos, a ventilação natural é favorecida nos pavimentos mais superiores, pela sua maior exposição às correntes de vento. Os *canyons* urbanos de proporções compactas contribuem para que a ventilação natural nos pavimentos mais baixos seja prejudicada, devido ao efeito de barreira causado pelas paredes da envoltória dos edifícios.

Gonçalves et al. (2015) destacam que além do maior fluxo do vento, os andares mais altos ficam mais distantes da poluição atmosférica, que geralmente se concentram nos primeiros pavimentos do ambiente urbano, o que para edifícios localizados em grandes centros urbanos é um aspecto muito significativo. No entanto, a altura pode implicar em uma maior exposição às fontes de ruído, e nesse aspecto se inclui o próprio ruído gerado pela passagem do fluxo de ar através das aberturas, como também, a ocorrência da intensidade do ar acima do aceitável para o conforto térmico no ambiente interior.

ZHOU et al. (2014) propuseram uma otimização de projeto em edifícios altos para a região chinesa de Chongqing, com o objetivo de potencializar a captação da ventilação natural. A proposta foi desenvolvida com base em três estágios de otimização (Figura 26):

Figura 26 - Três estágios do procedimento de otimização do projeto.

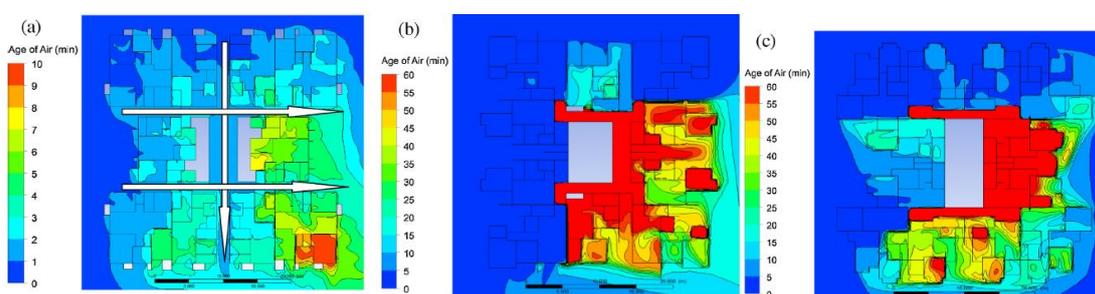


Fonte: Adaptado de ZHOU et al. (2014).

- I. Nível da comunidade (que incluem o estudo da melhor orientação dos edifícios, em relação aos ventos dominantes e o espaçamento entre eles);
- II. Nível da planta baixa (circulação do vento nos espaços internos e otimização dos corredores de vento);
- III. Nível do ambiente (*layout*, posição, tamanho e quantidade de aberturas).

O efeito do espaçamento e da orientação da construção foi investigado através da análise dos campos de velocidade do ar e de pressão de vento, pelo método computacional de dinâmica de fluidos (*software ANSYS Fluent 12.1*). Constatou-se que houve um melhor potencial de ventilação natural com o aumento da distância entre edifícios e uma diminuição do ângulo entre a construção e a direção do vento. Foi demonstrado que a diferença de pressão entre edifícios aumentou 20% e a diferença de pressão entre as 5 unidades habitacionais do quinto andar selecionadas aumentou em 25% quando a distância entre edifícios aumenta de 28 m para 34 m. Demonstrou-se ainda que a diferença de pressão entre edifícios aumentou em 13% e a diferença de pressão entre unidades habitacionais aumentou 27% com a mudança de orientação de construção do modelo de referência para o modelo otimizado, se o espaçamento entre os edifícios permanecesse igual a 34 m (Figura 27).

Figura 27 - Comparação da corrente de ar: (a) construção otimizada; B) Edifício convencional 1; e (c) Edifício Convencional 2.



Fonte: ZHOU et al. (2014).

A literatura apresenta alguns autores que estudaram diferentes fatores que podem afetar significativamente os perfis de vento no meio urbano: Hagishima et al. (2009), adição de ventos oblíquos; Rafailidas (1997), telhados adicionados aos edifícios; Kanda (2006); Xie, Coceal e Castro (2008); Hagishima et al. (2009); Millward-Hopkins et al. (2011); Lee, Jusuf e Wong (2013), variação de altura dos edifícios. Todos com o objetivo de alterar significativamente a rugosidade de uma superfície.

Dentre todos os estudos, a variabilidade da altura pode ser um dos parâmetros da superfície rugosa que mais influencia os perfis de vento no meio urbano (MILLWARD-HOPKINS et al., 2011).

Para muitos autores, a verticalização construtiva é vista como uma das principais formas de adensamento da cidade, sendo uma das principais responsáveis pela criação de novas morfologias urbanas, uma vez que é ditado um novo padrão de ocupação do solo verticalizado. (LEITE, 2015; UMAKOSHI, 2014; GONÇALVES et al., 2015; ZACARIAS e RIBEIRO, 2016).

Para Umakoshi (2014), quanto mais alto é o edifício, melhor é o seu desempenho ambiental para a iluminação e ventilação natural, uma vez que as plantas tendem a ser mais estreitas. Contudo, sua performance está ligada diretamente às condições climáticas, ao projeto e à ocupação.

No entanto, áreas frequentemente marcadas por forte verticalização associada à alta densidade construtiva tendem a causar alterações no clima original e a formar diferentes microclimas ao longo do tecido urbano, podendo resultar no comprometimento do desempenho térmico das edificações e na qualidade dos espaços urbanos, especialmente na altura do pedestre.

As modificações no microclima podem resultar em aspectos negativos, na medida em que são desconsiderados parâmetros como a taxa de ocupação do solo, além das características físicas e climáticas do lugar em questão.

Configurações de edifícios altos podem gerar grandes barreiras à circulação do ar, gerando trechos sombreados e elevadas turbulências em seus arredores (PRATA, 2005; LEITE, 2015). Essas alterações podem aumentar os níveis de conforto humano, diminuindo assim o consumo de energia. Como exemplo, cidades com temperaturas mais elevadas, a arborização junto às edificações podem proporcionar zonas de sombreamento e arrefecimento do ar por evapotranspiração, como também direcionar as correntes naturais de ar, melhorando as condições de conforto térmico nas edificações e reduzindo a utilização de sistema de condicionamento de ar mecânico (EDWARDS, 2008; YANG et al., 2012).

Segundo Gonçalves et al. (2015), a maior vantagem dos espaços urbanos verticalizados é o compartilhamento da infraestrutura e as proximidades dos usos. Contudo, a

proposta para edifícios altos consiste em um importante desafio, pois em estudos realizados por alguns autores essa morfologia pode resultar em espaços urbanos de baixa qualidade física e ambiental (NG et al., 2011; GONÇALVES et al., 2015).

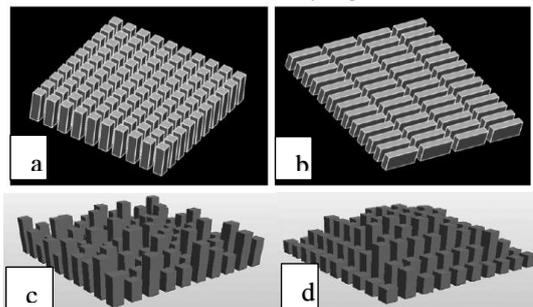
Mas nem sempre a verticalização é sinônimo de alta densidade construtiva, a exemplo de edifícios implantados em lotes onde a maior porcentagem do solo é deixada livre por razões de acessibilidade viária e direito ao sol. Apesar do grande número de pavimentos, os edifícios altos podem estar entre as formas menos densas, quanto à taxa de ocupação do solo, e podem contribuir para a melhoria do sombreamento da envoltória e do entorno (MARTINS, 2014).

Leite (2015) comprovou que para Fortaleza, cidade de clima quente e úmido, em cenários mais verticalizados de edifícios residenciais multifamiliares, a associação da maior obstrução à radiação solar sobre as fachadas e a possibilidade de ventilação natural garantiu quantidades expressivas de horas dentro da zona de conforto térmico, pois uma maior altura dos edifícios pode amenizar o rigor climático, uma vez que a rugosidade do meio urbano impõe efeitos significativos no perfil da velocidade do vento e em pontos mais altos da edificação o fluxo de ar se apresenta com maiores pressões, possibilitando maiores trocas de ar no ambiente interno. No entanto, em pavimentos mais altos, esse aumento da velocidade pode ser problemático para o aproveitamento da ventilação natural.

Lee, Jusuf e Wong (2013) realizaram o estudo da variação da altura de edifícios habitacionais verticalizados, localizados em Cingapura, e suas implicações na velocidade média do ar da área circundante.

Para os modelos simulados, consideraram-se duas formas de edifícios: bloco pontual (de dimensões 30 x 30 x 112 m) e bloco laminar (de dimensões 100 x 20 x 50 m). Em que, a partir destes, foi desenvolvida uma matriz de simulação, para posterior avaliação paramétrica, variando-se o fluxo do vento em cinco direções, a forma e o tipo de configuração do arranjo construtivo (aleatório – variação de altura de forma aleatória; e estratificado - edifícios com altura aumentando para a parte central do arranjo). Todos os modelos apresentando espaçamento entre os edifícios de 20 metros (Figura 28).

Figura 28 - a) Esquema blocos pontuais; b) blocos laminares; c) Arranjo aleatório de bloco pontual; d) Arranjo estratificado de bloco



Fonte: Lee et al., 2013.

Os autores realizaram simulações computacionais com o *software Star-CCM*, baseadas em equações diferenciais do modelo de *Reynolds-averaged Navier–Stokes* (RANS) e modelo de turbulência $k - \epsilon$ (RLZ). A variação de altura utilizada foi baseada no desvio padrão das diferentes alturas de todos os blocos de prédios altos dentro da malha estudada.

Os resultados indicaram que o fluxo de vento externo nas áreas circundantes, ao nível de pedestre e a um nível intermediário foram afetados diferentemente pela variação de altura.

Os blocos pontuais tiveram aproximadamente a mesma leitura para todas as diferentes orientações estudadas, se comparados aos blocos laminares. Para os autores, isso ocorreu porque eles teriam dimensões mais simétricas (quatro lados iguais) o que resultou em um maior número de *canyons* urbanos. O vento que estava fluindo para a área circundante foi predominantemente afetado pelas diferenças de altura dos edifícios, ao invés das orientações dos ventos. Já nos blocos laminares, a orientação exerceu uma forte interferência na velocidade do vento, devido a sua menor quantidade de *canyons*.

Na configuração da malha estratificada para os dois modelos investigados, a parte central do arranjo (mais alta) teve sua ventilação bloqueada pela camada mais à frente de blocos. Isso resultou em velocidades de vento ligeiramente inferiores, em relação à configuração aleatória, especialmente na orientação do vento a 45° .

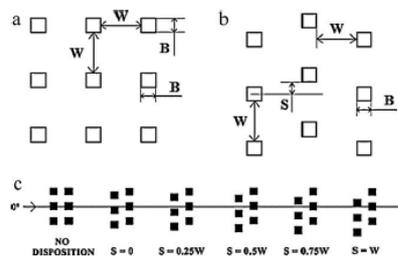
No nível intermediário, para blocos pontuais e configuração aleatória, à medida que os valores de variação de altura aumentavam, o valor de velocidade do ar também aumentou, devido a maior turbulência criada. O vento foi canalizado para baixo, beneficiando mais especificamente os níveis intermediários.

Nos blocos laminares em configuração aleatória, a maior área de parede voltada para a direção do vento gerou bloqueios mais elevados. Assim, a variação de altura desempenhou um papel importante e benéfico face à direção do vento.

No nível intermediário para blocos laminares e configuração aleatória, a velocidade do vento aumentou, com o aumento da variação de altura, a melhoria foi bastante significativa nos níveis superiores; entretanto, os benefícios não foram tão evidentes no nível do pedestre.

Cheung e Liu (2011) avaliaram em simulações em CFD, o comportamento da ventilação natural a partir das variáveis direção do vento dominante, espaçamento entre blocos e agrupamento do arranjo. Para isto, simularam 7 modelos: o primeiro, bloco isolado; o segundo, blocos em agrupamento regular (espaçamento uniforme entre os blocos, formando grelha simétrica); e os outros seis modelos, apresentando variação no espaçamento e no agrupamento, a partir do bloco localizado na parte central (Figura 29).

Figura 29 - Planos de layout (a) sem disposição e (b) com disposição, (c) mostrando diferentes níveis de disposição.



Fonte: Cheung e Liu (2011).

Os autores observaram que para o arranjo alinhado regularmente, pequenos espaçamentos foram desfavoráveis, já espaçamentos cinco vezes a largura do bloco ($5B$) melhoraram positivamente o desempenho (aceleração do fluxo de ar, forte gradiente de pressão e recirculação do vento em torno das fachadas).

Para arranjos escalonados, verificou-se uma melhora significativa da taxa de ventilação, especialmente nos modelos com menores espaçamentos (menor ou igual a três vezes a largura do bloco – $3B$ e $S = 0,75w$), principalmente com incidência de 0° a 15° de vento.

Observou-se que o desempenho das configurações escalonadas ($3B$ e $S=0,75w$) e alinhado sem escalonamento ($5B$) foram praticamente os mesmos. Ou seja, a separação ideal

entre os blocos poderia ser reduzida 40% (de 5B para 3B), desde que ocorresse um escalonamento adequado.

Concluiu-se que com a combinação adequada de afastamento e escalonamento, pode-se alcançar uma taxa de ventilação tão elevada quanto a de um edifício isolado. Portanto, a ventilação pode ser melhorada, criando interferências sob determinadas configurações de edifícios.

Lamenha, Barbosa e Bittencourt (2014) realizaram simulações computacionais com auxílio de programa *Phoenix* de CFD, com o objetivo de avaliar a distribuição e intensidade do escoamento da ventilação natural entre os arranjos. O estudo foi realizado em quatro modelos, variando o gabarito (10 e 20 pavimentos) e a forma dos edifícios (quadrada de cantos arredondados e elíptica), como pode ser verificado na Figura 30.

Figura 30 - Variáveis de simulação.

Forma da planta	Gabarito	Modelos
1 	10 pavimentos	Modelo 01
	20 pavimentos	Modelo 02
2 	10 pavimentos	Modelo 03
	20 pavimentos	Modelo 04

Autor: Lamenha et al. (2014).

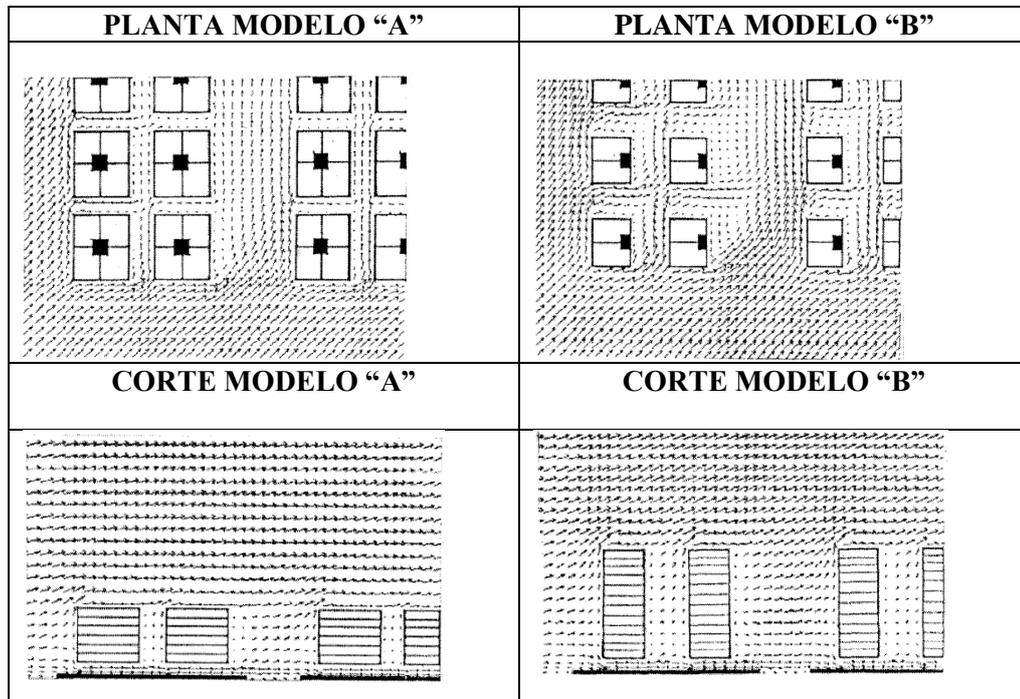
Os autores constataram que a altura das edificações e a forma exercem um importante papel na distribuição e intensidade do escoamento da ventilação.

Foram analisados os níveis do pilotis e dos pavimentos quinto, décimo e vigésimo. Observou-se que os edifícios mais delgados (Modelos 03 e 04) permitiram uma distribuição mais uniforme da ventilação natural, especialmente em alturas mais próximas ao solo, onde circulam os pedestres. Suas formas delgadas permitiram que o vento as contorne sem grandes desvios, facilitando a sua passagem para os blocos localizados a sotavento. Já os edifícios mais baixos e mais largos, com maiores taxas de ocupação e menores recuos, formaram barreiras que dificultaram a ventilação das edificações localizadas a sotavento.

Bittencourt, Cruz e Lôbo (1997) estudaram a relação da taxa de ocupação do solo e do número de pavimentos do edifício no potencial da ventilação natural. Para isso, simularam em um programa de CFD, duas alternativas de ocupação de um lote típico da orla marítima de

Maceió-AL: o Modelo “A”, com edifícios de seis pavimentos e taxa de ocupação de 50%, de acordo com as restrições urbanísticas impostas pelo código da cidade; e o Modelo “B”, com edifícios de 12 pavimentos e taxa de ocupação de 25%, aumentando assim os afastamentos entre edifícios e reduzindo o número de unidades por pavimento. Ambos os cenários foram submetidos a duas direções de ventos, 90° e 45° (Figura 31).

Figura 31 - Modelos propostos por Bittencourt; Cruz e Lôbo.

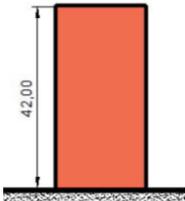
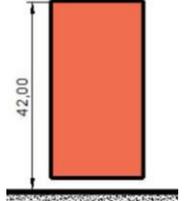
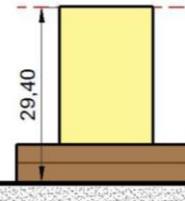
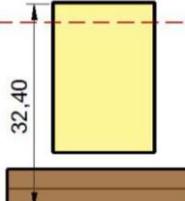


Fonte: Bittencourt; Cruz e Lôbo (1997).

Os autores observaram que no meio externo, o melhor desempenho da ventilação natural foi no modelo B, pois o aumento dos afastamentos entre os edifícios contribuiu para uma maior velocidade do escoamento do ar. Nos ambientes internos observou-se que a redução do número de apartamento por andar contribuiu para aumentar o potencial da ventilação natural. Concluíram que mais importante para garantir a ventilação no meio urbano é o predomínio de grandes recuos do que limitar a altura dos edifícios.

Marques (2003) analisou o efeito das prescrições urbanísticas e das tipologias edilícias sobre a ventilação natural, para a orla da Praia do Meio, em Natal, RN. Para a análise, adotou-se 5 modelos para a simulação em CFD: modelo 1, com a situação atual da área em estudo; modelo 2, uso residencial multifamiliar sem pilotis; modelo 3, uso residencial multifamiliar com pilotis; modelo 4, uso serviço sem pavimento vazado; e modelo 5, uso serviço com pavimento vazado (Figura 32).

Figura 32 - Modelos de simulação de Marques, 2003.

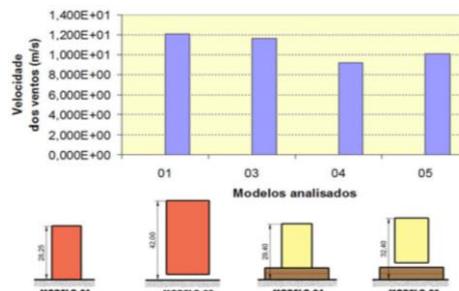
Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Edificações com pé-esquerdo de 2.80 m de altura e subsolo altura máxima de 1.25 m.	 MODELO 02 sem pilotis	 MODELO 03 com pilotis	 MODELO 04 sem pavtº vazado	 MODELO 05 com pavtº vazado

Fonte: Marques (2003).

Os resultados do modelo 2 foram descartados, devido a um erro ocorrido ao longo da simulação.

Verificou-se que, quanto ao efeito da altura sobre a velocidade dos ventos, todos apresentaram um crescimento característico do gradiente do vento na medida em que ganhavam altura. Também observou-se que a interação entre o modelo adotado e a altura foi significativa sobre a velocidade dos ventos, pois os modelos 01, 03 e 04 foram os que apresentaram os maiores valores de velocidade do vento na camada intra-urbana. Sendo os modelos 01 (ocupação do solo urbano mais porosa) e 03 (com taxa de ocupação de 50% e a presença de pilotis, enquanto que as dos modelos 04 e 05 foram de 80%) os que apresentaram os melhores resultados. Concluiu-se que a verticalização nos modelos analisados diminuiu a velocidade dos ventos na camada intra-urbana e aumentou apenas em altura acima do nível do pedestre (Figura 33).

Figura 33 - Gráfico das médias das velocidades máximas dos ventos em cada modelo.

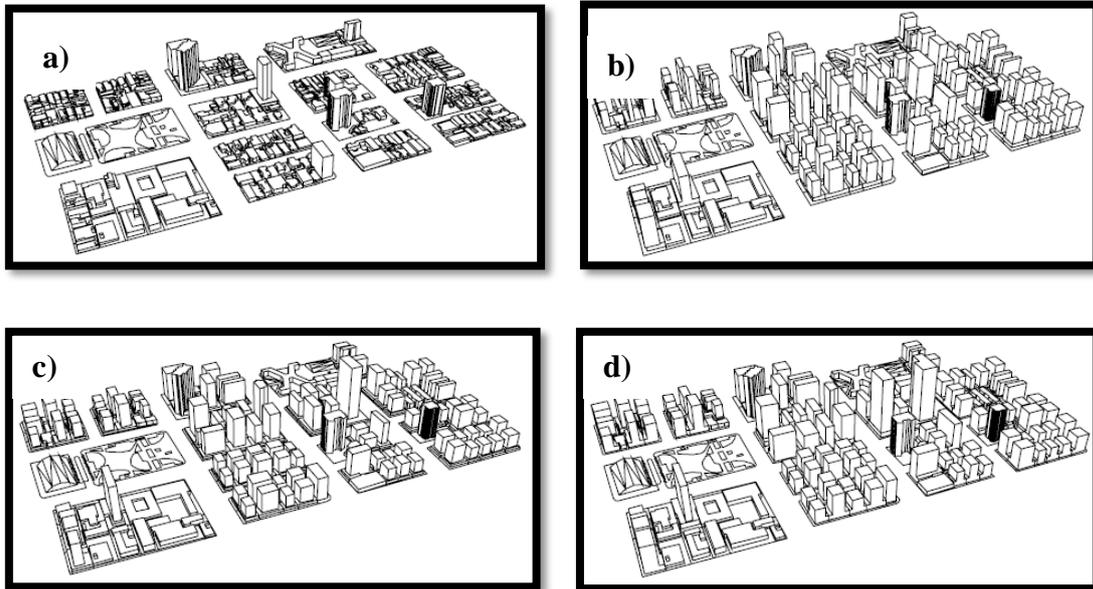


Fonte: Marques (2003).

Costa (2001) investigou a ventilação natural de acordo com as prescrições urbanísticas dos três últimos planos diretores da cidade de Natal, em um trecho do bairro de Petrópolis. O

enfoque principal da pesquisa foi analisar o impacto das reduções sucessivas de afastamentos, e conseqüente redução da porosidade do meio urbano. Foram elaborados quatro cenários para avaliação: a situação atual do trecho escolhido e os demais de acordo com a ocupação máxima permitida em cada plano diretor (Figura 34):

Figura 34 - Cenários propostos. a) situação atual; b) PD de 1984; c) PD de 1994; d) PD de 1999.



Fonte: Adaptado de Costa (2001).

O autor constatou que a redução sucessiva dos recuos e o aumento da ocupação máxima resultaram na redução da velocidade do vento na área em estudo. Sendo assim, em sua pesquisa foi sugerida a manutenção de um limite de 550hab/ha de densidade máxima; o retorno dos recuos mínimos exigidos no plano diretor de 1984; o estímulo para uma ocupação mais horizontalizada com poucos edifícios em altura.

Lima e Bittencourt (2016) analisaram a ventilação natural no meio urbano em diferentes arranjos construtivos considerando um recorte da cidade de Maceió. Para isto foi avaliada a interferência da forma dos edifícios nesses arranjos, combinados com duas alturas de gabaritos e diferentes recuos frontais e laterais entre os edifícios.

Em uma quadra típica exposta às condições climáticas locais foram simulados oito modelos com o programa Envi-Met 4.0, variando os parâmetros gabarito, recuos progressivos e forma dos edifícios (Tabela 3).

Tabela 3 - Síntese dos resultados das simulações de Lima e Bittencourt

	Compacto 1	Compacto 2	Compacto 3	Compacto 4	Linear 1	Linear 2	Linear 3	Linear 4
Dimensão do Bloco a x b (m)*	34 x 29	25 x 26,5	24 x 19	15 x 16,5	34 x 44	25 x 41,5	24 x 34	15 x 31,5
Espaçamentos Laterais (m)	11	20	21	30	11	20	21	30
Espaçamento Frontal/ Posterior (m)	26	28,5	36	38,5	26	28,5	36	38,5
Vel. do ar na esteira de vento (m/s)	0,5 – 1,0	0,5 – 1,0	0,5 – 1,5	1,0 – 2,0	Até 0,5	0,5 – 1,5	1,0 – 1,5	1,0 – 2,5
Vel. do ar nos corredores de vento (m/s)	Até 1,5	2,0 – 3,0	2,5 – 4,5	2,5 - > 4,5	< 0,5 – 2,5	1,0 – 4,0	1,5 – 4,0	2,0 – 4,0

Fonte: Lima e Bittencourt (2016).

Constatou-se que os modelos Compacto 1 e Linear 1, ambos apresentando 10 pavimentos e recuos estabelecidos pelas fórmulas do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (2007), foram os que apresentaram maior sombra e estagnação do fluxo do vento com velocidade, em alguns pontos, até nove vezes menor do que os modelos de melhor desempenho. Isto sugere que altas taxas de ocupação e pequenos recuos contribuem para a redução na ventilação das edificações localizadas a sotavento do arranjo construído. Em contrapartida, os modelos Compacto 4 e Linear 4, com gabarito de 20 andares e maiores recuos apresentaram melhor desempenho na ventilação natural.

2.4 Métodos para estimativa da ventilação natural

A literatura dispõe de inúmeras metodologias que podem ser utilizadas para a análise do movimento do ar no meio urbano. As mais utilizadas são as medições *in loco*, as simulações em maquetes físicas e as simulações computacionais. A escolha do método vai depender dos objetivos da pesquisa, do tempo disponível e do acesso às ferramentas (SOUSA, 2014).

As **medições *in loco*** são mais utilizadas para o levantamento e análise de dados de áreas já consolidadas. Além disso, é muito utilizada para a coleta de dados que servirão de entrada nos modelos de simulação. Tem como vantagem a obtenção de valores de ventilação

mais realistas, por ser coletado em um ambiente onde há a presença de todos os elementos do meio urbano. Porém as informações coletadas só servem de referência para os pontos onde houve a coleta dos dados, ou para arranjos semelhantes a eles.

As **simulações em maquetes físicas** podem ser realizadas em túnel de vento e em mesa d'água. A mesa d'água é um equipamento hidráulico que permite a visualização analógica da ventilação natural através de maquetes que representem o exterior e ou interior de edifícios, porém apenas no plano bidimensional. Este tipo de método pode ser encontrado nos trabalhos de Toledo e Ruttkay (2004); Laurentino e Toledo (2010); Nascimento et al. (2016). Já os ensaios em túnel de vento permitem uma análise mais realista dos fluxos turbulentos em diferentes níveis do gradiente de pressão. Sousa (2014) descreve que os testes podem ser feitos com a técnica de erosão de partículas (visualização de deslocamento de fina camada de areia) ou pela visualização de fluidos (escoamento de fumaça pelo modelo).

Para Straaten (1967), os experimentos realizados em túnel bidimensional de água com bolinhas de poliestireno e em túnel de vento com fumaça fornecem similiaridade nos resultados. E os efeitos de turbulência são melhores representados na mesa d'água que nos túneis de vento tradicionais. Cóstola e Alucci (2011) citam como desafio no uso de experimentos em túnel de vento os altos custos no processo e dos equipamentos e alto *know-how* envolvido.

As ferramentas de **simulação computacional** oferecem a possibilidade de previsões da performance da ventilação antes mesmo do modelo ser construído. Além disso, contribui para a investigação do escoamento do vento em diferentes escalas urbanas e em um tempo relativamente curto. Para isto, dependem de equações matemáticas que regem o fenômeno para determinar a ventilação e todos os parâmetros envolvidos no movimento do ar. Tais técnicas de cálculo se diferenciam pelo grau de complexidade e objetivo pretendido.

Autores como Chen (2009) e Sacramento (2012) dividem esses modelos de cálculo em: modelos analíticos, empíricos, modelos de rede, modelos de zonas e modelos CFDs.

Para a predição do desempenho da ventilação natural, ambos os **modelos analíticos e os empíricos** são derivados de equações fundamentais da dinâmica dos fluidos e transferência de calor, a exemplo das equações de conservação de massa, energia e momento. Possibilitam análises simplificadas da ventilação, baseadas em conceitos físicos e geralmente dispensam

recursos computacionais, por isso ainda são muito utilizados (CHEN, 2009). Nos modelos analíticos, seus resultados em regra são válidos apenas para um caso em questão, necessitando de adaptações para uma nova situação. Além disso, não dispõem de precisão para estudos mais complexos. Já os modelos empíricos utilizam dados experimentais provenientes de medições ou simulações avançadas que determinam equações que podem ser utilizadas para várias situações, diferentemente do modelo anterior (SACRAMENTO, 2012).

Como exemplo de modelo empírico, têm-se a equação da correção da velocidade do vento em função do terreno e da altura da abertura do ambiente, descrito no item 4.5.

Segundo Sacramento (2012), os **modelos de rede** também se fundamentam em equações físicas, porém é destinado a estudos mais complexos de movimento do ar, pois permite a análise simultânea de um número maior de ambientes. Na análise, a edificação é considerada como um engradado, constituída por um determinado número de nós (que são os ambientes internos – zonas simuladas e o ambiente exterior).

No cálculo matemático através dos modelos de rede, a ventilação é determinada a partir do cálculo das pressões de cada nó interno, que ocorre pelas ligações entre as aberturas dos ambientes internos e o exterior, por onde passa o fluxo de ar. As informações são integradas ao balanço térmico por zonas através de algoritmos que consideram os dados de velocidade e direção do vento presentes no arquivo climático utilizado na simulação como dados de entrada, os coeficientes de pressão, o tamanho e a perda de carga das aberturas, para que se possa calcular as perdas ou ganhos de calor com a ventilação (LEITE, 2015).

Os **modelos zonais** são recursos intermediários entre o modelo de rede e o modelo de CFD, pois geram mais informações que os modelos nodais e ao mesmo tempo são mais ágeis do que os modelos CFDs, porém não oferecem resultados tão detalhados de temperatura e escoamento do ar, quanto este. Para medir a ventilação ou temperatura, os espaços internos são divididos em pequenas células, onde a temperatura e densidades são consideradas homogêneas, e a pressão varia hidrosticamente. Em cada uma dessas células são calculados os fluxos de ar e a temperatura (CHEN, 2009; LEITE, 2015).

Os **programas CFDs** (*Computational Fluid Dynamics*) são códigos computacionais complexos capazes de simular a dinâmica da maioria dos fluxos de ar e processos de transferência de calor (MARQUES, 2003).

Para Cóstola e Alucci (2011), trata-se de uma poderosa ferramenta, mas que apresenta diversos desafios em relação à alta capacidade de processamento necessária, e à configuração das simulações (dados de entrada, parâmetros e modelos adotados).

O aperfeiçoamento dos softwares baseados na mecânica dos fluidos permitiu uma visualização tridimensional do escoamento do fluido, e conseqüentemente maior precisão nos resultados, o que contribuiu para se tornar uma importante ferramenta para investigação sobre a ventilação natural em projetos na engenharia aeroespacial, mecânica, civil, naval e nas indústrias (SACRAMENTO, 2014).

Dentre os modelos apresentados, os programas CFDs atualmente são considerados a ferramenta mais popular e utilizada nos trabalhos publicados na literatura (CHEN, 2009).

Os programas em CFD são, em sua grande maioria, baseados nas equações de *Navier – Stokes*, que são equações diferenciais de conservação de energia e massa, e modelo de turbulência $k - \varepsilon$, o que permitem captura detalhada de resultados de pressão, velocidade e temperatura em cada nó (LEE, JUSUF e WONG, 2013; SACRAMENTO, 2012; CUMPLIDO NETO; TIBIRIÇÁ; CAMPOS, 2011).

Atualmente no mercado existem vários *softwares* CFD que são, geralmente, utilizados em pesquisas de ventilação interna e externa. Dentre os mais comuns pode-se citar:

- Ansys CFX, utilizado por Prata (2005), Brandão (2009), Leite (2010), Leite (2015), Zhou et al. (2014), entre outros;
- Phoenics, utilizado por Marques (2003), Sacramento (2012), Cândido (2006), Sousa (2014) Tibúrcio (2017), entre outros;
- Envi-met, utilizado por Brandão (2009), Lima e Bittencourt (2016), Lima et al. (2016);
- Vasari, utilizado por Salim e Moya (2012);
- *Star-CCM*, utilizado por Lee et al. (2013).

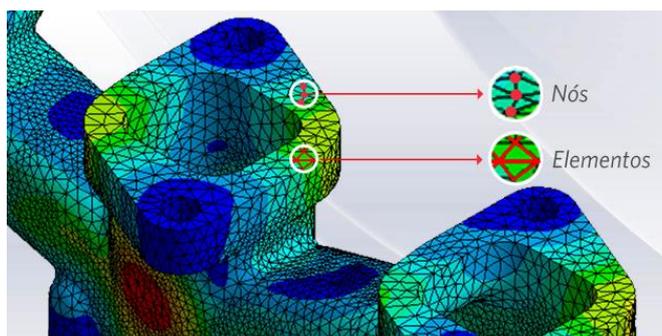
2.4.1 O Programa Phoenix 2018 v1.0, potencial e limitações

O *Phoenix* (*Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numeral Integration Code Series*) é um *software* CFD especializado em simulações computacionais de processos de fluxo de fluido, transferência de calor ou massa, reações químicas e combustão para uma ampla gama de aplicações (CHAM, 2005). Na arquitetura, é utilizado para medir o fluxo de ar no interior e exterior da edificação.

Produzido pela empresa britânica CHAM, trata-se do primeiro código computacional baseado na dinâmica dos fluidos computadorizada (CFD) a surgir no mercado (CHAM, 2017). O programa é baseado no cálculo de elementos finitos para resolver as equações diferenciais da dinâmica dos fluidos.

O cálculo dos elementos finitos se utiliza de um método de discretização, onde o domínio (espaço virtual no qual o modelo será inserido e simulado) é dividido em pequenos volumes de menor complexidade, ou seja, um conjunto de volumes de controle é utilizado para representar o domínio original. Com a divisão da geometria em pequenos elementos, é possível resolver problemas complexos, subdividindo-o em problemas mais simples, o que possibilita ao computador realizar com eficiência essas tarefas. Essas divisões podem apresentar o formato triangular, quadrilateral, entre outras, e são interligadas por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais, que formam as malhas (Figura 35). A precisão do método dependerá da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha, pois, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise (ESSS, 2018).

Figura 35 - Nós e elementos presentes em uma malha de simulação CFD.



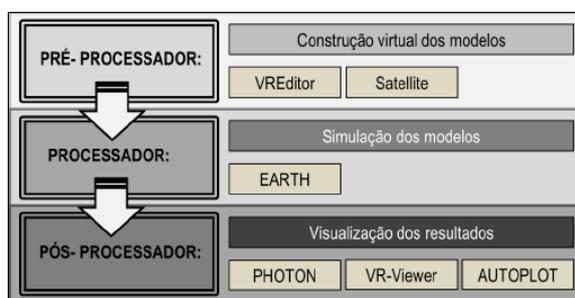
Fonte: www.esss.com.br

A análise de elementos finitos possibilita prever o comportamento de produtos afetados por muitos efeitos físicos, tais como: tensão mecânica; vibração mecânica; movimento; transferência de calor e vazão de fluidos.

Com o auxílio da ferramenta CFD é possível determinar a viabilidade de um projeto e qual a melhor solução desde a sua fase conceitual até a etapa de produção, permitindo representar diversos cenários.

O Phoenics apresenta três etapas de simulação. A primeira seria o **pré-processamento** dos dados, onde é feita a construção e configuração do modelo a ser simulado. Momento onde são inseridas as condições iniciais, como velocidade e direção do vento, como também as condições de contorno. É a definição do domínio discretizado. A segunda é a etapa de **processamento** de solução (*solver*), onde cada elemento da malha deverá montar estrutura de solução para se obter solução aproximada ou solução no tempo corrente. Ao longo da simulação, o programa exibe gráficos de monitoramento de erros e tempo de execução. A terceira etapa é a de **pós-processamento** dos resultados, onde se obtém a visualização dos deles, os quais podem ser representados por meio de vetores, linhas de corrente, distribuição de cores diferentes para cada campo de velocidade e pressão, planos de corte, isosuperfícies e gráficos (Figura 36).

Figura 36 - Módulos que compõem o Phoenics.



Fonte: SOUSA (2014).

2.5 Síntese do capítulo

A literatura mostra que o dimensionamento dos afastamentos entre edifícios está presente em vários estudos direcionados para regiões de climas quente e úmido. Associá-los a outros parâmetros como a taxa de ocupação, o uso de pilotis, a forma e escalonamento dos edifícios e pavimentos vazados pode potencializar positivamente o desempenho da ventilação no meio urbano.

Por outro lado, a altura dos edifícios é um parâmetro que gera controvérsia, pois para algumas pesquisas, associá-la a um maior recuo contribuiu para o maior escoamento da corrente de ar ao longo dos edifícios. Já para outras, houve a diminuição da velocidade dos ventos na camada intra-urbana. Destaca-se o trabalho de Lin et al. (2014), em que a variação da altura dos edifícios melhorou a troca de ar e fortaleceu o fluxo vertical através da camada superior das ruas, e por outro lado, enfraqueceu o vento perto dos edifícios mais baixos.

Constata-se, portanto, a relevância em se avaliar detalhadamente as possibilidades de dimensionamento dos recuos progressivos e seu reflexo no controle da densidade do tecido urbano e na liberação da altura do gabarito dos edifícios, a fim de manter o potencial construtivo dos terrenos e de proporcionar um aumento da porosidade do tecido urbano. Para isto, a literatura indica o uso de simulações computacionais como a ferramenta mais adequada para o estudo da avaliação da performance da ventilação natural em modelos que representam áreas urbanas ainda não consolidadas.

3. UNIVERSO DE ANÁLISE – A CIDADE DE MACEIÓ E SEU LITORAL NORTE

Maceió é a capital do estado de Alagoas e está localizada na região Nordeste do Brasil, na mesorregião Leste do Estado, à latitude 9°40' ao sul do Equador e longitude 35°42' a oeste do meridiano de Greenwich.

A geografia do terreno na qual está situada a cidade de Maceió apresenta uma altitude que varia de 5 a 10 metros acima do nível do mar na baixada litorânea, e entre 45 a 80 metros no Planalto Sedimentar dos Tabuleiros (PEDSLNM, 2000 *apud* NASCIMENTO, 2007).

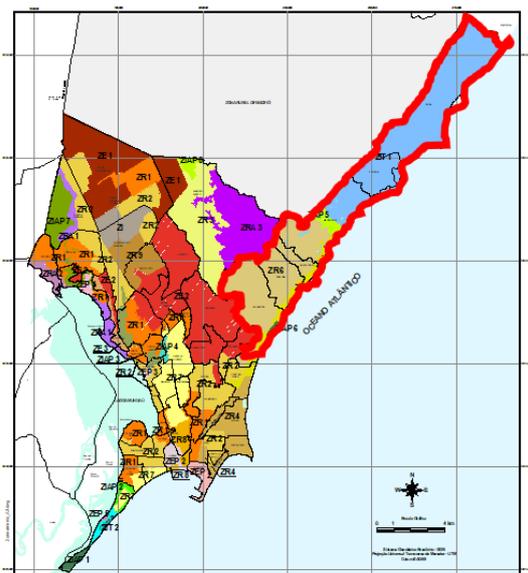
A cidade de Maceió inicialmente expandiu-se em um sítio de grande abundância de águas, um terreno pantanoso sobre o qual ocorreu aos poucos a sua instalação, na planície litorânea e fluvial, que delimitam a cidade ao leste e oeste, respectivamente. Ao longo do século XX, o crescimento da cidade cria novos eixos de expansão em direção às áreas dos tabuleiros, promovendo o espraiamento da sua área urbana. Apesar do crescimento urbano intenso, seu relevo contribuiu para uma descontinuidade territorial, uma vez que este é marcado por áreas de vales que entremeiam os tabuleiros, que apresentam trechos com matas nativas, como também a presença de inúmeros assentamentos precários às margens das linhas de drenagem e ao longo das encostas e declives variados (SOUZA et al., 2015).

Essa descontinuidade do território maceioense, gerada pela geografia acidentada nas áreas dos tabuleiros, contribuiu para o interesse em outros eixos de expansão na planície litorânea, especialmente em direção ao litoral norte.

A faixa litorânea ao norte da cidade é uma área até então marcada predominantemente por uma ocupação linear horizontalizada, por apresentar uma estreita faixa de planície destinada a moradias de comunidades tradicionais locais. Essa região passa a ser atrativa para o mercado imobiliário por apresentar um forte apelo paisagístico e extensas glebas passíveis de ocupação. Como se encontra distante do farol da marinha, o gabarito de altura dos edifícios pode ser aumentado, em relação aos limites impostos para as regiões da Pajuçara, Ponta Verde e Jatiúca.

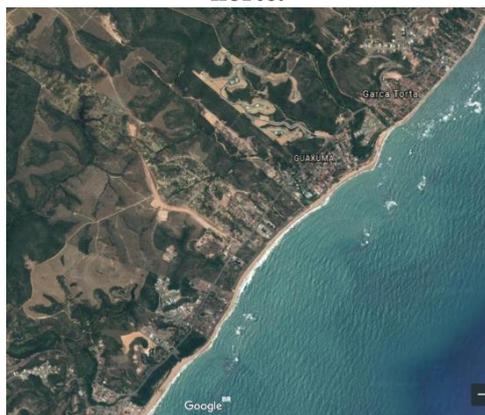
O litoral norte de Maceió é cortado pela rodovia AL 101 Norte, importante eixo de ligação da capital alagoana com municípios vizinhos. Apresenta uma faixa litorânea de cerca de 20km de largura distribuída em seis bairros: Jacarecica, Guaxuma, Garça Torta, Riacho Doce, Pescaria e Ipioca (NASCIMENTO, 2007), conforme Figuras 37 e 38.

Figura 38 - Mapa de macrozoneamento de Maceió.



Fonte: Secretaria Municipal de Planejamento e Planejamento (2007).

Figura 37 - Vista aérea do litoral norte.



Fonte: Google Earth (2017).

A região Norte de Maceió apresenta os dois tipos de relevos característicos da cidade, já mencionados anteriormente, a planície costeira com sedimentos quaternários e altitude variando de 2 a 8 metros e os tabuleiros situados sobre os sedimentos terciários da formação barreiras e altitude de aproximadamente 60 metros. Os desníveis entre eles formam em alguns trechos as encostas. Em seguida, tem-se a Planície Flúvio Marinha (depósitos sedimentares de praia e flúvios marinhos), com altitudes de até 4 metros, também conhecida como planície costeira, contornada por coqueirais em suas praias de areias claras e manguezais, situados nas desembocaduras dos rios e riachos que fazem parte do Litoral Norte de Maceió (SANTOS, 2004).

As características peculiares e a fragilidade da geografia deste território levou, no ano 2000, à elaboração do Plano Estratégico para o desenvolvimento Sustentável do Litoral Norte de Maceió, um trabalho que teve a coordenação da Secretaria Municipal de Planejamento de Maceió em conjunto com outros órgãos da administração municipal, estadual e federal. O objetivo do plano era disciplinar o uso e ocupação do solo na faixa litorânea da região norte, ameaçada por ocupações irregulares e clandestinas e pela degradação do seu patrimônio natural, através do estabelecimento de diretrizes e normas urbanísticas, assim como a implementação de programas e projetos que contribuíssem para o desenvolvimento de potencialidades locais. O plano foi apoiado em um diagnóstico da área, a partir do qual foram

estabelecidas diretrizes ambientais, paisagísticas, socioeconômicas, de uso e ocupação do solo, infraestrutura e institucionais.

Esse Plano Estratégico previa a subdivisão da região norte em setores: Setor de proteção ambiental; Setor de Adensamento Restrito; Setor de Adensamento Preferencial; Setor de Interesse Turístico e Setor de Interesse de Habitação Social. Contudo, a sua implantação não se efetivou, nem tão pouco foi incorporado aos instrumentos urbanísticos da cidade (NASCIMENTO, 2007). Atualmente, os instrumentos que determinam os parâmetros urbanísticos e diretrizes para a ocupação e crescimento de toda a Maceió são o Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações.

3.1 O Perfil climático e estratégias bioclimáticas para edificações na cidade de Maceió-AL

Maceió é caracterizada pelos climas quente e úmido. A sua baixa latitude lhe predispõe à radiação solar intensa ao longo do ano e a proximidade de grandes massas de água, o Oceano Atlântico e o complexo lagunar Mundaú-Manguaba lhe conferem alta taxa de umidade relativa do ar, com média de 78,3% (BRASIL, 2018).

A cidade apresenta temperatura média anual de 25,1°C, com pequena variação anual de 3,0°C e média pluviométrica anual de 1867,4 mm, onde 60% desta precipitação ocorre entre os meses de abril e julho. Além disso, apresenta céu típico parcialmente nublado, o que produz grande quantidade de radiação difusa e intensa luminosidade (Tabela 4).

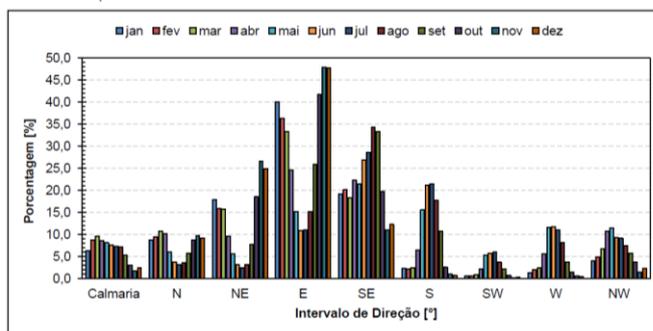
Tabela 4: Comportamento médio dos principais parâmetros meteorológicos de Maceió - Normais Climatológicas (1981-2010).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temp. Média (°C)	26	26,2	26,5	26	25,1	24,1	23,5	23,5	24,1	25,1	25,6	26	25,1
Temp. Máx. (°C)	31,0	31,4	31,5	30,6	29,5	28,3	27,6	27,6	28,4	29,9	30,8	31,2	29,8
Temp. Mín. (°C)	24,0	24,1	23,9	23,7	22,9	22,3	21,7	21,6	22,5	23,1	23,8	24	23,1
Precip. (mm)	83,0	72,9	117,4	207,5	296,9	353,8	265,2	201,5	120,2	61,6	46,9	40,5	1867,4
Umidade Relativa (%)	75,9	74,2	74,9	77,8	81,1	82,6	82,8	81,9	78,7	76,1	74,1	73,9	77,8
Insoleção total (horas)	241,4	218,6	209,6	202,5	198,5	162,8	169,2	180,6	190,2	220,4	247,9	257,5	2499,2
Média intensidade ventos (m/s)	3,5	3,3	3,1	2,6	2,4	2,4	2,4	2,7	3,1	3,6	3,8	3,7	3,1

Fonte: Adaptado de BRASIL (2018).

A localização da cidade de Maceió possui influência dos ventos alísios provenientes do mar. Segundo Maia (2016), existe uma sazonalidade na variação anual do vento, apresentando velocidades médias máximas no período seco (de outubro a janeiro) e mínimas no período chuvoso (de abril a julho). No período chuvoso, durante a tarde e a noite, predominam em 40% os ventos de sudeste e em 20% os ventos de leste. Já no período seco, a predominância é do vento leste (até 70%) e em seguida do vento sudeste (25%), conforme Figura 39.

Figura 39 - Distribuição de frequência mensal de direção do vento da cidade de Maceió – período de 2003- 2012.



Fonte: Maia (2016).

O conhecimento das características dos ventos que ocorrem num local, como direção predominante, velocidades médias e possíveis fenômenos eólicos cíclicos, são informações importantes para os estudos voltados ao planejamento urbano, como forma de auxiliar na construção e localização de edificações e no posicionamento das quadras na cidade, a fim de torná-las mais adequadas ao clima e conforto térmico dos habitantes (CRUZ e BARBOSA, 2015. p.2).

Sendo assim, as condições de vento da cidade de Maceió evidenciam a ventilação natural como um potencial a ser explorado na busca por melhores desempenhos térmicos nas edificações. Mas antes da aplicação da ventilação natural como estratégia bioclimática, inicialmente devem ser avaliados a sua frequência, intensidade e período de calmaria. Regiões com vento estável ao longo do ano e intensidade superior a 3 m/s proporcionam a eficiência da ventilação natural como estratégia de refrigeração mais simples e econômica (BITTENCOURT E CÂNDIDO, 2005).

Desta forma, em regiões de clima quente e úmido, como é o caso da cidade de Maceió, potencializar o uso da ventilação natural associada à proteção solar consiste numa estratégia bioclimática para projetos energeticamente eficientes e que possibilitam alcançar o conforto térmico dos usuários por meios passivos.

Para o estudo da ventilação natural em edificações, o mais indicado é utilizar as longas séries de registro de vento para estimar o seu comportamento (AYNSLEY, 1999). Desta forma, para a presente tese, de acordo com a base de dados das normais climatológicas (do

período de 1981 – 2010), foi utilizada a velocidade média do vento de 3,1 m/s, como pode ser verificado na tabela 4 (BRASIL, 2018).

3.2 O Código de Urbanismo e Edificações e o Plano Diretor de Maceió e o conforto ambiental

A Constituição Federal de 1988, no seu artigo nº 182, determina que a política de desenvolvimento urbano executada pela legislação municipal deve ter como objetivo principal garantir o pleno ordenamento do desenvolvimento das funções sociais da cidade e o bem-estar de seus habitantes.

Maceió possui dois instrumentos normativos vigentes que regem o uso e ocupação do solo: o Plano Diretor de Maceió, Lei nº 5.486, de 30 de dezembro de 2005; e o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió, Lei Municipal Nº 5.593, de 08 de fevereiro de 2007. O primeiro instrumento tem como princípios básicos: orientar o crescimento físico da cidade; definir os vetores de crescimento urbano; estabelecer o macrozoneamento urbano; e estabelecer as prioridades estruturais no processo de crescimento urbano, para a melhoria da qualidade de vida na cidade.

A lei que trata do Código de Edificações e Urbanismo de Maceió tem como pressuposto atender as disposições contidas no Plano Diretor do Município e a legislação federal, estadual e municipal aplicáveis. No que tange à morfologia dos arranjos construtivos, tem como diretrizes principais:

D) Promover a compatibilização do uso, da ocupação e do parcelamento do solo - possibilitando a flexibilização dos parâmetros para parcelamento e ocupação do solo em habitação de interesse social; potencializar a avaliação da ventilação urbana, através da regulamentação dos afastamentos entre edifícios, e segundo o instrumento, da definição de área mínima de vãos e aberturas dos edifícios.

Porém, na prática, o que se verifica é que o dimensionamento e a localização dos vãos de abertura para a ventilação e iluminação dos edifícios ficam a cargo do profissional responsável pelo projeto da edificação. Inexiste qualquer diretriz que o oriente quanto à melhor configuração e localização destas aberturas. Segundo Tibúrcio (2017), a combinação entre o dimensionamento, disposição de áreas de abertura de entrada e de saída do vento e

porosidade das portas internas, pode influenciar positivamente o escoamento da ventilação nos ambientes internos.

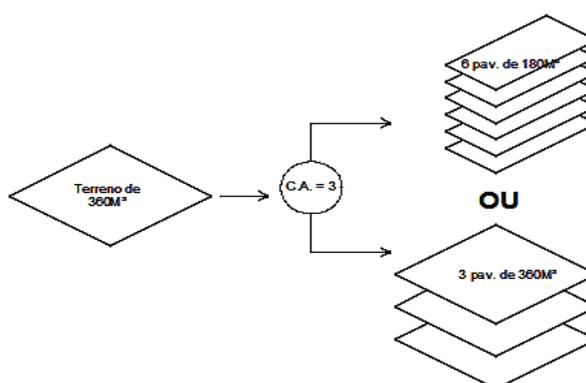
II) Promover o controle da verticalização das edificações - de forma a não interferir negativamente na paisagem; a impedir o sombreamento nas praias e no entorno das lagoas; e promover o equilíbrio da densidade populacional com a oferta de áreas públicas e serviços de infraestrutura urbana.

Segundo Cruz (2001), a preocupação quanto ao sombreamento da área litorânea esteve presente desde a elaboração da primeira versão do plano diretor da cidade em 1982, de maneira a se preservar o direito ao sol. Para se resguardar tal condição, são utilizadas as fórmulas que definem os recuos mínimos obrigatórios. No entanto, de acordo com o autor, o estabelecimento de tais recuos não é garantia de boa condição de insolação, uma vez que a orientação do terreno não é levada em conta nessas fórmulas.

O Código de Urbanismo e Edificações considera como parâmetros urbanísticos para ocupação do solo nas zonas urbanas: o coeficiente de aproveitamento do terreno; a taxa de ocupação do terreno; os recuos mínimos obrigatórios; a altura máxima da edificação e a taxa de permeabilidade do solo.

Considera-se **Coefficiente de aproveitamento (CA)** a relação entre a área máxima de construção no terreno e sua área (Figura 40). “É um número que, multiplicado pela área do terreno, indica a quantidade máxima de metros quadrados que podem ser construídos, somadas às áreas de todos os pavimentos” (SABOYA, 2007 p.1).

Figura 40 - Exemplo de cálculo de coeficiente de aproveitamento (CA).

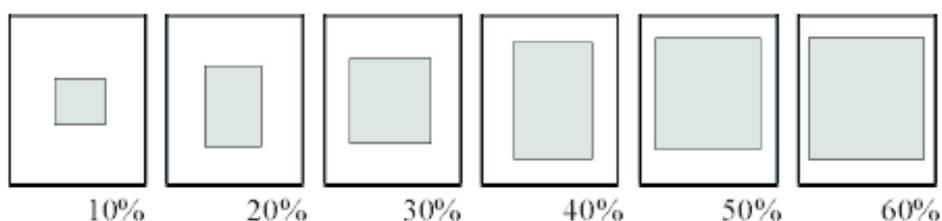


Fonte: Autora (2017), adaptado de Saboya (2007).

No cálculo do CA desconsidera-se o subsolo, caso o uso seja restrito a estacionamento e outras instalações de serviço de uso comum; o pilotis e cobertura, desde que utilizado para uso comum da edificação; e elementos de fachada.

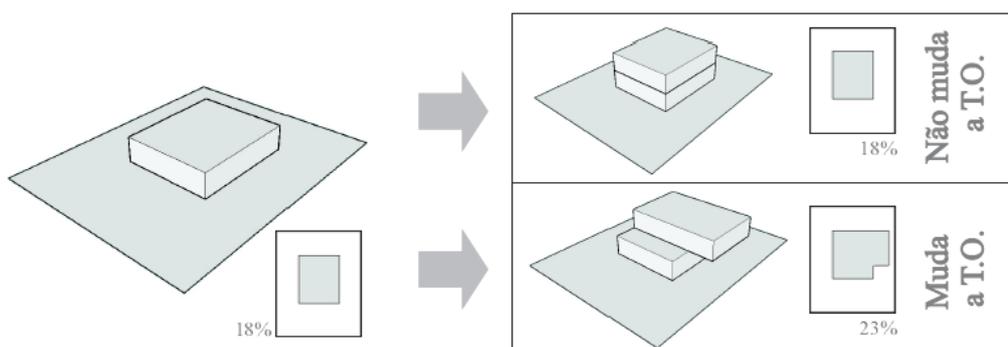
A **taxa de ocupação (TO)** consiste na relação entre a área da projeção horizontal do edifício e a área do lote (Figura 41). Ou seja, o número de pavimentos não necessariamente interfere no cálculo (Figura 42).

Figura 41 - Taxa de ocupação do terreno a partir da projeção horizontal da edificação.



Fonte: Saboya (2007).

Figura 42 - Influência dos pavimentos na taxa de ocupação do terreno.



Fonte: Saboya (2007).

Os pilotis são desconsiderados ainda para o cálculo da TO, desde que utilizado para uso comum da edificação, e sua área de construção não ultrapasse a 40% da área de projeção da lâmina do prédio. Desconsidera-se também: beirais, elementos de fachada, pergolados, piscinas, pavimento garagem e subsolos com instalações de serviço de uso comum.

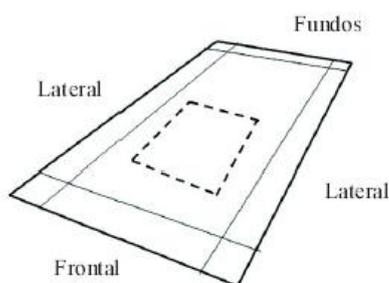
Vale salientar que o pilotis é um elemento construtivo utilizado correntemente nas edificações de tipologia vertical. Para Bittencourt (1993), quando utilizado corretamente, trata-se de um importante componente no auxílio da distribuição do fluxo do ar por entre a malha urbana. Pois pode auxiliar na redução das esteiras de vento que se formam a sotavento

dos edifícios, facilitando assim a permeabilidade do vento e conseqüentemente melhorando as condições de conforto térmico e qualidade do ar, ao reduzir a dispersão dos poluentes contidos no ar das cidades.

Não existe uma diferenciação para a taxa de ocupação do lote para residência unifamiliares como para edifícios de vários pavimentos. Entretanto, devido aos recuos progressivos, quanto maior o número de andares, menor será a taxa de ocupação em um mesmo terreno. Para o código de Maceió, a relação entre a taxa de ocupação e o CA é estabelecida de forma a condicionar o número de pavimentos a um percentual de ocupação da área do lote (MARTINS, 2014).

O artigo nº 271 do código define **recuos** como sendo as distâncias da edificação aos alinhamentos existentes ou projetados e as demais divisas do lote ou terreno. Esses afastamentos são determinados por recuos mínimos obrigatórios (frente, fundo e laterais) (Figura 43).

Figura 43 - Identificação dos recuos do terreno.



Fonte: Saboya (2007).

Esses recuos mínimos são progressivos (crescentes) e variam em função do número de pavimentos da edificação, sendo que para a zona residencial 5 (ZR-5), na qual o litoral norte da cidade de Maceió está inserido, são calculados a partir das fórmulas apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Fórmulas para cálculo dos recuos mínimos obrigatórios, em metros.

FÓRMULAS PARA OS RECUOS PROGRESSIVOS (m)	FRONTAL (m)	LATERAIS E DE FUNDOS (m)
	$5 + \frac{n - 2}{2}$	$1,5 + \frac{n - 2}{2}$

n: número de pavimentos.

Fonte: Adaptado de Maceió, 2007.

Como já mencionado, Cruz (2001) afirma que o estabelecimento dos recuos progressivos apresenta como falha a desconsideração da orientação do terreno. Isto pode vir a não garantir uma boa condição de conforto quanto à insolação e à ventilação no meio.

Além disso, o código municipal dispõe de um instrumento chamado avanço compensatório, que permite o avanço da construção sobre o recuo calculado pela fórmula, desde que esse avanço seja compensado com a ampliação do recuo do lado oposto. Esse avanço pode ser realizado em até 50% de um plano de fachada, podendo avançar com a edificação até 30% do recuo encontrado. Cruz (2001) critica tal instrumento uma vez que esse recurso pode resultar em edifícios vizinhos separados apenas por 3,00m de recuo entre suas fachadas laterais, o que dificultaria bastante a iluminação natural, principalmente dos apartamentos localizados nos andares mais baixos. Além disso, influenciaria no fluxo de ar através desses edifícios (Figura 44).

Figura 44 - Esquema da influência do avanço compensatório na insolação nas unidades habitacionais.



Fonte: CRUZ (2001).

Com base nas diretrizes descritas anteriormente, na planície litorânea, por se tratar de uma área de grande interesse imobiliário, a restrição mais evidente é quanto à limitação do número de pavimentos a serem construídos nas edificações. O código traz como mecanismo para esse controle a relação entre Taxa de Ocupação e o Coeficiente de Aproveitamento,

determinado de forma a condicionar a maior altura do edifício à menor área de ocupação do terreno.

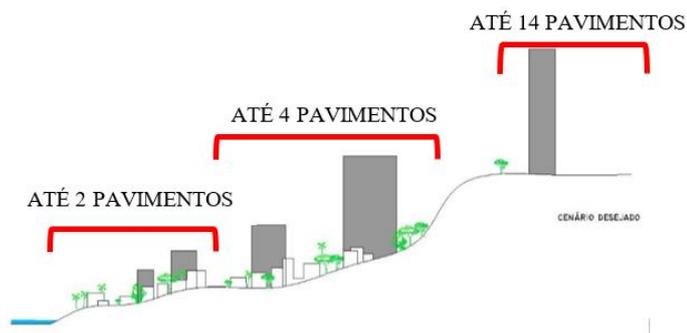
Os bairros da Ponta Verde e Jatiúca, situados na faixa litorânea de Maceió, podem ser citados como exemplos desse controle urbanístico. Ambos apresentam uma TO máxima de 50%, com coeficiente de aproveitamento de até 4 vezes a área do lote. Ou seja, para se ocupar a máxima área permitida de um lote é necessário que a edificação seja de até 8 pavimentos. (CRUZ e BITTENCOURT, 1997).

A lei do Plano Diretor de Maceió no ano de 2015 completou 10 anos de vigência e, segundo o estabelecido, deveria passar por processo de revisão. Com o objetivo de atualizar e aperfeiçoar o instrumento de acordo com a realidade atual da cidade, a partir do ano de 2015, algumas reuniões, audiências públicas e oficinas técnicas foram realizadas. Discutiu-se a macroestratégia e o macrozoneamento da cidade, de maneira a estabelecer critérios para o adensamento, a reabilitação e a preservação ambiental, de acordo com as especificidades de cada área, para garantir a melhor distribuição das densidades construtivas e populacionais, observando os condicionantes geomorfológicos, ambientais, sociais, históricos, econômicos e culturais.

Para o litoral norte de Maceió, por se tratar de uma área de grande interesse imobiliário e pela fragilidade ambiental e paisagística, como já mencionado, as oficinas técnicas e audiências públicas defenderam a necessidade de garantir o escalonamento das edificações, aumentando gradualmente o número de pavimentos à medida que também aumentasse o afastamento da costa litorânea.

Sugerem escalonar os edifícios a partir de 50 metros do mar, em direção a AL 101 norte. Nesta faixa seria permitida a construção de edificações de até 2 pavimentos. Da AL 101 norte até a encosta seriam permitidos prédios de até 4 pavimentos. E na faixa até 20 metros, além da borda do tabuleiro, seriam permitidos até 14 pavimentos (Figura 45).

Figura 45 - Proposta de escalonamento dos edifícios para o litoral norte de Maceió.



Fonte: Adaptado do Movimento Abrace a Garça (2016).

Até o presente ainda não foi publicado o documento final da revisão do plano diretor de Maceió, enquanto isso, o que se observa é a construção de edifícios de até 20 pavimentos no litoral norte de Maceió (Figura 46).

Figura 46 - Verticalização do bairro Guaxuma.



Fonte: Autora (2019).

Esses empreendimentos são visíveis até mesmo na faixa a partir de 50 metros do mar, como pode ser observado na Figura 47, que retrata a campanha publicitária de um empreendimento construído no bairro de Guaxuma. Nela é dada ênfase no morar com os pés na areia, ratificando a proximidade dos edifícios com o mar.

Figura 47 - Campanha publicitária que exemplifica os empreendimentos que estão sendo construídos a partir da faixa de 50m da praia de Guaxuma.

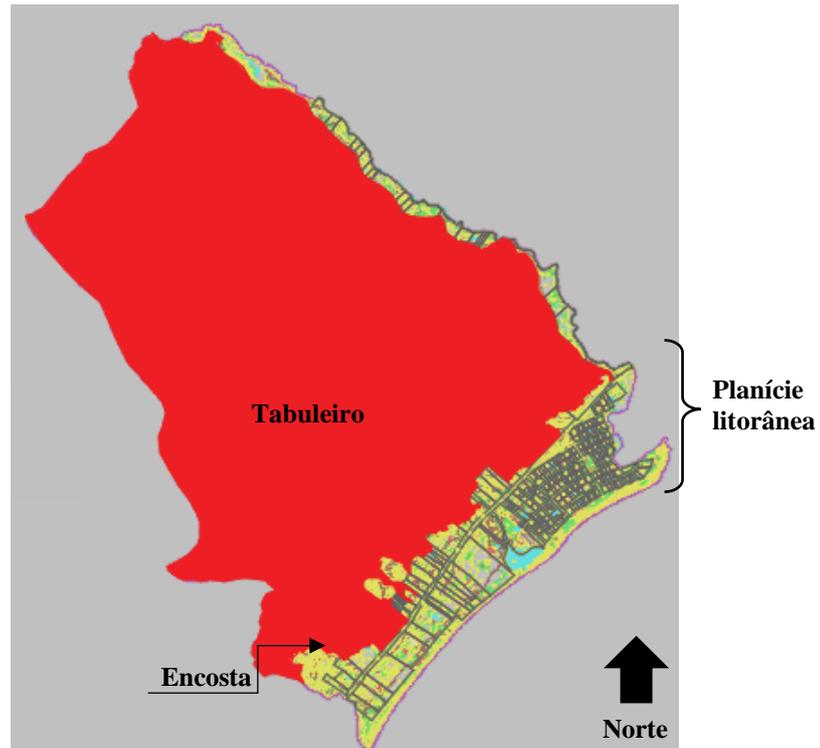


Fonte: Adaptado de v2construcoes.com.br/gran-marine/.

3.3 Delimitação do recorte espacial

Para a investigação das relações propostas no presente estudo, foi definido um recorte espacial. Desta forma, partiu-se da premissa de se estudar a representação da área de expansão da cidade de Maceió. Essa região apresenta uma topografia com formação de barreiras com alturas e distâncias variáveis em relação à planície litorânea, podendo alcançar até 60m de altitude, como também áreas de planícies. Tais características são verificadas no litoral norte da cidade de Maceió, e optou-se por um trecho do bairro de Guaxuma, devido a sua condição topográfica e a sua orientação geográfica, que possibilitam que o arranjo construtivo fique voltado para o quadrante leste, para maior exposição à ventilação de incidência dominante (Figura 48).

Figura 48 - Mapa bairro de Guaxuma.



Fonte: Adaptado de Secretaria Municipal de Planejamento e Planejamento (2007).

A análise do mapa do bairro de Guaxuma permite identificar que a região apresenta áreas já loteadas, como também sítios ocupando grandes terrenos. O bairro apresenta-se com ocupação predominante de casas térreas e de até dois pavimentos, como pode ser observado na Figura 49.

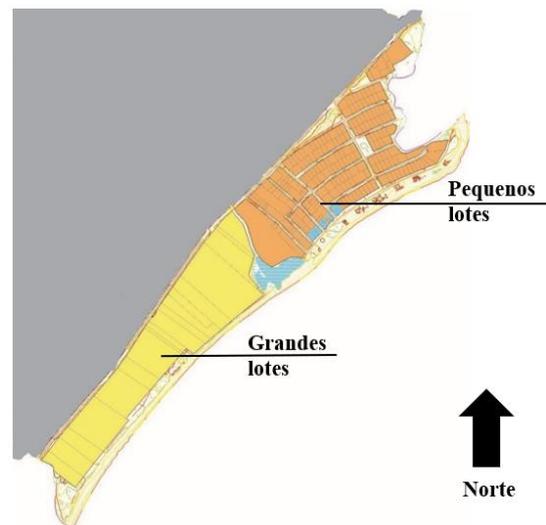
Figura 49 - Ocupação horizontal do Bairro de Guaxuma.



Fonte: Autora (2019).

A formulação de um modelo hipotético para um cenário urbano foi desenvolvida a partir da referência das dimensões mais recorrentes de terreno daquela região de Guaxuma. Sendo assim, escolheu-se as dimensões de lotes de 15x30 e 30x30 metros e um terreno que representasse os sítios de 60x80 metros (Figura 50), conforme será melhor detalhado no item que segue.

Figura 50 - Trecho da Planície litorânea do bairro Guaxuma.



Fonte: Adaptado de Secretaria Municipal de Planejamento e Planejamento (2007).

3.4 Definição dos cenários urbanos

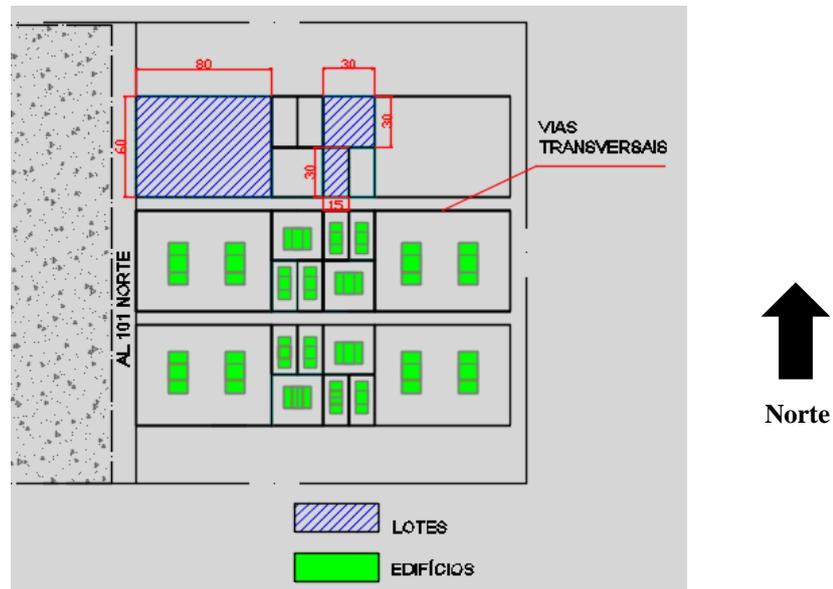
Como exposto anteriormente, para o presente estudo foi estabelecido um recorte espacial que represente um trecho da área de expansão da cidade de Maceió. Esse recorte engloba quadras situadas no bairro de Guaxuma, em Maceió-AL.

A partir do estudo dos mapas de zoneamento da cidade e dos bairros de Maceió, foi possível identificar as dimensões de lotes mais recorrentes para a região de Guaxuma. Percebe-se que aquela área apresenta trechos com lotes regulares (com dimensões: 15x30 m; 15x35 m; 17x30 m; 30x30 m), terrenos compridos mas com pequenas testadas, terrenos de formato trapezoidal e terrenos de grandes dimensões reservados aos sítios da região, como pode ser observado na Figura 50.

Com o objetivo de simplificar o estudo e a modelagem dos cenários, optou-se por selecionar três terrenos de dimensões mais recorrentes (15x30 m; 30x30m e 60x80 m), os

quais determinarão os modelos hipotéticos que serão examinados. A consideração destas três dimensões de lotes permitirá uma maior variação da massa edificada e da altura delas, de modo a contribuir para o aumento do padrão de rugosidade dos arranjos urbanos idealizados, o que possivelmente, com o adensamento da área, corresponderá à paisagem futura para a região (Figura 51).

Figura 51 - Esquema do cenário urbano em planta baixa - modelo hipotético.



Fonte: Autora (2018).

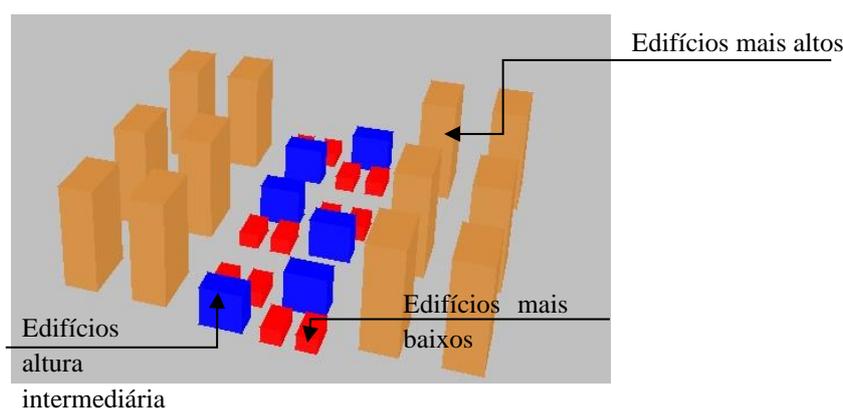
Como critério para a distribuição destes lotes no arranjo, optou-se pela situação mais crítica, ou seja, os maiores terrenos situados nas extremidades. De forma que os edifícios mais altos fiquem nas bordas do arranjo, enquanto que os edifícios de menores alturas fiquem situados na parte central (Figuras 51 e 52).

O litoral Norte da cidade de Maceió, região na qual o bairro de Guaxuma está inserido, e que de acordo com o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió está situada na Zona Residencial ZR-5, é caracterizado topograficamente por apresentar dois tipos de relevos, como já mencionado neste capítulo; a planície costeira, com altitude variando de 2 a 8 metros, e os tabuleiros, com altitude máxima de até 60 metros, além de uma região de encosta entre esses dois planos, considerada um talude natural com ligeira inclinação no sentido do oceano de aproximadamente 19% na sua maior inclinação, segundo base cartográfica da cidade de Maceió. A região é cortada pela AL 101 Norte, fazendo assim a divisão entre a área de planície e o sopé das encostas (Figura 51).

Para a presente pesquisa será considerado como recorte espacial um trecho do bairro de Guaxuma no qual será simulado o cenário da área de planície litorânea com a presença do arranjo construtivo, uma vez que naquela região existe uma variabilidade considerável quanto a altitude, sua inclinação e distância em relação à área de planície costeira.

Foi delimitado um recorte de aproximadamente 165 mil metros quadrados de área com uma área de planície com 236 x 195 m. O trecho de planície servirá de base para a implantação dos edifícios que irão compor os cenários (Figura 52).

Figura 52 - Esquema geral do cenário urbano - vista em perspectiva.



Fonte: Autora (2018).

3.5 Síntese do capítulo

O perfil climático da cidade de Maceió caracteriza a região por apresentar alta taxa de umidade relativa do ar (a cima de 70%) e elevado nível de radiação solar, apresentando com isso pequena variação anual da temperatura media (2,8°C) e alta média pluviométrica.

Além disso, estudos identificam que a região apresenta uma velocidade média anual de vento de 3,1 m/s, com frequência e velocidade praticamente constantes. A predominância da ventilação natural vinda do quadrante leste também contribui para o aproveitamento do vento no ambiente construído, desde que o arranjo construtivo permita a sua circulação, sem oferecer grandes obstáculos. Tais características identificam a ventilação natural como a principal estratégia bioclimática para a obtenção do conforto térmico e economia de energia.

Os instrumentos normativos que regem o uso e a ocupação do solo da cidade de Maceió identificam a necessidade de potencializar o uso da ventilação natural e oferecem alguns parâmetros urbanísticos que podem afetar este fim. Destaca-se a regulamentação dos

afastamentos entre edifícios, através dos recuos progressivos que variam em função do número de pavimentos. No entanto, a literatura destaca a importância de associar tal instrumento a outros parâmetros, como as alturas dos edifícios e a orientação da malha em relação ao vento dominante, a fim de se garantir o conforto térmico ao meio.

Finalmente, neste capítulo foi delimitado o recorte espacial para estudo, em que foram selecionados três dimensões de lotes mais recorrentes na região, que serviram de referência para a elaboração dos cenários urbanos. Esses cenários foram simulados a partir da variação de alguns parâmetros, que serão melhor explicados no próximo capítulo.

Embora diversos estudos, como os já mencionados, confirmem a alteração do fluxo do ar em áreas que apresentam uma topografia em aclave, é preciso que se destaque que o recorte espacial estudado apresenta trechos com área de encosta que podem chegar até uma altura máxima de 60 metros, em relação ao nível da planície litorânea, e que estão situadas à sotavento dessa área de planície e a uma distância variada. Diferentemente da realidade das regiões estudadas por Yang e Li (2009) e de Luo e Li (2011), que foram cidades de regiões montanhosas (com encostas em torno de 500 metros de altura) e que apresentam ventilação de baixa intensidade, a exemplo de Tóquio, no Japão; Los Angeles e Phoenix, nos EUA, e Hong Kong, na China.

Os aspectos abordados neste capítulo levam-se a refletir sobre a aplicação dos parâmetros urbanísticos citados para a Zona ZR-5 na área de expansão da cidade de Maceió, e como tais instrumentos podem influenciar no desempenho da ventilação natural para a realidade espacial apresentada, o que será objeto de investigação desta tese.

4. MATERIAIS E MÉTODO

Nesta seção são apresentados o método utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, bem como as ferramentas empregadas para o alcance dos objetivos investigados.

O método proposto fundamentou-se na análise paramétrica de modelos com diferentes configurações morfológicas. Como principal ferramenta metodológica, utilizou-se para essas análises os resultados obtidos nas simulações com o programa CFD (*Computer Fluid Dynamics*) *Phoenix* 2018 versão 1.0.

Nesta seção também são definidos e apresentados os parâmetros examinados, a definição dos cenários modelos, os passos necessários para o desenvolvimento das simulações computacionais, bem como a organização dos resultados obtidos nesta pesquisa. A última subseção dedica-se à descrição dos edifícios que compõem a malha, para um melhor entendimento dos resultados.

4.1 Definição dos parâmetros a serem investigados e matriz de simulação

O parâmetro inicialmente investigado foi o efeito da topografia, com o intuito de proporcionar melhor compreensão a respeito do comportamento do vento frente à presença de encostas localizadas a sotavento de arranjos construtivos, característica topográfica encontrada em grande parte da região em estudo. Diante da impossibilidade em se considerar todas as variabilidades existentes na área quanto à altura, inclinação e distância da mesma em relação à planície litorânea, devido à limitação de tempo e de processamento das simulações, para o presente trabalho considerou-se as situações mais extremas: altura a 60m em relação ao nível do mar, com uma ligeira inclinação no sentido do oceano de aproximadamente 19° e a uma distância de aproximadamente 35m do arranjo construtivo.

Uma vez que se optou por utilizar apenas a encosta com as características já citadas, os resultados das simulações apresentaram-se com oscilações que não se permitiu estabelecer uma lógica entre as condições com e sem encosta, ocorrendo em alguns casos a diminuição e em outros o aumento da velocidade do vento nos oito pontos de análises. Além disso, existiram modelos que não foram possíveis de alcançar a convergência. Por tais razões, essa variável foi descartada para as demais análises. Os resultados serão melhor explicados na seção 5 desta tese.

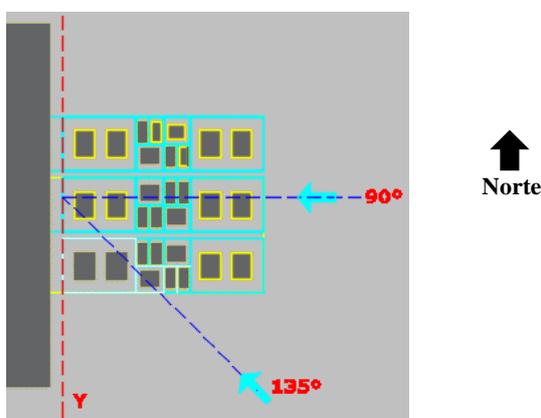
Dessa forma, uma vez que essa topografia unicamente considerada não representa todas as configurações existentes na área, achou-se melhor desconsiderá-la e optar por estudar apenas a condição plana das simulações.

4.1.1 A incidência do vento

Foram considerados dois ângulos de incidência: 90° e 135° do azimute (referentes à ventilação leste e sudeste, respectivamente), tendo como referência o eixo Y no domínio do programa, conforme Figura 53.

A escolha dos ângulos de incidência citados objetiva analisar o comportamento da ventilação urbana sobre os arranjos construtivos modelados frente à ventilação que vem do quadrante leste, por serem as direções de maior ocorrência ao longo do ano.

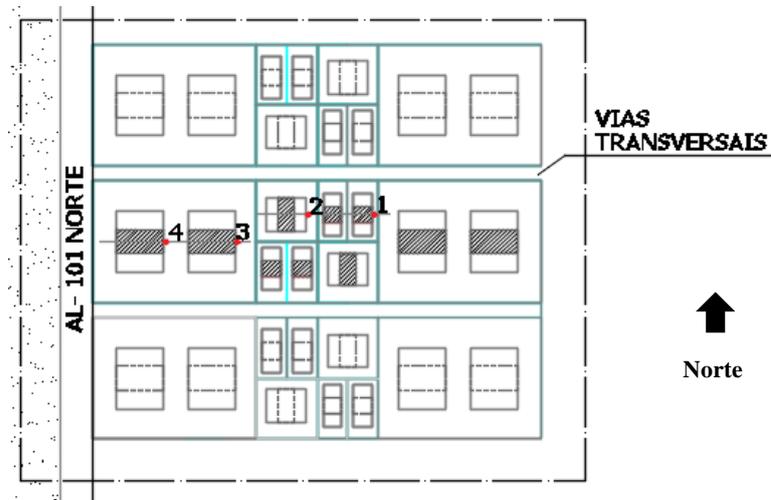
Figura 53 - Incidências do vento consideradas nas simulações.



Fonte: Autora (2018).

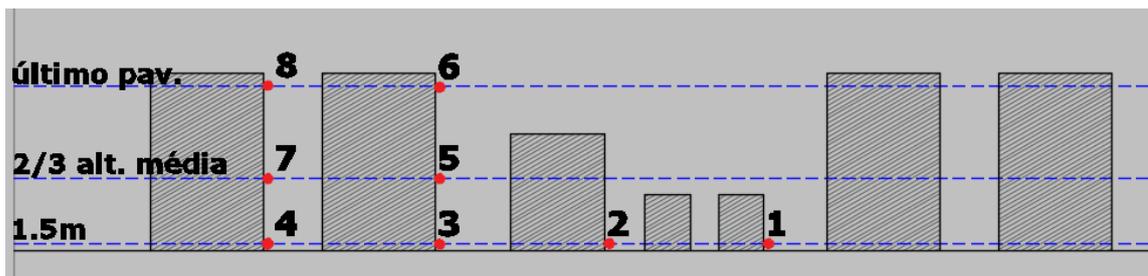
Para comparar o comportamento da ventilação em localizações e alturas distintas dentro dos arranjos modelados das simulações, foram analisados os resultados em quatro pontos em planta (Figura 54), situados nos eixos dos edifícios e em três alturas distintas: Altura do observador (1,50 m); a $2/3$ da altura média dos edifícios - que segundo Lopes (2003), corresponde ao nível onde o fluxo médio de quantidade de movimento é absorvido; e a altura do centro da janela do último pavimento, de modo a analisar o comportamento do vento afastado da rugosidade construtiva (Figura 55).

Figura 54 - Localização dos quatro pontos de referência para extração dos resultados - Planta Baixa.



Fonte: Autora (2019).

Figura 55 - Alturas dos pontos de referência - Vista Vertical.



Fonte: Autora (2019).

4.1.2 Recuo progressivo

Os recuos dos edifícios foram os principais elementos investigados, pois foi a partir deste parâmetro urbanístico que se estabeleceu as alturas dos edifícios que compõem o arranjo do recorte espacial em estudo, considerando a limitação de área dos lotes.

Além disso, foi a partir da disposição dos edifícios na malha urbana projetada, bem como do seu dimensionamento, que foi possível determinar os índices de densidade urbana Índice de área plana (λ_P) e Índice da área frontal (λ_F).

A literatura existente considera que para efeito de ventilação, na malha urbana, a altura aleatória dos edifícios, em um arranjo urbano, resulta em um melhor desempenho da captação

do vento do que a adoção de um gabarito uniforme e fixo (DI SABATINO et al. 2008; LEE, JUSUF e WONG (2013); LIN, et al. 2014). Dessa forma, foram investigadas sete adaptações da fórmula de cálculo dos recuos progressivos em três dimensões de lotes distintas, o que possibilitou uma maior variação da massa edificada, uma vez que a dimensão do recuo está condicionada ao número de pavimentos dos edifícios.

Na primeira situação (R1), considerou-se a fórmula atualmente em vigor no Código de Urbanismo e Edificações de Maceió, com a ocupação máxima que os recuos e as dimensões do terreno permitiram alcançar. O objetivo seria comparar os resultados da situação até então permitida pela legislação com as demais propostas (Tabela 6).

Tabela 6 - Fórmulas para cálculo dos recuos mínimos obrigatórios presentes no Código de Urbanismo e Edificações de Maceió, em metros – Situação 2.

SITUAÇÃO	FÓRMULAS PARA OS RECUOS PROGRESSIVOS (m)	FRONTAL (m)	LATERAL e POSTERIOR (m)	ÍNDICE DE ÁREA PLANA* (λP) %	ÍNDICE DA ÁREA FRONTAL* (λF) %
R1		$5 + \frac{n-2}{2}$	$1,5 + \frac{n-2}{2}$	27	90° (L) – 10,8 135° (SE)– 22,8

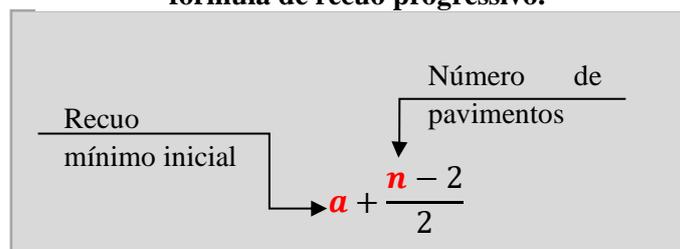
n: número de pavimentos do edifício.

*Medidas de densidade urbana (GRIMOND e OKE ,1999; CHEN et al., 2017), conforme consta no item 2.3.1.

Fonte: Adaptado de Maceió (2007).

Nas situações 2 a 7 (R2 a R7), foram propostas alterações nos recuos mínimos iniciais contidos na fórmula dos recuos finais (frontal ou lateral/posterior), conforme Figura 56. Já a situação 8 (R8), com o objetivo de investigar o comportamento da ventilação em arranjos construtivos que apresentassem um maior coeficiente de aproveitamento (através da altura) com uma menor taxa de ocupação nos terrenos, propôs-se a alteração no numerador da fórmula com o acréscimo de uma unidade, o que resultou no acréscimo de 5% no recuo final (Tabela 7).

Figura 56 - Explicação dos itens que compõem a fórmula de recuo progressivo.



Fonte: Adaptado de Maceió (2007).

Tabela 7 - Propostas a serem investigadas para alteração da fórmula de recuos.

SITUAÇÃO	PROPOSTA ALTERAÇÃO RECUO MÍNIMO INICIAL	FÓRMULAS PARA OS RECUOS PROGRESSIVOS (M)		ÍNDICE DE ÁREA PLANA* (λP) %	ÍNDICE DA ÁREA FRONTAL* (λF) %
		FRONTAL (m)	LATERAL/ POSTERIOR (m)		
R2	Acréscimo de 25% no recuo mín. Lateral/Posterior.	$5 + \frac{n-2}{2}$	$1,875 + \frac{n-2}{2}$	29	90° (L) – 10,2 135° (SE) – 21,7
R3	Acréscimo de 25% no recuo mín. Frontal.	$6,25 + \frac{n-2}{2}$	$1,5 + \frac{n-2}{2}$	18	90° (L) – 16 135° (SE) – 40,3
R4	Acréscimo de 25% nos recuos mín. Frontal e Lateral/Posterior.	$6,25 + \frac{n-2}{2}$	$1,875 + \frac{n-2}{2}$	15,5	90° (L) – 16,3 135° (SE) – 41,4
R5	Acréscimo de 50% nos recuos mín. Frontal e Lateral/Posterior.	$7,5 + \frac{n-2}{2}$	$2,25 + \frac{n-2}{2}$	19	90° (L) – 14,3 135° (SE) – 35,7
R6	Acréscimo de 75% nos recuos mín. Frontal e Lateral/Posterior.	$8,75 + \frac{n-2}{2}$	$2,625 + \frac{n-2}{2}$	19,2	90° (L) – 15,2 135° (SE) – 36,5
R7	Acréscimo de 100% nos recuos mín. Frontal e Lateral/Posterior.	$10 + \frac{n-2}{2}$	$3 + \frac{n-2}{2}$	20,5	90° (L) – 11,4 135° (SE) – 29,4
R8	Acréscimo de 5% no recuo final	$5 + \frac{(n-2) + 1}{2}$	$1,5 + \frac{(n-2) + 1}{2}$	14	90° (L) – 11 135° (SE) – 29,2

*Medida de densidade urbana (GRIMOND e OKE, 1999; CHEN et al., 2017), conforme consta no item 2.3.1.

Fonte: Autora (2018).

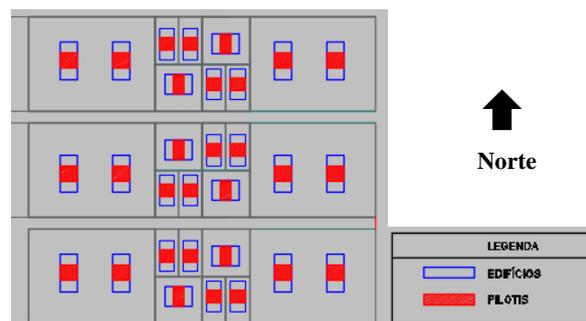
4.1.3 Pilotis

Associado às propostas de alteração dos recuos, descritas anteriormente, foi considerado o pilotis como elemento arquitetônico adicional. Esse componente construtivo foi

modelado com um espaço aberto destinado ao uso comum, além de conter uma parte fechada, representada como um volume selado, reservada para a caixa da escada e elevadores, com área de construção de 40% da lâmina de projeção do prédio, conforme preconiza a legislação municipal para que o pilotis não seja considerado no cálculo da taxa de ocupação do terreno.

O pavimento pilotis foi considerado com altura de pé-direito de 3 metros e sua parte edificada foi dimensionada a partir da menor largura de cada edifício. Além disso, sua área construída ficou localizada na parte central de cada bloco, como pode ser observado na planta baixa da Figura 57.

Figura 57 - Definição da disposição e dimensionamento do Pilotis, em planta.



Fonte: Autora, (2019).

Foram também considerados propostas de cenários com a ausência de tal elemento nos edifícios.

4.1.4 Matriz de simulação

A seleção dos parâmetros de investigação descritos resultou em 32 modelos a serem simulados, como podem ser observados na Tabela 8:

Tabela 8 - Matriz de simulação.

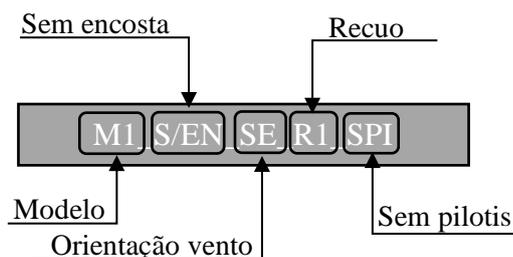
MATRIZ DE SIMULAÇÃO						
MOD	NOMENCLATURA	ENCOSTA*	VENTOS	RECUOS	ELEMENTOS	PAV
1	M1_S/EN_SE_R1_SPI	NÃO	SE	1.LEGISLAÇÃO ATUAL	S/PILOTIS	5, 10 e 15
2	M2_S/EN_SE_R1_PI				C/PILOTIS	5, 10 e 15
3	M3_S/EN_SE_R2_SPI			2.FRONTAL: $5+N-2/2$ LAT / FUNDO: $1,875+N-2/2$	S/PILOTIS	4, 9 e 14
4	M4_S/EN_SE_R2_PI				C/PILOTIS	4, 9 e 14
5	M5_S/EN_SE_R3_SPI			3.FRONTAL: $6,25+N-2/2$ LAT / FUNDO: $1,5+N-2/2$	S/PILOTIS	3, 10 e 28
6	M6_S/EN_SE_R3_PI				C/PILOTIS	3, 10 e 28
7	M7_S/EN_SE_R4_SPI			4.FRONTAL: $6,25+N-2/2$ LAT / FUNDO: $1,875+N-2/2$	S/PILOTIS	4, 11 e 30
8	M8_S/EN_SE_R4_PI				C/PILOTIS	4, 11 e 30
9	M9_S/EN_SE_R5_SPI			5.FRONTAL: $7,5+N-2/2$ LAT / FUNDO: $2,25+N-2/2$	S/PILOTIS	3, 9 e 25
10	M10_S/EN_SE_R5_PI				C/PILOTIS	3, 9 e 25
11	M11_S/EN_SE_R6_SPI			6. FRONTAL: $8,75+N-2/2$ LAT / FUNDO: $2,625+N-2/2$	S/PILOTIS	2, 8 e 25
12	M12_S/EN_SE_R6_PI				C/PILOTIS	2, 8 e 25
13	M13_S/EN_SE_R7_SPI			7. FRONTAL: $10+N-2/2$ LAT / FUNDO: $3+N-2/2$	S/PILOTIS	2, 7 e 20
14	M14_S/EN_SE_R7_PI				C/PILOTIS	2, 7 e 20
15	M15_S/EN_SE_R8_SPI			8. FRONTAL: $5+(N-2)+1/2$ LAT / FUNDO: $1,5+(N-2)+1/2$	S/PILOTIS	6, 12 e 30
16	M16_S/EN_SE_R8_PI				C/PILOTIS	6, 12 e 30
18	M18_S/EN_LE_R1_SPI	NÃO	L	1.LEGISLAÇÃO ATUAL	S/PILOTIS	5, 10 e 15
19	M19_S/EN_LE_R1_PI				C/PILOTIS	5, 10 e 15
20	M20_S/EN_LE_R2_SPI			2.FRONTAL: $5+N-2/2$ LAT / FUNDO: $1,875+N-2/2$	S/PILOTIS	4, 9 e 14
21	M21_S/EN_LE_R2_PI				C/PILOTIS	4, 9 e 14
22	M22_S/EN_LE_R3_SPI			3.FRONTAL: $6,25+N-2/2$ LAT / FUNDO: $1,5+N-2/2$	S/PILOTIS	3, 10 e 28
23	M23_S/EN_LE_R3_PI				C/PILOTIS	3, 10 e 28
24	M24_S/EN_LE_R4_SPI			4.FRONTAL: $6,25+N-2/2$ LAT / FUNDO: $1,875+N-2/2$	S/PILOTIS	4, 11 e 30
25	M25_S/EN_LE_R4_PI				C/PILOTIS	4, 11 e 30
26	M26_S/EN_LE_R5_SPI			5.FRONTAL: $7,5+N-2/2$ LAT / FUNDO: $2,25+N-2/2$	S/PILOTIS	3, 9 e 25
27	M27_S/EN_LE_R5_PI				C/PILOTIS	3, 9 e 25
28	M28_S/EN_LE_R6_SPI			6. FRONTAL: $8,75+N-2/2$ LAT / FUNDO: $2,625+N-2/2$	S/PILOTIS	2, 8 e 25
29	M29_S/EN_LE_R6_PI				C/PILOTIS	2, 8 e 25
30	M30_S/EN_LE_R7_SPI			7. FRONTAL: $10+N-2/2$ LAT / FUNDO: $3+N-2/2$	S/PILOTIS	2, 7 e 20
31	M31_S/EN_LE_R7_PI				C/PILOTIS	2, 7 e 20
32	M32_S/EN_LE_R8_SPI			8. FRONTAL: $5+(N-2)+1/2$ LAT / FUNDO: $1,5+(N-2)+1/2$	S/PILOTIS	6, 12 e 30
33	M33_S/EN_LE_R8_PI				C/PILOTIS	6, 12 e 30

*Elemento descartado por inconsistência nas simulações.

Fonte: Autora (2019).

Com o propósito de facilitar a descrição dos 32 modelos simulados, foi elaborada uma nomenclatura contendo todos os elementos investigados. O modelo M1_S/EN_SE_R1_SPI, por exemplo, representa o cenário sem encosta, com orientação do vento a sudeste (135°), com recuos R1 (recuos do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió) e sem pilotis nos edifícios, conforme mostra a Figura 58.

Figura 58: Nomeclatura dos modelos utilizados.



Fonte: Autora, (2019).

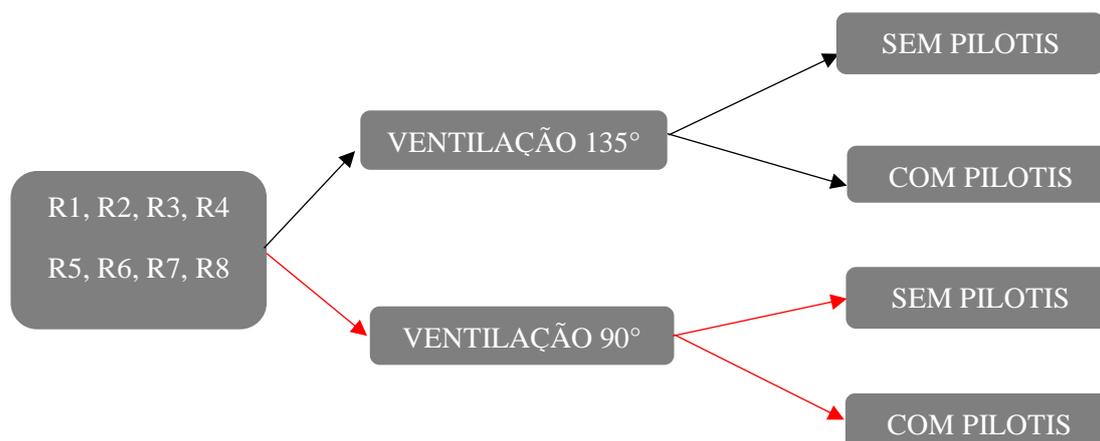
4.2 Análise Paramétrica

Para avaliar o desempenho da ventilação natural nos cenários urbanos propostos, frente às variáveis definidas no item anterior, foram realizadas análises comparativas de modelos. Para isto analisou-se as velocidades do vento registradas nos oito pontos escolhidos ao longo do arranjo. Além disto, foram consideradas as diferenças de coeficientes de pressões (ΔC_p) resultantes da distribuição da pressão do vento nas fachadas dos edifícios a barlavento e a sotavento.

O objetivo seria de confrontar os cenários de ocupação projetados de acordo com os parâmetros estabelecidos pela legislação vigente, com cenários propostos a partir da premissa da utilização máxima do coeficiente de aproveitamento, sem que com isso se aumente a lâmina da projeção construtiva.

Dessa forma, dividiu-se os modelos simulados em quatro grupos levando-se em conta a orientação do vento, a existência ou não do pilotis nos edifícios e os oito recuos estudados, como pode ser visualizado na Figura 59.

Figura 59 - Esquema dos grupos de análise definidos para a pesquisa.



Fonte: Autora (2019).

4.3 Coeficientes de pressão (C_p) nas fachadas dos edifícios

A distribuição da pressão do vento nas fachadas dos edifícios é uma condição importante para quase todos os modelos usados atualmente em programas de rede de fluxo de ar e de simulação de energia nas edificações (VRACHIMI; MELO; CÓSTOLA, 2017).

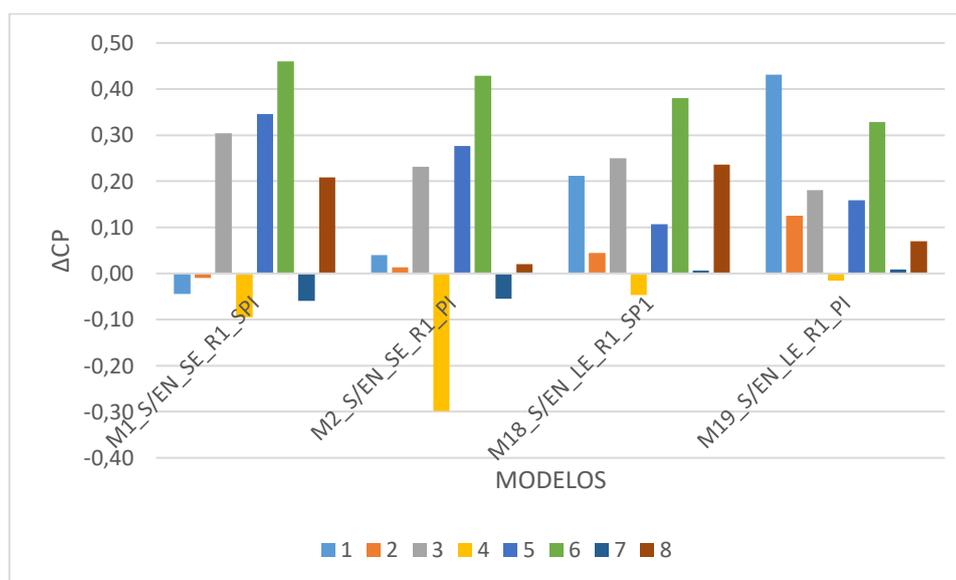
O valor de coeficiente de pressão (C_p) ainda é uma fonte de muita incerteza devido a vários condicionantes que os edifícios possam estar expostos. Essas incertezas nos valores de C_p podem ser suplantadas através do uso de experimentos em túneis de vento e medições em grande escala, que geralmente são bastante dispendiosas (VRACHIMI; CÓSTOLA; MELO, 2017).

Autores como Tuomaala (2002) afirmam que não há método totalmente eficaz para avaliar o valor de coeficientes de pressão do vento para casos complexos, uma vez que existe uma infinidade de parâmetros que pode influenciar os dados de C_p , a exemplo da velocidade e direção do vento, da geometria da edificação e de obstruções nas proximidades do edifício. No entanto, sabe-se que as diferenças de coeficientes de pressão nas aberturas das fachadas (ΔC_p) podem servir como um indicativo do potencial do uso adequado da ventilação natural para o resfriamento passivo das edificações. Para Melo et al. (2014), a utilização de redes neurais artificiais (*artificial neural networks*) pode potencialmente melhorar a previsão de

coeficientes de pressão do vento, e que por sua vez podem ser usado como dados de entrada em simulações de modelagem de fluxo de vento em edifícios.

Para esta tese, a partir dos dados de saída das simulações computacionais, foram calculados os coeficientes de pressões (C_p) para cada um dos oito pontos de interesse, bem como para seus respectivos pontos localizados nas fachadas imediatamente opostas, utilizando para isto a equação 2, já descrita no item 2.2.2. Em seguida, foram calculados os ΔC_p s de todos os cenários simulados, a exemplo do gráfico a seguir, referente aos modelos com recuos R1(Figura 60).

Figura 60 - Valores de ΔC_p dos cenários com recuo R1, em seus oito pontos de interesses.



Fonte: Autora (2019).

4.4 Etapas de configuração do *software Phoenix*

Para tal estudo, foram realizadas simulações computacionais com o *software Phoenix* na sua versão 2018 v1.0. O software tem se mostrado de grande interesse por parte de pesquisadores que tratam do ambiente construído. É uma ferramenta que proporciona resultados precisos e confiáveis e que, como já citado no item 2.4.1, permite o desenvolvimento de simulações de uma gama de processos que envolvem o fluxo de fluidos, transferência de calor e de massa, dentre outras situações. Além disso, sua licença se encontra disponível no Laboratório de Conforto Ambiental, da Universidade Federal de Alagoas.

Para a realização das simulações computacionais através do *software Phoenix*, foi necessária a realização das seguintes configurações:

4.4.1 Definição do modelo

O programa CFD *Phoenix* possibilita que a geometria do modelo seja importada através de um arquivo do tipo CAD e ainda disponibiliza ferramentas de desenho para a preparação do cenário no próprio programa. A elaboração do modelo e definição do domínio são as primeiras etapas a serem executadas antes da execução dos cálculos e saída dos resultados. No presente trabalho, os modelos foram elaborados com as ferramentas de desenho disponíveis no módulo de gerenciamento de objetos (*object management*), obedecendo os critérios já descritos no item 4.1.

Segundo Leite (2015), é na elaboração do modelo que são representados todos os objetos de interesse e o entorno (fronteiras), de maneira que estejam contidos em um mesmo volume e que passem a representar um domínio.

Em simulações em escala urbana, que exige um conjunto numeroso de elementos a representar, a simplificação da geometria se faz necessária, para que se consiga reduzir o tempo de processamento e a capacidade computacional para a execução dos cálculos (LEITE, 2015; PRATA, 2005). Sendo assim, para a análise inicial, desconsiderou-se a inclinação dos telhados das edificações; os cenários simulados tiveram seus edifícios configurados de modo a não considerar a transferência de calor, uma vez que foram indicados como elementos adiabáticos, o que viabiliza o tempo de simulação.

Optou-se por considerar os edifícios como modelos selados, ou seja, a porosidade das fachadas dos edifícios foi desconsiderada. Esta solução é possível para análises de ventilação urbana, em situações de baixa porosidade dos edifícios. Segundo autores como Aynsley (1988) *apud* Bittencourt e Candido (2005); Straaten (1967) e Carrilho da Graça et al. (2002), utilizar modelos fechados para determinar valores de C_p é possível apenas nos casos em que a porosidade do edifício é inferior a 20%.

Esta condição de baixa porosidade construtiva pode se aplicar ao contexto dos modelos em análise. Pois, conforme já citado no item 3.3, no Código de Edificações e Urbanismo de Maceió, o dimensionamento e localização dos vãos de abertura para a ventilação e iluminação dos ambientes ficam a cargo do profissional responsável pelo projeto

da edificação. Com isso, a título de embasamento teórico, escolheu-se como referência o dimensionamento das aberturas estabelecido pela norma de desempenho NBR 15.575 (2013), que para as regiões nordeste e sudeste do Brasil sugere que a área das aberturas seja maior ou igual a 8% da área de piso do ambiente.

Fazendo um dimensionamento simplificado do que seriam as áreas de janelas dos ambientes de cada apartamento que compõem os edifícios, foram, de forma hipotética, dimensionadas as áreas internas dos ambientes de permanência prolongada (Sala estar/ jantar, quarto de casal e quarto de solteiro) que constituem cada apartamento dos edifícios, de maneira a determinar as áreas de abertura de janelas e comprovar a baixa porosidade construtiva dos edifícios (Tabela 9). Desse modo, calculou-se o percentual de porosidade em relação à área da fachada dos edifícios.

Tabela 9 - Dimensionamento das janelas de acordo com a área de piso.

Ambiente	Área do piso (m ²)	Área de abertura em m ² (8% da área do piso)
Sala estar/ jantar	17,00	1,36
Quarto Casal	11,00	0,88
Quarto Solteiro	8,00	0,64
Total (m ²)	36,00	2,88

Fonte: Autora (2018).

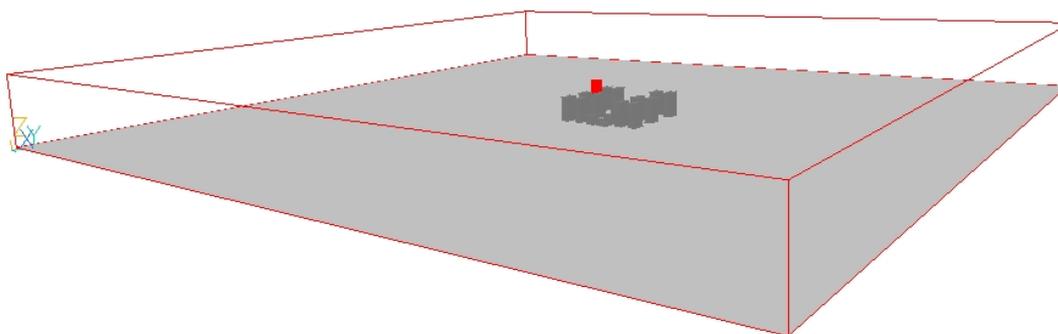
Sendo assim, as janelas do quarto de casal, quarto de solteiro e sala de estar/jantar, que estariam situadas na fachada principal, totalizaram 2,88 m². Foi considerado para cada edifício quatro apartamentos por andar e as áreas de janela dos quatro apartamentos totalizaram 11,52 m². Ao calcular as áreas das fachadas principais, verificou-se assim que os edifícios apresentaram porosidades inferiores a 20% (entre 1 a 15% apenas).

4.4.2 Geometria do domínio

O domínio em um ambiente em CFD é um espaço virtual no qual os objetos serão inseridos e simulados (SACRAMENTO, 2012). Na etapa de preparação do domínio é necessário definir sua dimensão de modo que a fixação de seus limites permita o livre escoamento do fluxo e não interfira nos campos de pressão gerados no processo de simulação (SACRAMENTO, 2012; LEITE, 2015).

O domínio utilizado para as simulações deste trabalho adquiriu a geometria retangular, uma vez que a cada simulação se considerou a incidência de apenas uma direção do vento por vez (figura 61). O suporte técnico do software *Phoenix* recomenda que o dimensionamento do domínio, para utilização do módulo *WIND*, seja calculado a partir da proporção 6 vezes o tamanho do eixo X; 6 vezes do eixo Y; e 3 vezes do eixo Z.

Figura 61 - Domínio calculado, representado pelo WIND, modelo virtual ao centro.



Fonte: Autora (2019).

Com isso, as equações para a definição dos limites do domínio, bem como seus valores, encontram-se descritas na tabela 10:

Tabela 10 - Cálculo do domínio.

CÁLCULO DO DOMÍNIO PARA O PHOENICS - Utilizando WIND					
Equações			$X_{dom} = 3,0 \cdot X_{obj} + X_{obj} + 3,0 \cdot X_{obj}$		
			$Y_{dom} = 3,0 \cdot Y_{obj} + Y_{obj} + 3,0 \cdot Y_{obj}$		
			$Z_{dom} = 3,0 \cdot Z_{obj} + Z_{obj}$		
Medidas do objeto			Medidas do domínio		
X_{obj}	Y_{obj}	Z_{obj}	X_{dom}	Y_{dom}	Z_{dom}
236,0	195,0	60,0	1416,0	1170,0	180,00

Fonte: Autora (2018).

4.4.3 Correção da velocidade do vento de acordo com o grau de rugosidade do entorno

O recorte espacial em estudo, como já descrito no item 3.4, está localizado em uma faixa litorânea. Ou seja, a ventilação vem do oceano com o perfil de vento livre de obstrução. Dessa forma, utilizou-se a velocidade média do ar de 3,1 m/s, dado extraído das normais climatológicas do Brasil do período de 1981-2010. Entretanto, para o uso desse dado de velocidade nas simulações foram necessárias correções, uma vez que os dados são medidos em estações meteorológicas situadas a 10m do solo. Assim é possível se considerar a

variabilidade da velocidade do vento na altura das aberturas das edificações, como também o efeito produzido pela rugosidade do entorno.

Para tal, utilizou-se os valores de coeficientes de rugosidade que se enquadram a uma área de campo com obstáculos esparsos, situação que melhor se encaixa na realidade da área em estudo, como pode ser verificada na Tabela 11.

Tabela 11 - Coeficientes de rugosidade de terreno.

Coeficientes do terreno	<i>k</i>	<i>a</i>
Área aberta plana	0,68	0,17
Campo com obstáculos esparsos	0,52	0,20
Área Urbana (subúrbio)	0,35	0,25
Centro de cidade	0,21	0,33

Fonte: (BITTENCOURT; CANDIDO, 2008 *apud* JACKMAN, 1980).

O *Phoenix* descreve que o cálculo de altura de referência determina a altura em que a velocidade do vento é especificada e esta é definida pela equação que segue, onde foram inseridos os valores de *k* e *a* (BRE, 1978; CHAM, 2005):

$$V_z = V_{10} \times k \times Z^a \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

V_z é a velocidade do vento na altura *Z* de interesse (m/s);

V₁₀ é a velocidade do vento a 10 metros de altura do solo (m/s);

Z é a altura da abertura (m);

k e ***a*** são coeficientes de acordo com a rugosidade do terreno.

O programa realiza esse cálculo de correção do vento automaticamente, a partir dos dados de *k* e *a* inseridos.

Outra informação que deve ser determinada no programa é a altura de rugosidade efetiva, que define a altura de rugosidade nas bordas do domínio. Os valores típicos utilizados no programa são apresentados na Tabela 12. Esses valores podem ser selecionados de uma lista, ou um novo valor definido pelo usuário pode ser inserido. Para as simulações foi considerado o valor de 0,03 relacionado a terrenos abertos com obstáculos isolados (Tabela 12).

Tabela 12 - Dados de altura de rugosidade efetiva.

Tipo de superfície	Altura de rugosidade z_0 (m)	coeficiente α
Mar aberto	0,0002	0,16
Terreno plano aberto, grama, alguns obstáculos isolados	0,03	0,13
Culturas baixas, grandes obstáculos ocasionais	0,10	0,16
Culturas altas, obstáculos dispersos	0,25	0,19
Arbustos, numerosos obstáculos	0,50	0,21
Subúrbio, floresta, cobertura de obstáculo grande e regular	0,50 – 1,0	0,21 – 0,24

Fonte: CHAM (2017).

Com base nos dados e cálculos apresentados, os campos relacionados à configuração do vento foram preenchidos no módulo *Wind*, disponível no programa *Phoenix*, com os seguintes valores (Tabela 13):

Tabela 13 - Configuração dos atributos do vento.

Atributos do vento	Dados
Velocidade do vento a 10 m do solo (m/s)	3,10
Direção do vento	(135° e 90°)
Altura de referência (m)	26,30*
Índice Power Law (expoente de acordo com o tipo de superfície)	0,20
Altura de rugosidade efetiva (m)	0,03 (terreno aberto plano, grama, poucos obstáculos isolados)

*A altura de referência é calculada em função dos valores tabelados de k e a , da equação:

$$\text{Altura de referência} = k^{(-1/a)}$$

Fonte: Autora (2018).

4.4.4 Configuração da malha

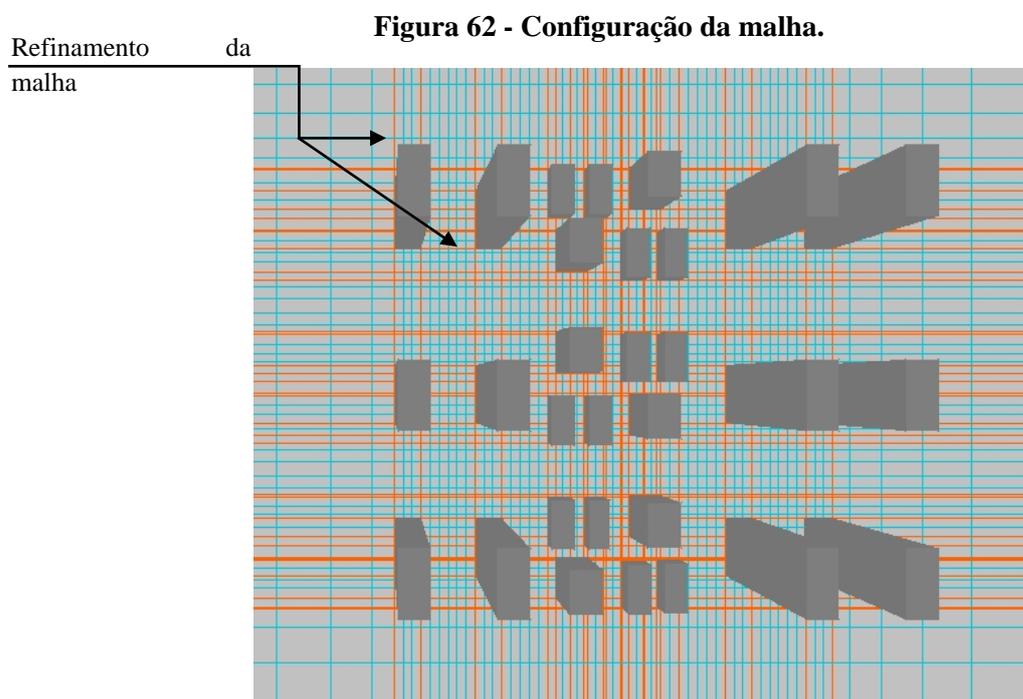
Nos *softwares* CFDs há a criação das malhas, que nada mais são do que a subdivisão do domínio discretizado e que segundo Leite (2015), serve para representar os obstáculos contidos no domínio e as áreas adjacentes. Essas células criadas são os pontos que serão solucionados a partir das equações fundamentais.

O *Phoenix* dispõe de três tipos de configurações de malha automática, a partir dos sistemas de coordenadas: cartesiana, cilíndrica-polar e Body-Fitted (BFC). Em que os dois primeiros são compostos de linhas de grades regulares, já o último, é composto por faces curvadas arbitrariamente, de acordo com a geometria do objeto (CHAM, 2017).

Como padrão, o recurso de malha automática está ativado para a coordenada cartesiana, com as configurações iniciais de cada região criada, e esta é definida pelo próprio *software*, de acordo com a geometria do objeto simulado. Cabe ao usuário fazer o refinamento da malha, para que se possa alcançar, nos pontos desejados, maior precisão do fluxo do vento no menor tempo de processamento possível.

O tutorial do programa *Phoenix* sugere ao usuário utilizar o *power law* ou *Geometrical progression*, na ferramenta de distribuição, para reduzir a mudança no tamanho da grade entre as regiões. Isso ajudará na convergência do *Earth solver*. Com a malha automática ativada, controla-se o tamanho mínimo da célula, como também sua proporção máxima. A redução desses dois valores poderá diminuir o tamanho da grade entre os limites da região, e também aumentar o número de células (CHAM, 2017).

Dessa forma, a partir da malha automática (uma malha mais grossa e uniforme), foram feitos testes de refinamentos, com a finalidade de se atingir a convergência e de se reduzir o tempo de simulação. Verificou-se a necessidade de se modificar o espaçamento da grade entre as regiões através da ferramenta de distribuição, de modo a se obter uma expansão geométrica assimétrica nas extremidades mais próximas aos obstáculos. Uma malha mais reduzida permite uma maior precisão nos resultados em tais pontos (Figura 62).



Fonte: Autora (2019).

4.4.5 Configuração dos parâmetros de relaxamento e escolha de um modelo de turbulência

A inclusão dos parâmetros de relaxamento é a técnica mais amplamente conhecida para alcançar a convergência nas simulações em CFD. A inserção desses parâmetros de relaxamento na configuração das simulações auxilia o *software* a diminuir as oscilações excessivas ao longo da varredura. Isso faz com que as convergências entre as variáveis ocorram de forma mais suave e conseqüentemente evita que hajam picos de valores que podem levar a divergência dos resultados. O relaxamento não altera a solução final, apenas o modo pelo qual ela é alcançada (CHAM, 2017).

Deve-se ter o cuidado na escolha dos parâmetros de relaxamento, pois um tamanho de grade muito reduzido pode determinar pequenas oscilações sobre um valor razoavelmente constante, uma vez que as variáveis não podem sofrer muita alteração em cada varredura, enquanto que uma grade muito ampla pode evitar que os resíduos caiam demais porque os valores variáveis estão oscilando (CHAM,2017).

Para as condições de simulação desta tese foram utilizados os valores de relaxamento padrão, configurados pelo próprio *software*, conforme Tabela 14:

Tabela 14 - Controle de relaxamento.

Variável		Valor
Pressão	P1	0,1
Velocidade em X	U1	0,5
Velocidade em Y	V1	0,5
Velocidade em Z	W1	0,5
Energia cinética turbulenta	KE	0,5
Dissipação da energia cinética	EP	0,5

Fonte: Autor (2018).

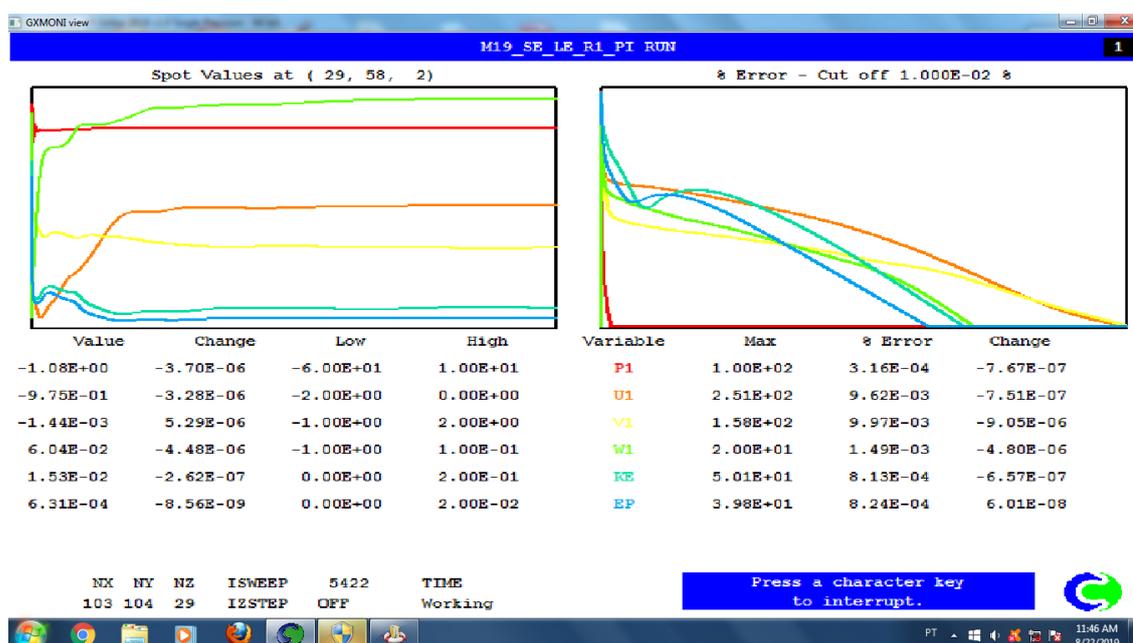
O *software Phoenix* dispõe de vários modelos de turbulência que podem ser adotados, sua função é de incorporar uma série de equações diferenciais ou algébricas que represente as características de um fluxo turbulento. Para a presente tese, utilizou-se o modelo de turbulência $k - \varepsilon$, por ser o mais comumente utilizado nesse tipo de simulação (CÓSTOLA e ALUCCI, 2011; LEE, JUSUF e WONG, 2013). Os efeitos da turbulência no escoamento

médios são descritos por meio de uma equação para energia cinética turbulenta (k) e de outra equação para taxa de dissipação da turbulência (ε) (CÓSTOLA e ALUCCI, 2011).

Adotou-se como critério de convergência dos resultados um nível residual admissível de até 10^{-4} , dessa forma, a finalização das simulações foram alcançadas após aproximadamente 6000 interações.

A Figura 63 identifica o gráfico com as porcentagens de erros da simulação do modelo 19 - edifícios com pilotis, com recuos R1 (segundo a legislação vigente), com orientação do vento a 90° (leste). A curva converge sem grandes oscilações para o valor adotado pelo critério de erro e os valores das variáveis calculadas no *Spot Values* estabilizam-se ao longo da simulação. Vale destacar que o *Spot Values* exibe os valores das variáveis de um ponto especificado pelo usuário na grade.

Figura 63: Gráfico de erros e spot values da simulação de modelo M19 - edifícios sem encosta, recuos R1, com vento 90° (leste) e com pilotis.



Fonte: Autora (2019).

4.5 Análise dos resultados

A análise dos resultados está relacionada à avaliação do desempenho da ventilação natural, a partir da sua velocidade e das diferenças de coeficientes de pressões (ΔC_p), e sua relação com os parâmetros pré-definidos. Para tanto, foi utilizada a análise paramétrica e a análise estatística.

Para avaliar o comportamento da velocidade do vento, como também das diferenças de coeficientes de pressões (ΔC_p) frente às variáveis definidas no item 4.1, optou-se, a partir da parametrização, por utilizar a análise comparativa de modelos. Confrontou-se os cenários de ocupação projetados de acordo com parâmetros estabelecidos pela legislação vigente, com cenários propostos a partir da premissa da utilização do coeficiente de aproveitamento, sem que com isso se aumente a lâmina da projeção construtiva.

Os dados resultantes das velocidades médias do vento e das pressões dinâmicas medidas nos oito pontos das fachadas dos edifícios, identificados no item 4.1.1, foram inseridos em planilhas eletrônicas, a fim de possibilitar a confecção dos gráficos que auxiliaram no desenvolvimento das análises, conforme constam nos apêndices A e B.

Como já exposto no subitem 4.2, dividiu-se os dados tabulados em quatro grupos de análise, cada grupo contemplando cenários com um dos oito recuos, além das variáveis em comuns:

1. Modelos sem pilotis e orientação do vento a 135° ;
2. Modelos com pilotis e orientação do vento a 135° ;
3. Modelos sem pilotis e orientação do vento a 90° ;
4. Modelos com pilotis e orientação do vento a 90° .

Em seguida analisou-se comparativamente os resultados mais significativos dos quatro grupos.

O tratamento estatístico dos dados teve como objetivo investigar o comportamento das variáveis e suas relações de dependências, para isto foi utilizada a técnica de Regressão Linear Múltipla. A partir do método dos mínimos quadrados, a regressão possibilita avaliar o comportamento de uma variável dependente diante de duas ou mais variáveis independentes, ou seja, se duas ou mais variáveis são capazes de prever outra e estabelecer uma expressão que explique essa relação.

Tabela 15 - Características das variáveis para análise estatística.

Variável	Tipo	Descrição	Categorias do modelo	Categorias estatísticas
01	Dependente	Velocidade do vento (m/s).	Dados de saída das simulações	Dados quantitativos de velocidade do vento.
02	Independente	Localização - altura dos pontos de interesse.	-A 1,5 m do solo -2/3 da altura média dos edifícios -Último pavimento	Valores numéricos calculados de acordo com a altura dos modelos
03	Independente	Índice da área plana	Valores calculados de acordo com o grau de adensamento dos modelos	Valores numéricos calculados de acordo com o grau de adensamento dos modelos
04	Independente	Orientação	Sudeste	1
			Leste	-1
05	Independente	Pilotis	Sem Pilotis	1
			Com Pilotis	-1

Fonte: Autora (2019).

Como já descrito no item 4.1, a análise deste trabalho parte da investigação do comportamento da ventilação natural (variável dependente) a partir da influência conjunta dos parâmetros recuos, pilotis, orientação do vento, e em três alturas distintas em relação ao solo (variáveis independentes). No entanto, foi necessário fazer alguns ajustes nos parâmetros investigados, de modo a substituir as categorias qualitativas por valores numéricos, conforme tabela 15.

Além disso, verificou-se que a utilização dos recuos como variável independente na análise estatística foi inviabilizada, por se tratar de uma variável que apresenta três dimensões de afastamentos distintas (frontal, lateral e posterior) e para três dimensões de lotes também distintas em cada cenário (15 x 30 m; 30 x 30 m e 60 x 80 m). Dessa forma, optou-se por substituí-la pela variável Índice da área plana (λp) que, como já explicado no item 2.3.1, serve para analisar o grau de adensamento de áreas urbanas a partir da relação entre a área de projeção dos edifícios em planta com a área total em planta da superfície analisada. Ou seja, o λp está diretamente relacionado à escolha dos recuos e quanto menor o valor dessa variável, maior seria a porosidade do cenário.

4.6 Descrição dos edifícios que compoem a malha

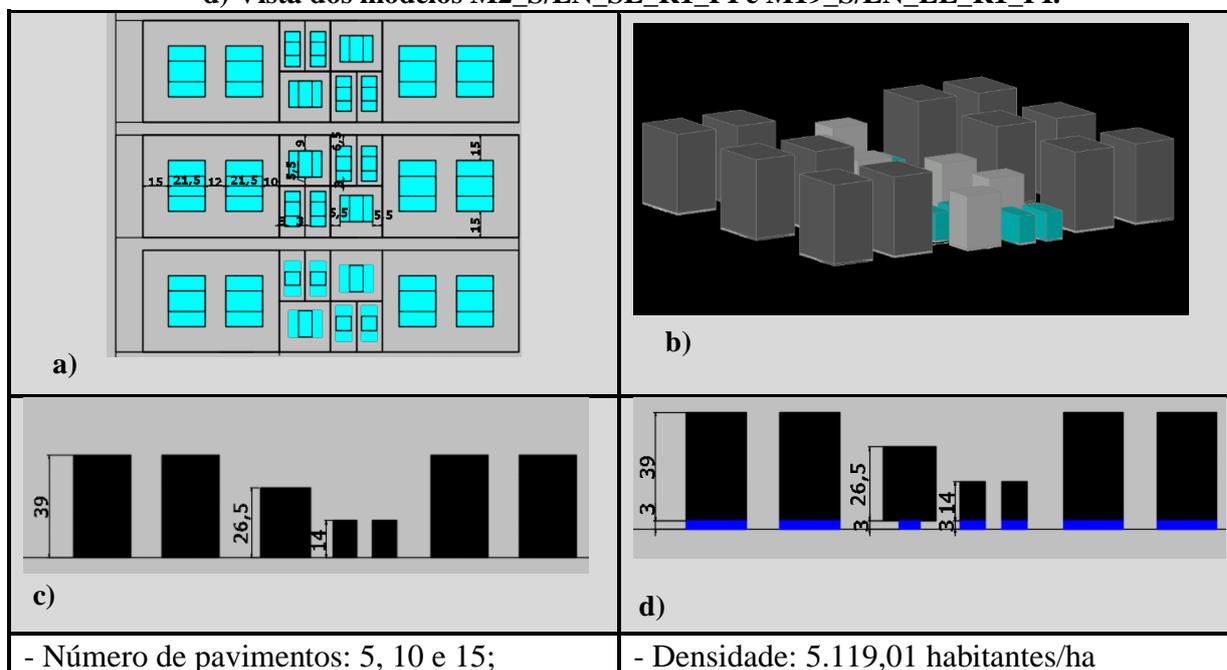
A análise dos recuos investigados determinou a configuração final de cada um dos arranjos que foram de modo que em alguns modelos os afastamentos foram maiores do que em outros, como também houve a variação da densidade. Essas propostas de recuos também definiram a geometria dos edifícios, apresentando alguns cenários com blocos mais compactos e outros mais delgados, conforme pode ser verificado a seguir.

4.6.1 Modelos com recuos R1

Para os modelos M1_S/EN_SE_R1_SPI, M2_S/EN_SE_R1_PI, M18_S/EN_LE_R1_SPI e M19_S/EN_LE_R1_PI, adotou-se como referência os cálculos de recuos progressivos do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió vigentes desde 2007. Dessa forma, os cenários apresentam características construtivas semelhantes, exceto a presença dos pilotis contida apenas nos blocos dos modelos M2 e M19, conforme Quadro 3.

As três dimensões de lotes existentes nos arranjos possibilitaram a implantação de edifícios de 5, 10 e 15 pavimentos. Com isso, foram contabilizados 1200 apartamentos, que resultou em uma densidade de 5.119,01 habitantes/ha (Quadro 3).

Quadro 3 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R1; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R1; c) Vista dos modelos M1_S/EN_SE_R1_SPI e M18_S/EN_LE_R1_SPI; d) Vista dos modelos M2_S/EN_SE_R1_PI e M19_S/EN_LE_R1_PI.



Fonte: Autora (2019).

Os pilotis existentes nos blocos que compõem os modelos M2 e M19 foram dimensionados com 40% da lâmina de projeção dos edifícios. Isso significou uma área de 73,8 m², 116,25 m² e 258 m² para os lotes de 15 x 30 m, 30 x 30 m e 60 x 80 m, respectivamente.

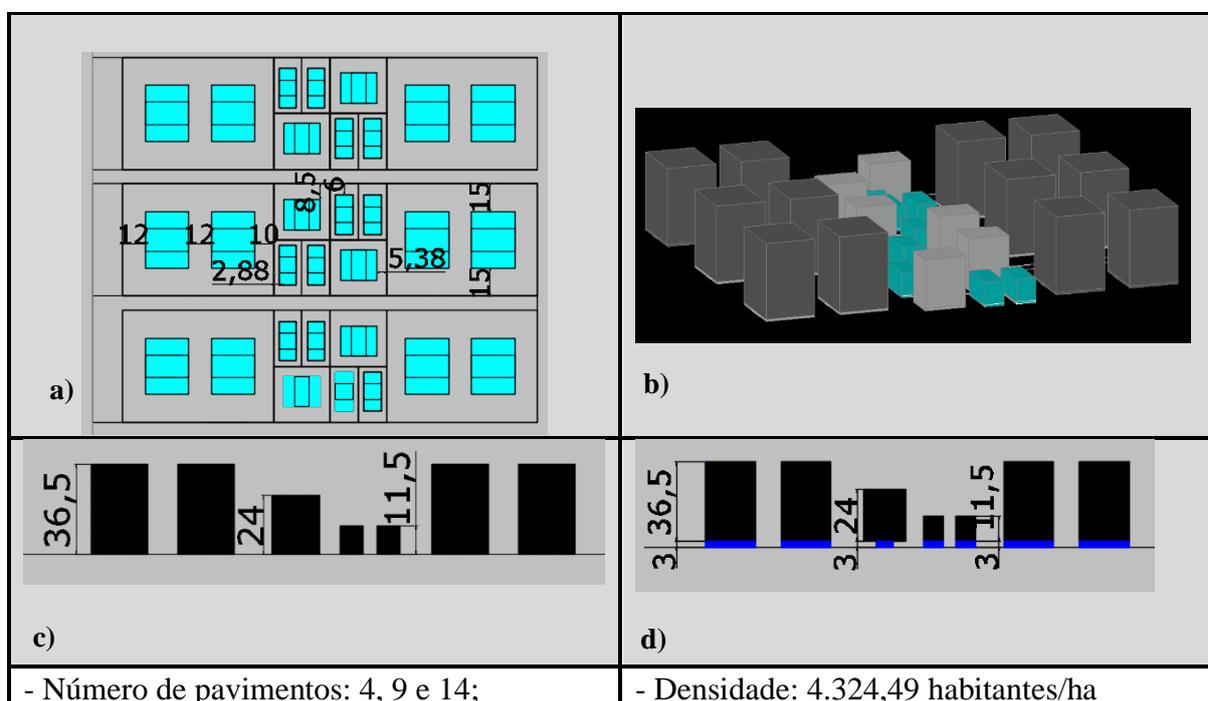
As características descritas conferem aos modelos uma volumetria de blocos mais compactos, com alturas que variaram de 14 a 39 metros, como pode ser observado no Quadro 3.

4.6.2 Modelos com recuos R2

Nos modelos M3_S/EN_SE_R2_SPI, M4_S/EN_SE_R2_PI, M20_S/EN_LE_R2_SPI e M21_S/EN_LE_R2_PI utilizou-se o recuo R2, onde houve o acréscimo de 25% no recuo mínimo Lateral e Posterior, mantendo a fórmula do recuo Frontal conforme a legislação atual.

O acréscimo de 25% apenas no recuo mínimo Lateral e Posterior, significou em uma pequena alteração nas características do arranjo, em relação aos modelos do recuo R1. Isso resultou em edifícios de 4, 9 e 14 pavimentos e com geometria compacta, semelhante ao caso anterior (Quadro 4).

Quadro 4 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R2; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R2; c) Vista dos modelos M3_S/EN_SE_R2_SPI e M20_S/EN_LE_R2_SPI; d) Vista dos modelos M4_S/EN_SE_R2_PI e M21_S/EN_LE_R2_PI.



Fonte: Autora (2019).

Os modelos M4 e M21 possuem pilotis em seus edifícios com áreas de 75,85m², 124,16 m² e 276 m², o que correspondeu a 40% da lâmina de projeção dos seus edifícios.

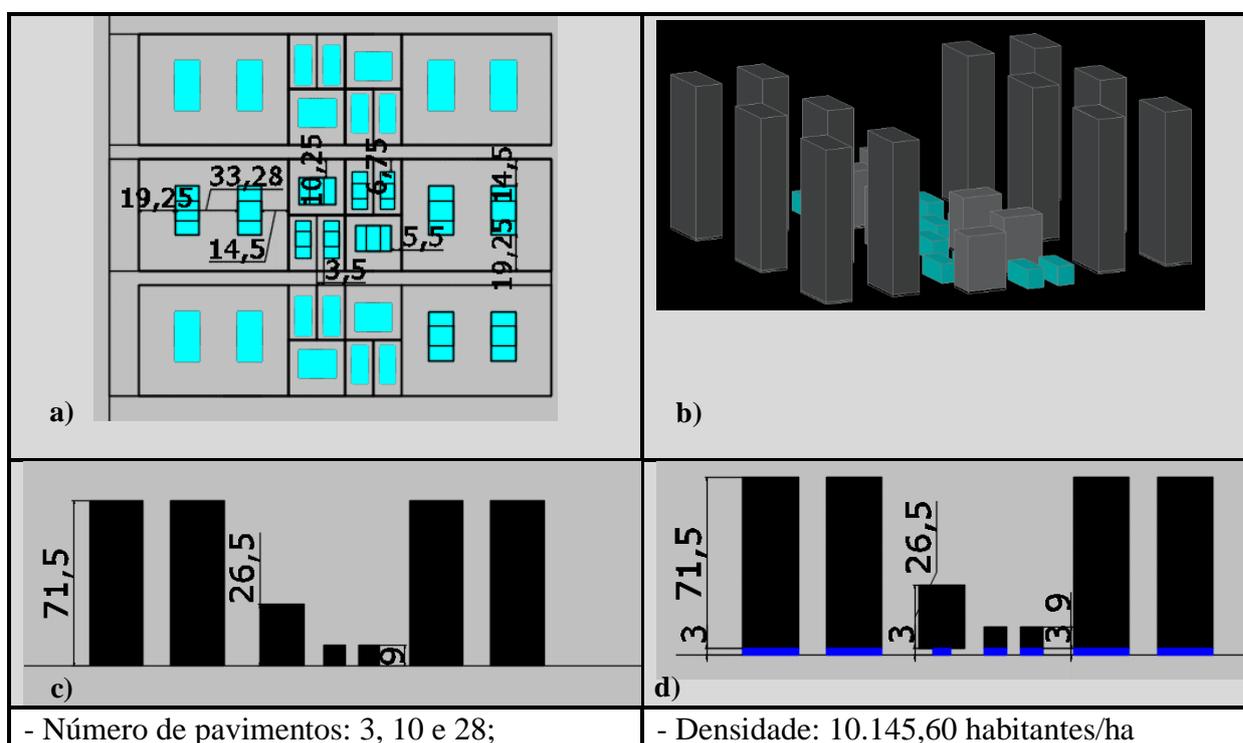
Considerando que os cenários contaram com 12 blocos de 4 pavimentos, 6 blocos de 9 pavimentos e 12 blocos de 14 pavimentos, isso representou um total de 1080 apartamentos. Sendo assim, os cenários elaborados a partir dos recuos R2 resultaram em uma densidade urbana de 4.324,49 habitantes por hectare.

4.6.3 Modelos com recuos R3

Para os modelos M5_S/EN_SE_R3_SPI, M6_S/EN_SE_R3_PI, M22_S/EN_LE_R3_SPI e M23_S/EN_LE_R3_PI adotou-se os recuos R3 que apresentaram acréscimo de 25% no recuo mínimo Frontal e manteve os demais conforme o código vigente.

Nesses arranjos, procurou-se utilizar o máximo do coeficiente de aproveitamento nos lotes de 60 x 80 metros, que para a região considerada neste estudo seria 4, desconsiderando assim a limitação da altura do gabarito. Sendo assim, os arranjos apresentaram edifícios de 3, 10 e 28 pavimentos, que resultaram em 1728 apartamentos (Quadro 5).

Quadro 5 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R3; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R3; c) Vista dos modelos M5_S/EN_SE_R3_SPI e M22_S/EN_LE_R3_SPI; d) Vista dos modelos M6_S/EN_SE_R3_PI e M23_S/EN_LE_R3_PI.



Fonte: Autora (2019).

Os cenários M6 e M23 apresentaram pilotis igualmente dimensionados a partir de 40% da projeção da lâmina construtiva, cujas áreas foram de 64,8 m², 108,3 m² e 136,47 m².

A proposta de liberar a altura do gabarito resultou no aumento da densidade urbana para 10.145,60 habitantes/ha. Além disto, conferiu aos modelos uma geometria mais longilínea nos blocos maiores, como pode ser observado no Quadro 5.

4.6.4 Modelos com recuos R4

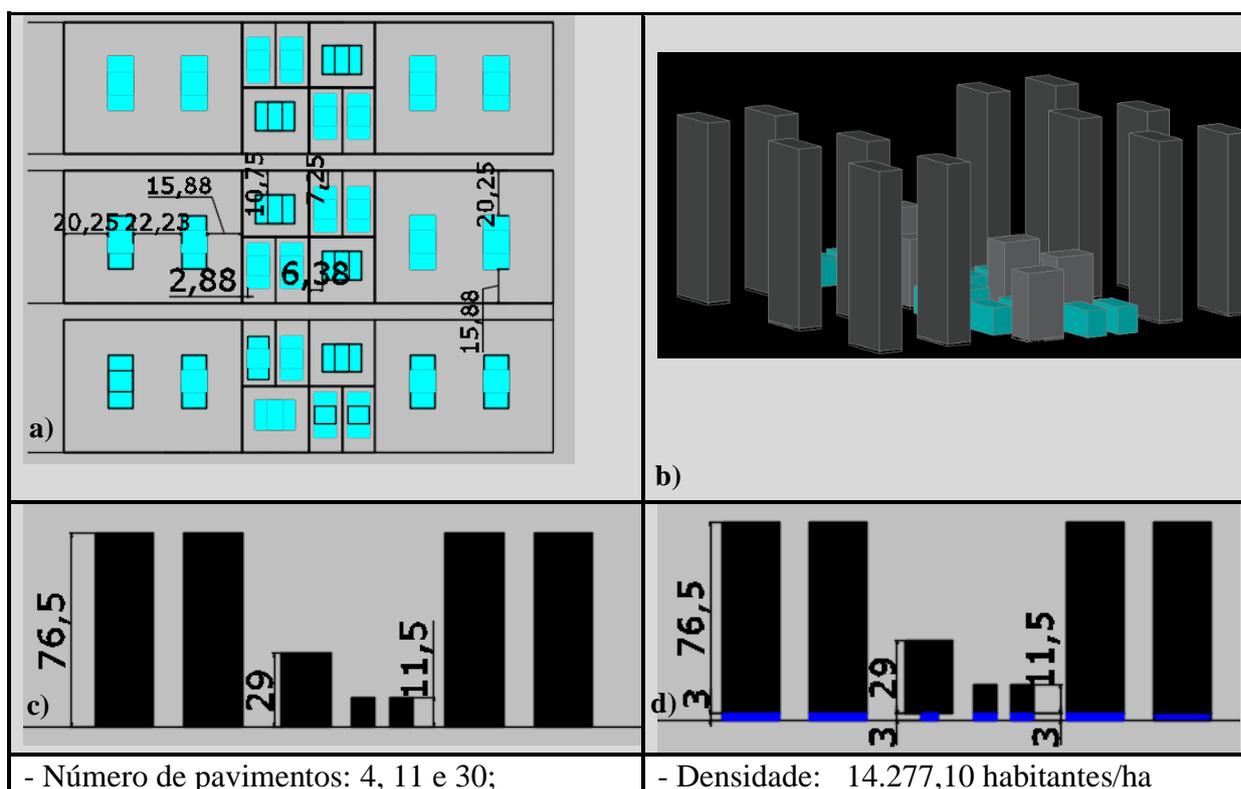
Para os modelos M7_S/EN_SE_R4_SPI, M8_S/EN_SE_R4_PI, M24_S/EN_LE_R4_SPI e M25_S/EN_LE_R4_PI adotou-se os recuos R4 que apresentaram acréscimo de 25% nos recuos mínimos Frontal e Lateral/Posterior.

Os pilotis existentes nos modelos M8 e M25 apresentam áreas de 73,53 m², 88,83 m² e 103,37 m².

Seguiu-se a mesma lógica de explorar ao máximo o coeficiente de aproveitamento dos lotes. O que resultaram em blocos de 4, 11 e 30 pavimentos, e conferiram uma geometria mais delgada, principalmente para os edifícios dos terrenos 60 x 80 m e 30 x 30 m, conforme quadro 6.

Tais edifícios apresentam alturas 11,5 m, 29 m e 76,5 m, e isso contabilizou um total de 1896 apartamentos, e resultou em uma densidade de 14.277,10 habitantes/ha.

Quadro 6 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R4; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R4; c) Vista dos modelos M7_S/EN_SE_R4_SPI e M24_S/EN_LE_R4_SPI; d) Vista dos modelos M8_S/EN_SE_R4_PI e M25_S/EN_LE_R4_PI.

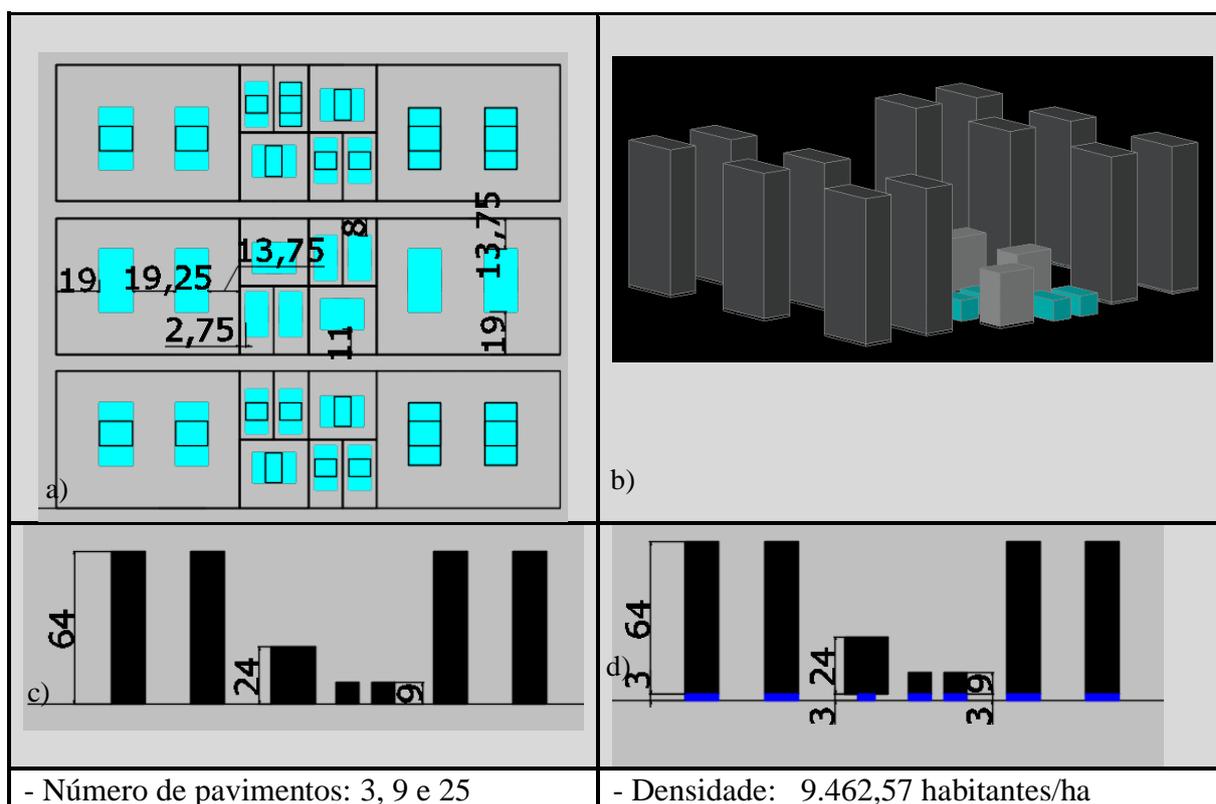


Fonte: Autora (2019).

4.6.5 Modelos com recuos R5

Para os modelos M9_S/EN_SE_R5_SPI, M10_S/EN_SE_R5_PI, M26_S/EN_LE_R5_SPI e M27_S/EN_LE_R5_PI, adotou-se os recuos R5 que apresentaram acréscimo de 50% nos recuos mínimos Frontal e Lateral/Posterior. Os pilotis dos modelos M10 e M27 apresentaram áreas de 73,15 m², 98,05 m² e 152,6 m².

Quadro 7 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R5; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R5; c) Vista dos modelos M9_S/EN_SE_R5_SPI e M26_S/EN_LE_R5_SPI; d) Vista dos modelos M10_S/EN_SE_R5_PI e M27_S/EN_LE_R5_PI.



Fonte: Autora (2019).

Os edifícios dos modelos com recuo R5 contam um número menor de pavimentos 3, 9 e 25, se comparado ao anterior, o que totalizou 1560 apartamentos. Pode-se dizer que os lotes 60 x 80 m deram lugar a edifícios mais delgados, já os lotes 15 x 30 m, apresentaram blocos mais compactos (Quadro 7).

As características apresentadas fizeram com que a densidade desses cenários fossem de 9.462,57 habitantes/ha.

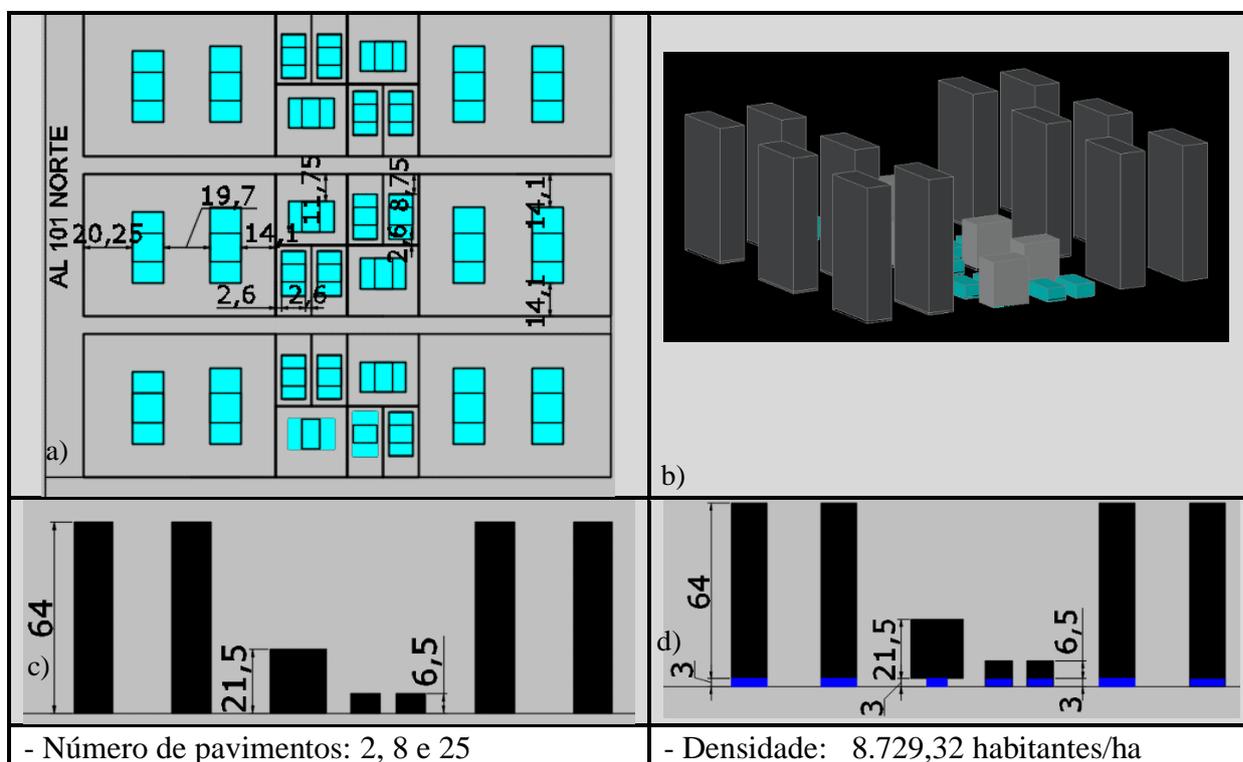
4.6.6 Modelos com recuos R6

Os modelos M11_S/EN_SE_R6_SPI, M12_S/EN_SE_R6_PI, M28_S/EN_LE_R6_SPI e M29_S/EN_LE_R6_PI foram elaborados a partir do acréscimo de 75% nos recuos mínimos Frontal e Lateral/Posterior.

Nesses cenários optou-se por dimensionar uma malha urbana de densidade intermediária, se comparada às demais, com 8.729,32 habitantes /ha. Para tal, fez-se uso de

blocos com 2, 8 e 25 pavimentos. Isso resultou em edifícios mais compactos nos lotes 15 x 30m (quadro 8).

Quadro 8: a) Planta baixa dos modelos com recuos R6; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R6; c) Vista dos modelos M11_S/EN_SE_R6_SPI e M28_S/EN_LE_R6_SPI; d) Vista dos modelos M12_S/EN_SE_R6_PI e M29_S/EN_LE_R6_PI.



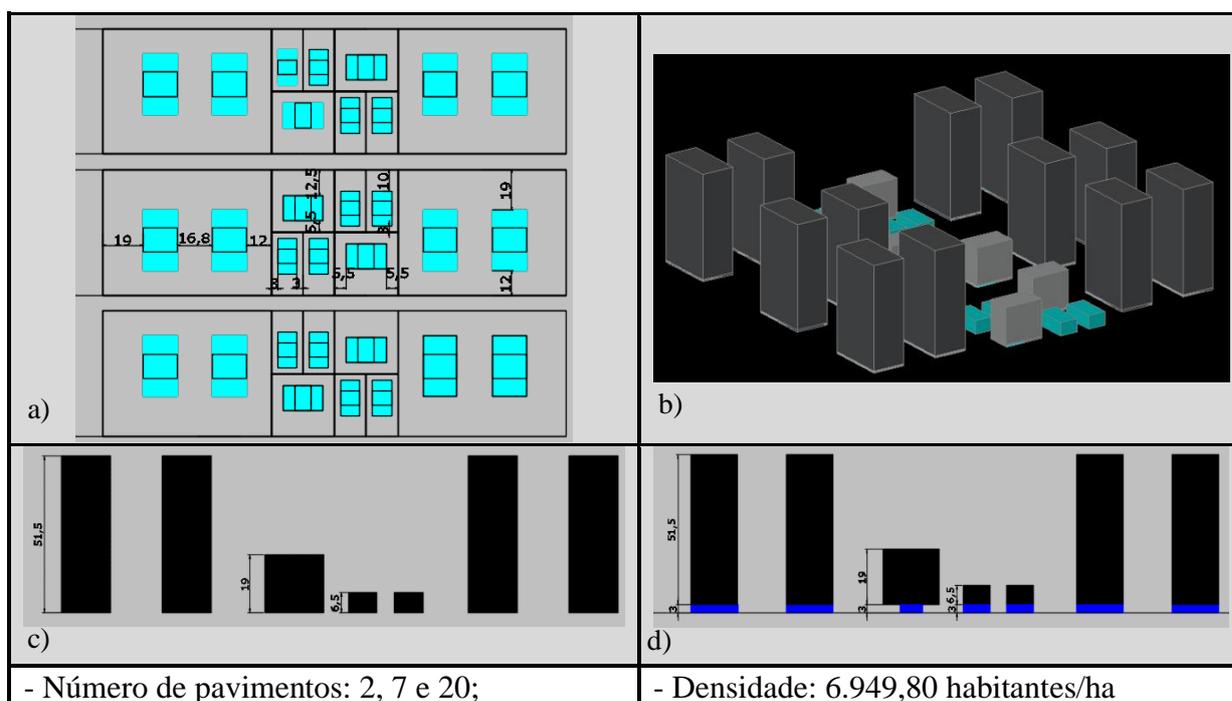
Fonte: Autora (2019).

4.6.7 Modelos com recuos R7

Nos modelos M13_S/EN_SE_R7_SPI, M14_S/EN_SE_R7_PI, M30_S/EN_LE_R7_SPI e M31_S/EN_LE_R7_PI utilizou-se o recuo R7, onde houve o acréscimo de 100% nos recuos mínimos Frontal e Lateral/Posterior.

Estes foram os modelos dimensionados com o maior acréscimo na fórmula dos recuos. No entanto, optou-se por analisar uma situação de maiores afastamentos, mas com uma altura limite de gabarito de até 20 pavimentos (como se encontra na legislação vigente). Para tal, os blocos ficaram com 2, 7 e 20 pavimentos e isto resultou em uma densidade de 6.949,80 habitantes/ha, a terceira densidade mais baixa, dentre os modelos estudados (Quadro 9).

Quadro 9 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R7; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R7; c) Vista dos modelos M13_S/EN_SE_R7_SPI e M30_S/EN_LE_R7_SPI; d) Vista dos modelos M14_S/EN_SE_R7_PI e M31_S/EN_LE_R7_PI.



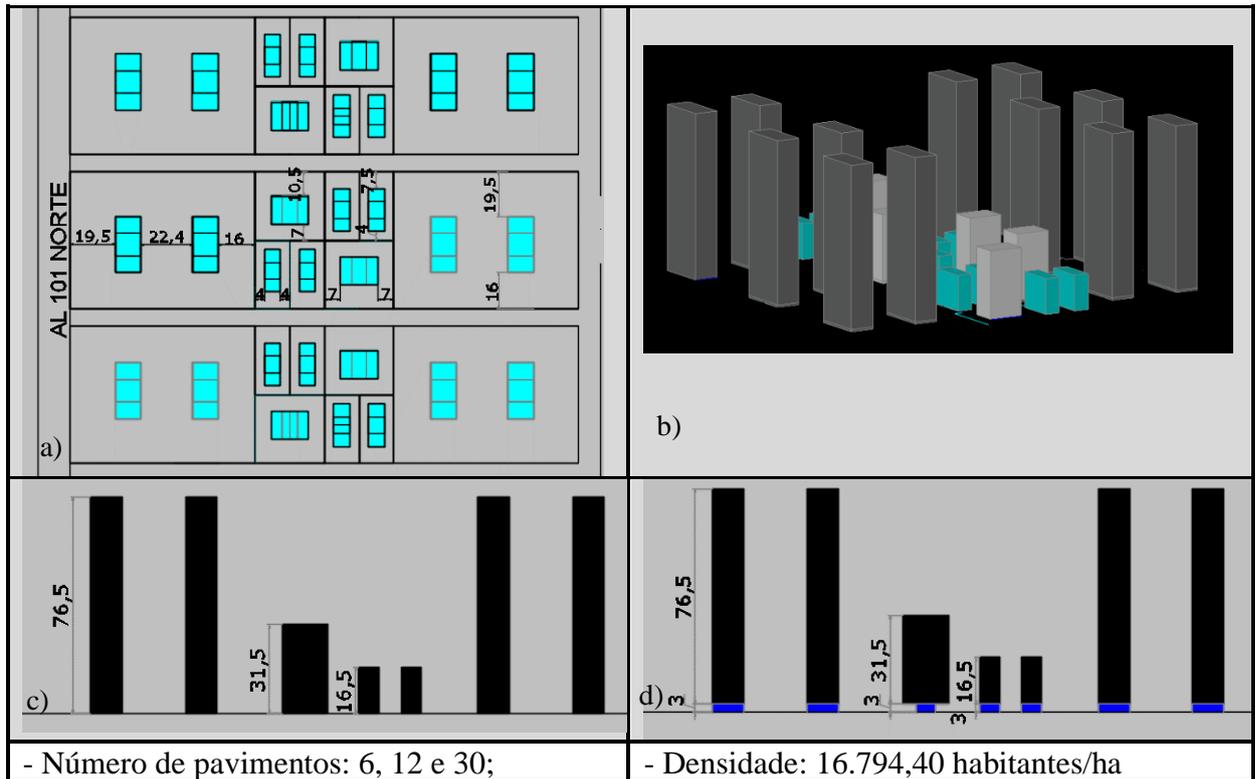
Fonte: Autora (2019).

4.6.8 Modelos com recuos R8

Para os modelos M15_S/EN_SE_R8_SPI, M16_S/EN_SE_R8_PI, M32_S/EN_LE_R8_SPI e M33_S/EN_LE_R8_PI, adotou-se os recuos R8 que apresentaram acréscimo de 5% no recuo final.

Esses cenários apresentam a geometria mais longelínea, dentre os estudados, com alturas de 16,5 m, 31,5 m e 76,5 m. Para isso, utilizou-se edifícios de 6, 12 e 30 pavimentos, que totalizaram 2016 apartamentos. Além disso, a opção em se trabalhar com blocos mais altos contribuiu para o aumento dos afastamentos entre os edifícios (Quadro 10).

Quadro 10 - a) Planta baixa dos modelos com recuos R8; b) Representação em perspectivas dos modelos com recuos R8; c) Vista dos modelos M15_S/EN_SE_R8_SPI e M32_S/EN_LE_R8_SPI; d) Vista dos modelos M16_S/EN_SE_R8_PI e M33_S/EN_LE_R8_PI.



Fonte: Autora (2019).

Essas características dos modelos resultaram em uma densidade de 16.794,40 habitantes/ha, a maior dentre os cenários estudados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

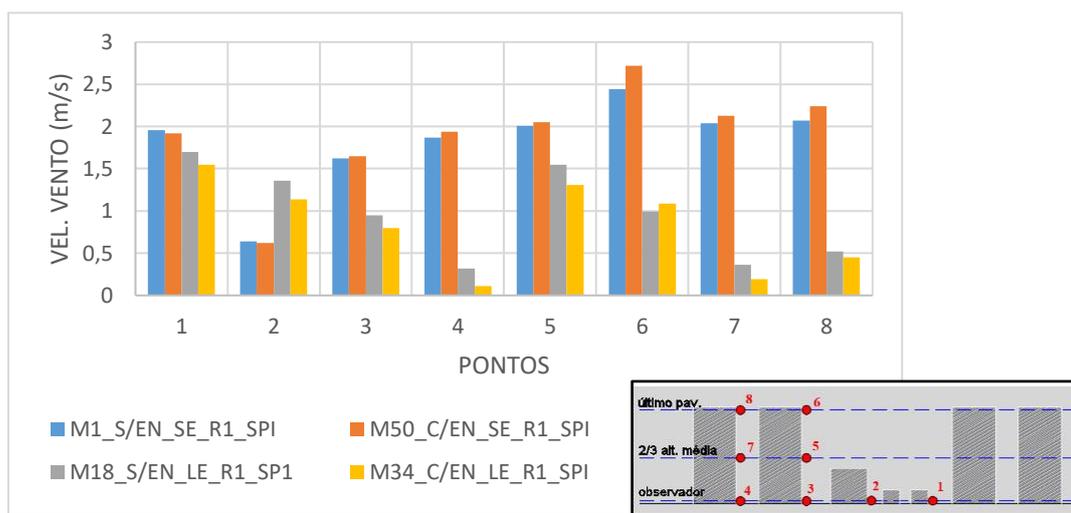
As configurações urbanas investigadas promoveram padrões de ventilação natural em alguns casos diferenciados entre si, e em outros, não. O comportamento do vento em contato com os obstáculos selecionados foi alterado, resultando em efeitos aerodinâmicos específicos, que ora ratificam as proposições encontradas na literatura e ora abrem a discussão para novas conclusões.

Como já mencionado na seção 4.1, inicialmente foi investigado o efeito da topografia visando compreender o comportamento do vento frente a presença de encostas localizadas a sotavento de arranjos construtivos.

Contudo, os resultados demonstraram que para o tipo de situação analisada, o grau de interferência não foi significativo no escoamento do vento por entre os edifícios, podendo em alguns pontos do arranjo construtivo diminuir e em outros aumentar a velocidade do vento em relação aos modelos sem encosta. Ou seja, os dados resultantes apresentaram-se com variações que não se permitiu estabelecer uma lógica entre as condições com e sem encosta, e por esta razão essa variável foi desconsiderada para as demais análises.

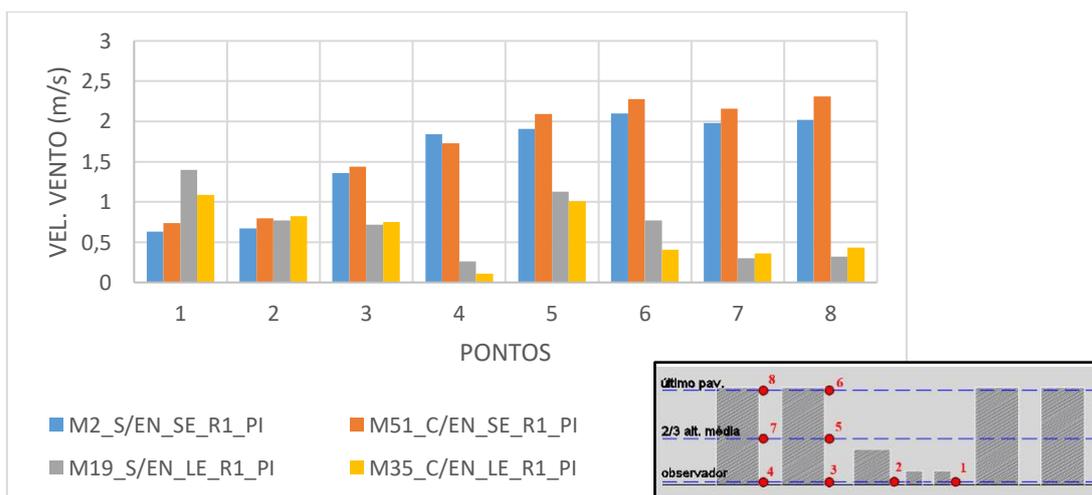
A título de exemplificação ao que foi dito, verifica-se nos gráficos das figuras 64 e 65 que para os modelos sem pilotis, com recuo R1 (modelos M1, M50, M18 e M34) a existência da encosta praticamente não influenciou no comportamento do vento, o que se nota é que a alteração nesse comportamento foi influenciada pela orientação do vento. O mesmo ocorreu nos modelos com a presença do pilotis (modelos M2, M51, M19 e M35), em que as maiores velocidades foram registradas nos modelos sob a incidência do vento sudeste (modelos M2 e M51).

Figura 64 - Velocidades do vento (m/s). Com encosta x Sem encosta – M1, M50, M18 e M34 (arranjos sem pilotis)



Fonte: Autora (2019).

Figura 65 - Velocidades do vento (m/s). Com encosta x Sem encosta – M2, M51, M19 e M35 (arranjos com pilotis).



Fonte: Autora (2019).

Dessa forma, a topografia representada não promoveu uma mudança significativa da direção do vento local e nem ocasionou uma alteração expressiva na sua velocidade. Acredita-se que isso se deve ao fato da encosta apresentar apenas uma suave inclinação e localizar-se a sotavento do arranjo construtivo. Leite (2015) afirma que para as equações de escoamento de

fluidos, o efeito dos obstáculos situados a montante é muito mais significativo do que os localizados a jusante.

Vale ainda salientar que nas simulações realizadas não foram consideradas as trocas térmicas entre os elementos que compõem os arranjos, e por esta razão não foi possível verificar fluxos induzidos termicamente a partir de diferenças de temperatura entre as superfícies e o ar ambiente, nem tampouco processos de convecção natural, o que a rigor não seriam tão significativos uma vez que o estudo desta tese foi considerado para uma região que apresenta ventos dominantes de alta intensidade ao longo do ano, e como citado no item 2.3.2, tais fenômenos são mais presentes em regiões com a ausência ou pequena intensidade de vento.

Diante do exposto, os resultados das simulações dos modelos que continham a superfície de encosta foram descartados para as análises que seguem.

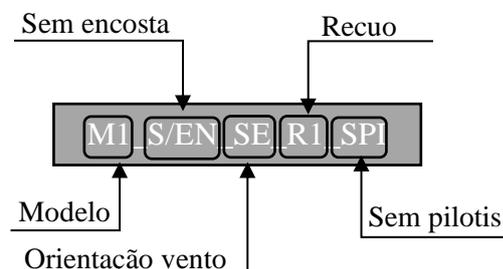
Com o propósito de melhor organizar e tornar a leitura mais clara, os resultados obtidos nas simulações foram divididos em quatro seções (de acordo com a presença ou não do pilotis e com a incidência do vento a 90° ou 135°) que se subdividem, de forma a analisar também as diferenças de C_p a partir da pressão incidente onde supostamente estariam localizados os centros das janelas a barlavento e a sotavento dos edifícios que compõem os arranjos. Esses dados de velocidades e de ΔC_p resultantes das simulações podem ser verificados nas tabelas que constam no Apêndice A e B.

Como já foi dito na seção 4.1.1, para as análises foram considerados os resultados em quatro pontos do arranjo (Figura 54) e em três alturas distintas: altura do observador no pilotis (1,50m); a 2/3 da altura média dos edifícios que compõem o arranjo; e na altura do centro da janela do último pavimento, de maneira a compreender os efeitos aerodinâmicos nas alturas específicas que resultam nos campos de pressão incidentes sobre as fachadas (Figura 55).

Quanto aos parâmetros investigados na tese, foram estabelecidas sete propostas para os recuos progressivos, além dos recuos estabelecidos na legislação vigente, para que se pudesse avaliar seus impactos na ventilação urbana, associados aos outros parâmetros. Estes 8 recuos foram analisados conjuntamente dentro das quatro grandes seções, a fim de comparar os resultados obtidos.

Sendo assim, os recuos progressivos propostos associados às variáveis pilotis e orientação do vento, deram significado as seguintes respostas:

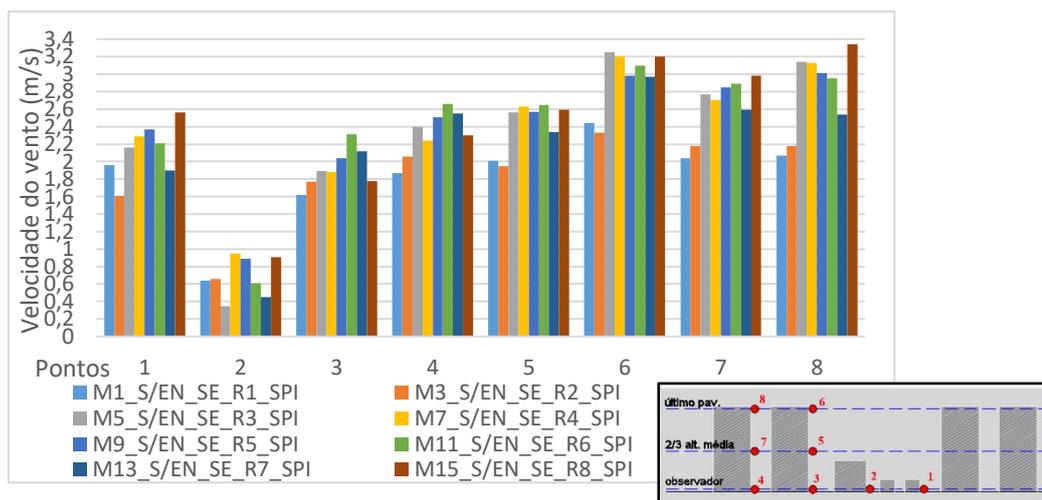
5.1 Modelos sem pilotis e vento a 135° (SUDESTE)



Ao analisar os cenários urbanos compostos por edifícios sem pilotis e com incidência do vento a 135°, consegue-se identificar que os modelos que apresentaram as velocidades mais baixas foram os com recuo R1 – modelo 01 (estabelecidos de acordo com os recuos do código de urbanismo e edificações de Maceió) e com o recuo R2 – modelo 03 (com acréscimo de 25% apenas nos recuos mínimos laterais e posterior). Esses cenários, juntamente com o modelo 05 com recuo R3 (com acréscimo de 25% todos os recuos mínimos) registraram principalmente as menores velocidades nos pontos localizados a 1,5 m do solo (pontos 1, 2, 3 e 4) variando entre 0,35 m/s a 2,4 m/s. Tais resultados evidenciaram o impacto das menores dimensões de recuos na ventilação natural a nível do pedestre (para esta orientação e tipologia de arranjo), uma vez que resultou em um maior adensamento, gerado pela proximidade das construções (Figura 66).

Contrapondo a isto, os modelos 11 e 15, com recuos R6 (com acréscimo de 75% em todos os recuos mínimos) e R8 (acrécimo de 5% no recuo final) foram os que apresentaram as maiores velocidades do vento, com valores entre 0,61 m/s a 3,1 m/s, no modelo 11 e valores de 0,91 m/s a 3,34 m/s, no modelo 15, tendo o primeiro modelo as maiores velocidades nas alturas mais próximas ao solo e o segundo modelo nos pontos mais distantes do solo.

Figura 66: Velocidade do vento (m/s) dos modelos sem pilotis e incidência a 135° (sudeste).



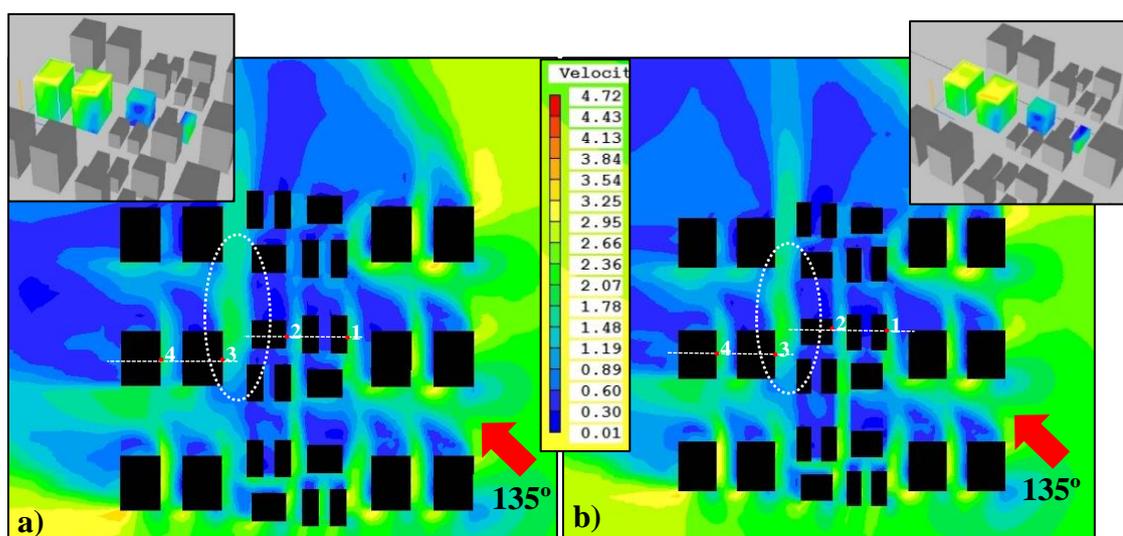
Fonte: Autora (2019).

Acredita-se que o bom desempenho do modelo 11 foi alcançado com a composição do arranjo formado por edifícios com recuos de maior dimensão (acréscimo de 75% no recuo inicial) com variação de alturas que chegaram até 64 m (25 pavimentos). Já no modelo 15, a escolha por blocos mais altos, de até 76 metros (30 andares), favoreceu a formação de maiores afastamentos, e além disso, contribuiu para que a velocidade do vento fosse potencializada.

Na análise geral, verifica-se que no ponto 2 foram registradas as menores velocidades do vento entre 0,35 m/s a 0,95 m/s (Figuras 66 e 67). Este ponto está localizado na parte central do arranjo, a 1,5 m do solo, junto à fachada do bloco de altura intermediária, cuja sombra de vento dos blocos à sua frente incide sobre ele, devido à orientação do vento e aos menores afastamentos entre eles. Tais características resultaram na perda de energia cinética durante o escoamento do vento, pela fricção com as fachadas dos edifícios vizinhos (Figura 67).

Os campos de cores permitiram verificar a semelhança na intensidade e no comportamento do vento por entre os blocos dos modelos M1_S/EN_SE_R1_SPI e M3_S/EN_SE_R2_SPI, com destaque para o corredor de vento que se formou entre os módulos centrais e os mais altos, onde estavam localizados os pontos 3, 5 e 6 (as três diferentes alturas), que deram como respostas velocidades do vento de 1,62 m/s, 2,01 m/s e 2,44 m/s no modelo 01 e de 1,77 m/s, 1,95 m/s e 2,33 m/s no modelo 3. Além disso, verificasse a formação de grandes esteiras de vento em todo o arranjo, cujas velocidades situaram a baixo de 0,70m/s (Figura 67).

Figura 67 - a) velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M1; b) velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M3.



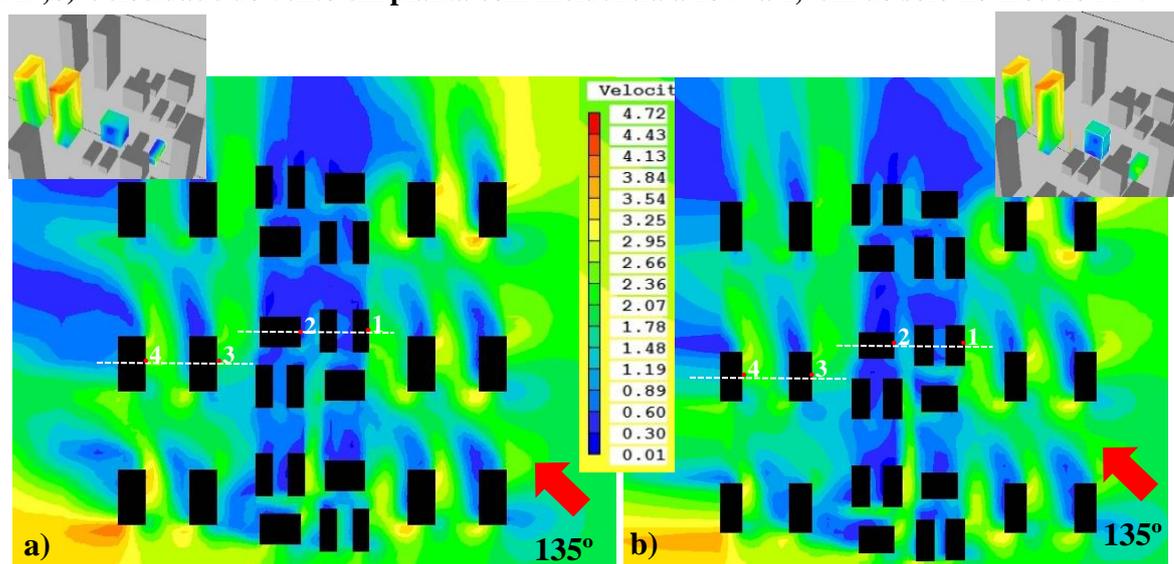
Fonte: Autora (2019).

Destaca-se ainda a semelhança entre os resultados dos modelos com acréscimo de 25% no recuo mínimo inicial frontal (modelo M5_S/EN_SE_R3_SPI) e com acréscimo de 25% em todos os recuos (modelo M7_S/EN_SE_R4_SPI). Ambos apresentaram velocidades médias do ar entre 10% a 52% superiores ao modelo M1, exceto no ponto 2, e bastante semelhantes entre si. Nota-se nas imagens dos campos de cores a 1,5 m do solo que as sombras de ventos foram bem mais reduzidas, do que nos casos anteriores e que ficaram mais concentradas na parte central do arranjo (Figura 68). Ou seja, a parte central sofreu uma estagnação do vento com baixas velocidades, que foram registradas principalmente no ponto 2, ao passo que, nos maiores afastamentos houve uma melhor permeabilidade, influenciada inclusive pelos efeitos de esquina, que contribuíram para a aceleração do ar em algumas esquinas dos blocos, e que foi percebida gradativamente nos pontos 3, 4, 5, 6, 7 e 8, de acordo

com a sua altura em relação ao solo, como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 66.

Esses dois modelos apresentaram diferenças em suas velocidade do vento de apenas 0,01 m/s a 0,16 m/s em sete dos 8 pontos, e uma diferença de 0,60 m/s apenas no ponto 2 para mais no modelo 07, conforme pode ser verificado nas Figuras 66 e 68.

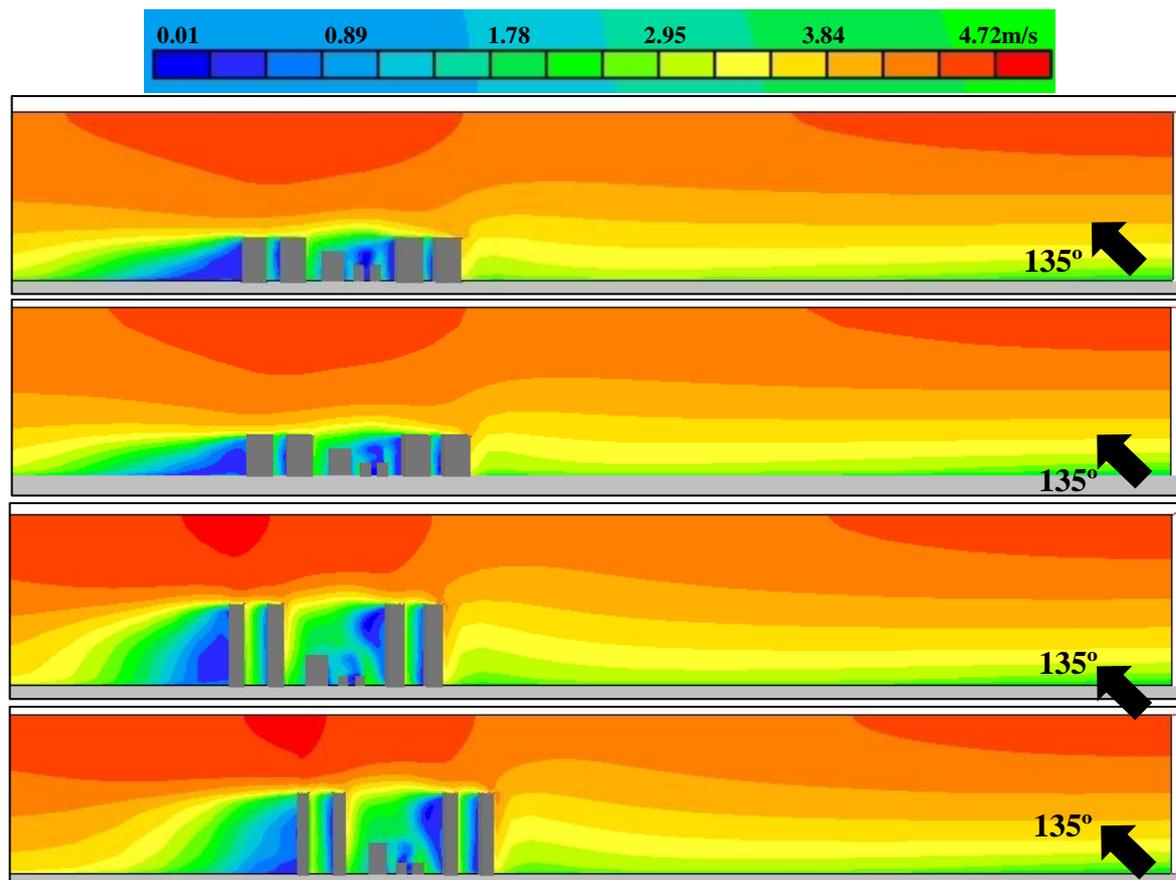
Figura 68 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° à 1,50m do solo no modelo M5; b) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° à 1,50m do solo no modelo M7.



Fonte: Autora (2019).

Nos perfis verticais de velocidade do vento é possível perceber na camada do dossel urbano que são encontrados trechos com velocidades de vento mais altas do que em outros, o que indica um possível potencial no uso da ventilação natural para resfriamento nas edificações, conforme pode ser observado na Figura 6

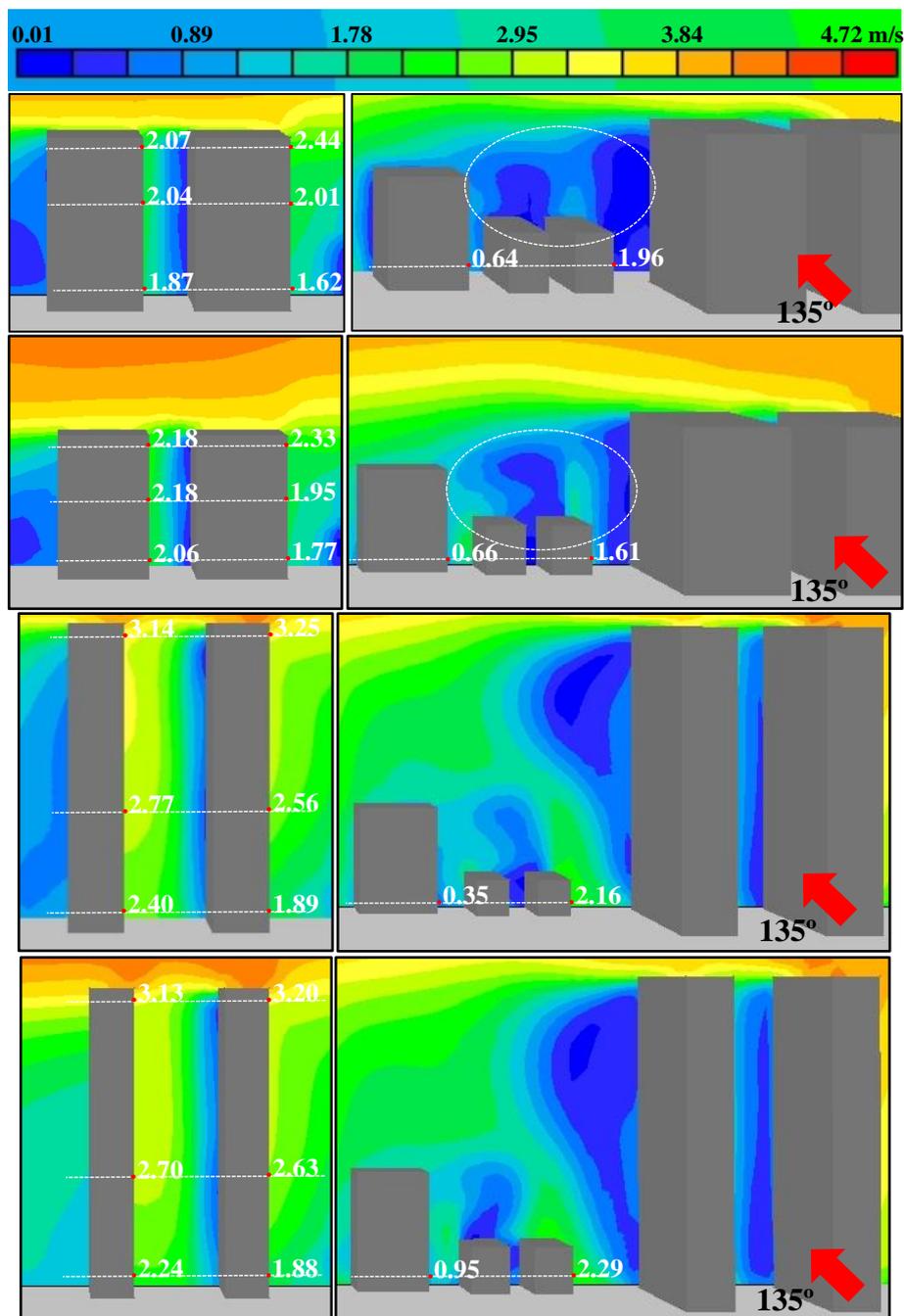
Figura 69 - Perfil vertical de velocidade do vento modelos M1_S/EN_SE_R1_SPI, M3_S/EN_SE_R2_SPI, M5_S/EN_SE_R3_SPI e M7_S/EN_SE_R4_SPI, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

No entanto, as seções verticais permitem identificar a pequena permeabilidade do vento nos modelos M1 e M3, junto aos edifícios de menor altura e de altura intermediária, identificada pelos tons azuis escuros. Já nos modelos M5 e M7, a partir dos tons verdes, observou-se que seus recuos associados à edifícios de maior altura, contribuíram para uma melhor penetração do vento por entre os edifícios, com velocidades de até 2,29 m/s (Figura 70). Para Gandemer (1978) *apud* Sousa, (2014), quanto mais alto é o edifício, maior é a diferença de pressão e, por isso, maior é a velocidade do vento ao nível do pedestre a barlavento (Figura 70).

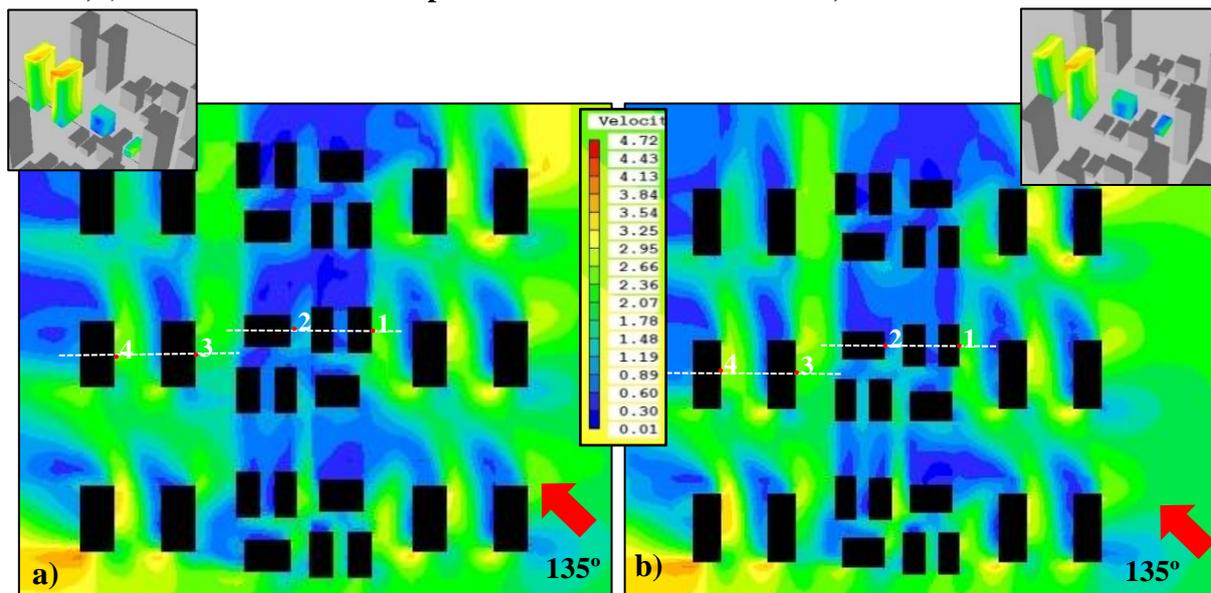
Figura 70 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M1_S/EN_SE_R1_SPI, M3_S/EN_SE_R2_SPI, M5_S/EN_SE_R3_SPI e M7_S/EN_SE_R4_SPI, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

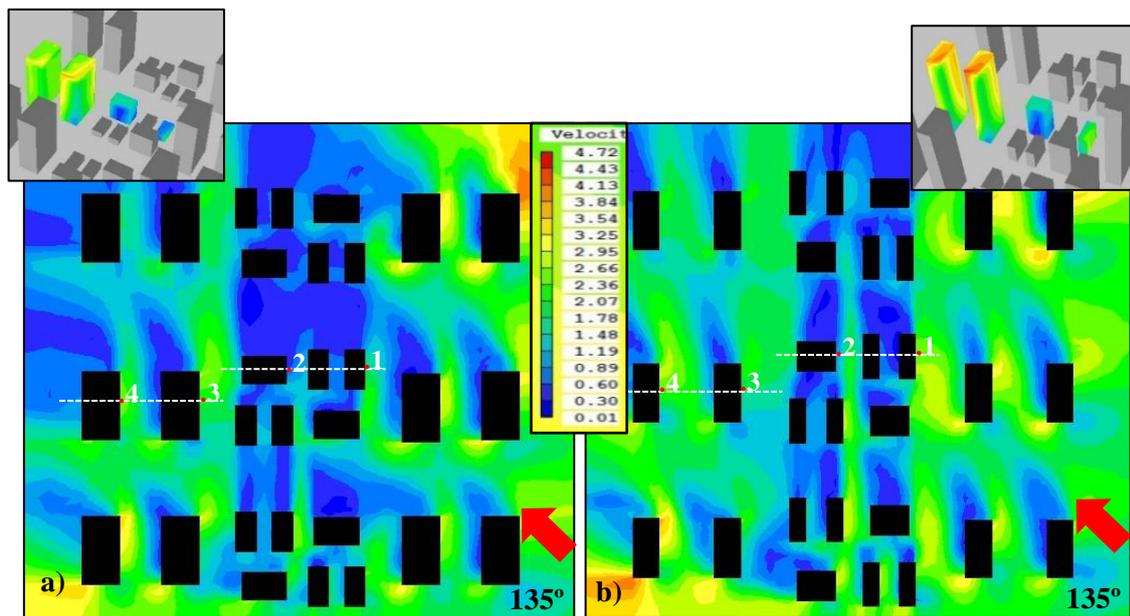
As imagens com manchas de cores reforçam que os cenários com maiores recuos, a exemplo dos modelos M9_S/EN_SE_R5_SPI, M11_S/EN_SE_R6_SPI e M13_S/EN_SE_R7_SPI, favoreceram um melhor escoamento e maiores velocidades do vento. Contudo, a região central do arranjo se manteve com baixas velocidades do ar (entre 0,45 m/s a 0,91 m/s no ponto 2), justamente onde se localizam os edifícios mais baixos e de menores afastamentos, como pode ser observado nas Figuras 71 e 72.

Figura 71 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M9;b) velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M11.



Fonte: Autora (2019).

Figura 72 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M13;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M15.



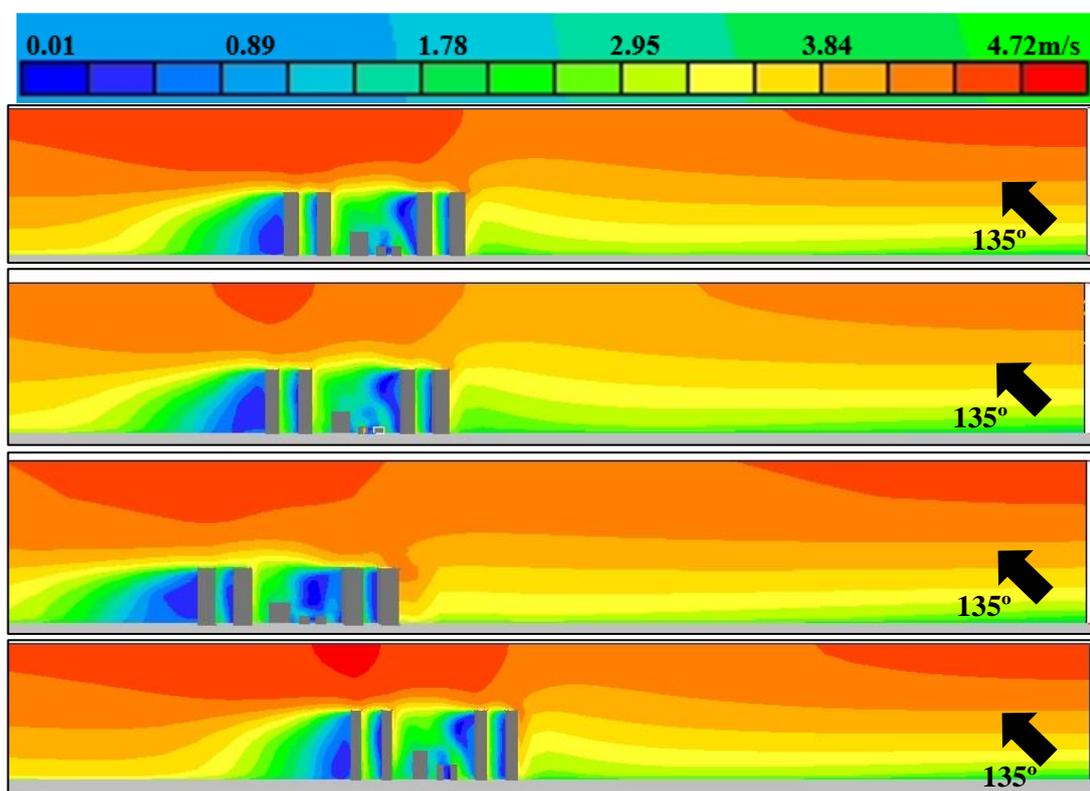
Fonte: Autora (2019).

O modelo 15 foi pensado para representar um arranjo com maiores alturas de seus edifícios, de até 76 m (30 pavimentos). Com isso, observou-se que o modelo apresentou na parte central zonas de estagnação do ar mais rarefeitas e que entre os edifícios mais altos ocorreu uma maior permeabilidade do vento, com a ocorrência de efeitos de esquinas, como se observa nas manchas amarelas, e da canalização do fluxo que resultaram em uma maior

aceleração da velocidade (Figura 72). Tais fenômenos aerodinâmicos resultaram nos valores mais altos de velocidade do ar nos pontos 7 e 8, como pode ser identificado no gráfico que representa a Figura 66.

Os modelos M9, M11, M13 e M15 apresentaram perfis que demonstram uma maior penetração do vento na camada do dossel urbano, resultando em maiores velocidades nos pontos mais distantes do solo, como mostrado na Figura 73. Isso seria um indicativo do potencial para o uso da ventilação natural.

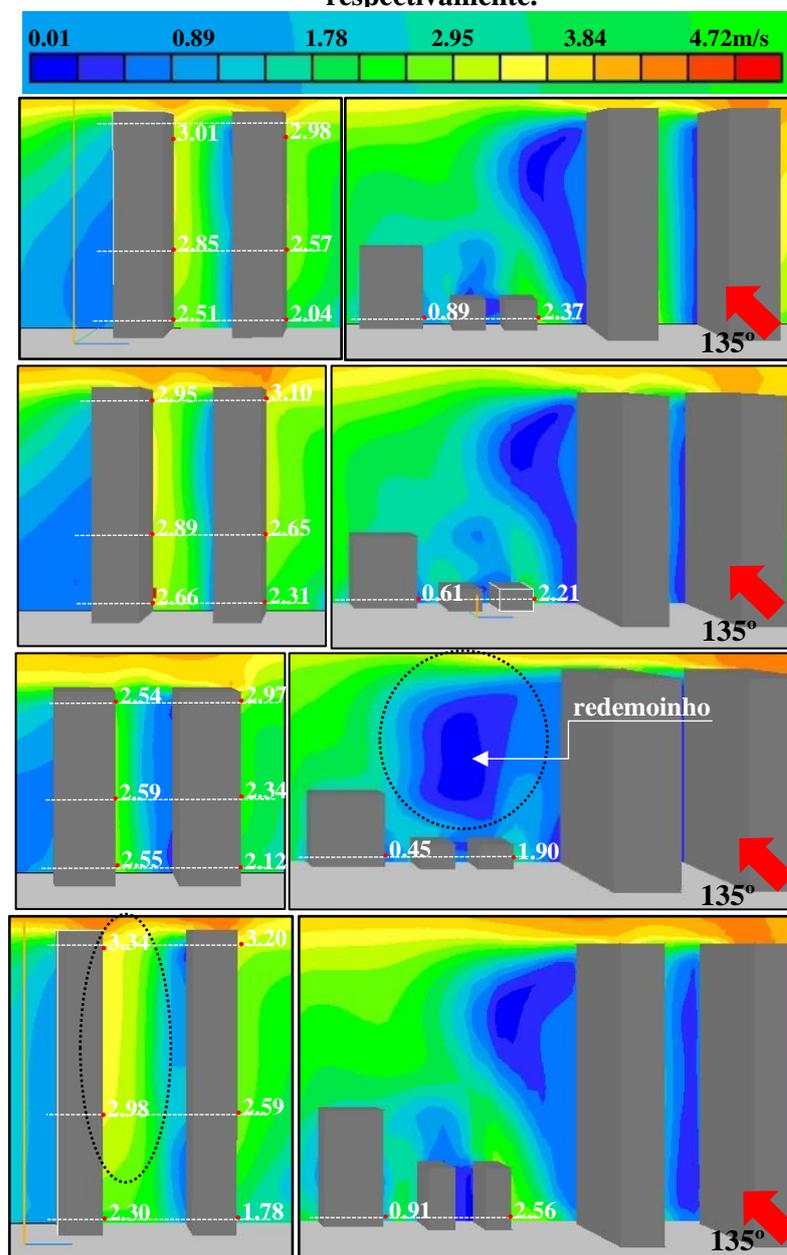
Figura 73 - Perfil vertical de velocidade do vento modelos M9_S/EN_SE_R5_SPI, M11_S/EN_SE_R6_SPI, M13_S/EN_SE_R7_SPI e M15_S/EN_SE_R8_SPI, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

As seções verticais ratificam o que já foi descrito anteriormente. Pode-se ainda perceber manchas mais claras junto ao ponto 1 e que no modelo M13, nos edifícios altos com 20 pavimentos, por apresentarem blocos menos delgados, foi intensificada a indução do ar de circular na forma de redemoinho na parte posterior ao edifício, devido à união de zonas de pressão distintas e à própria ação turbulenta do vento. Estes edifícios geraram maiores sombras de vento, reduzindo assim a velocidade nos pontos 1 e 2, que registraram 1,9 m/s e 0,45 m/s, respectivamente (Figura 74).

Figura 74 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M9_S/EN_SE_R5_SPI, M11_S/EN_SE_R6_SPI, M13_S/EN_SE_R7_SPI e M15_S/EN_SE_R8_SPI, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

Percebe-se ainda a mancha de cor bem mais clara proveniente de fluxos descendentes e da canalização do vento, onde estariam localizados os pontos 7 e 8 mais distantes do solo, especialmente no modelo 15, com velocidades de 2,98 m/s e 3,34 m/s, respectivamente (Figura 74).

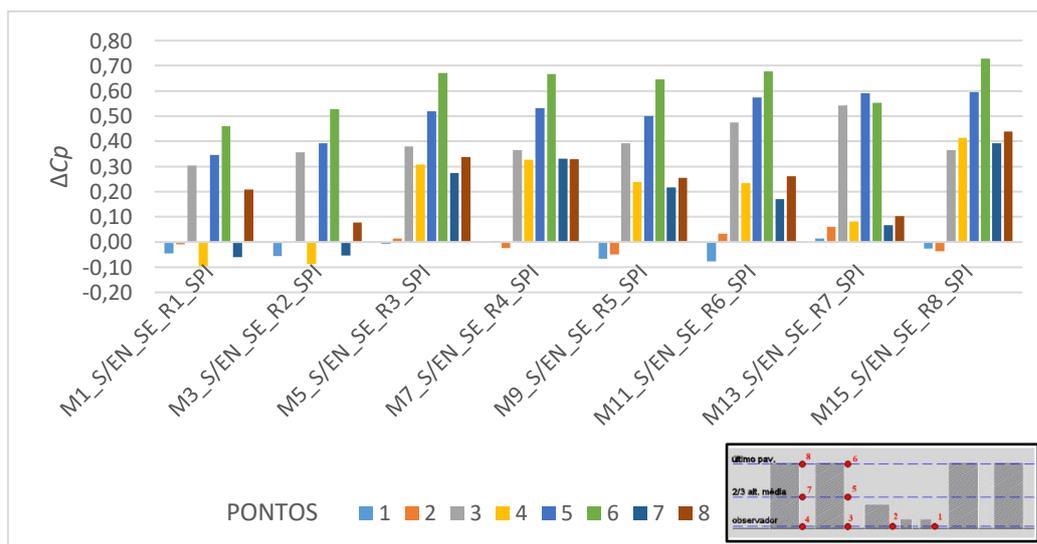
5.1.1 Análise dos coeficientes de pressão (C_p) nos modelos sem pilotis e com incidência a 135° (sudeste).

Como já mencionado no item 4.3, as diferenças de coeficientes de pressões (ΔCP) entre as fachadas a barlavento e a sotavento correspondem a um dos principais indicativos do potencial do uso da ventilação natural para o resfriamento das edificações.

Para os cenários propostos nas simulações, considerou-se edifícios selados, ou seja, desconsiderando a porosidade das janelas nas fachadas. Porém para o cálculo dos CP s, foi estimado a localização das aberturas a barlavento (que correspondem aos pontos 01 ao 08) e a sotavento (sua localização na fachada imediatamente oposta nos edifícios), com a finalidade de se obter essa estimativa do potencial de ventilação natural nas edificações dos cenários urbanos analisados.

Os resultados para os cenários com edifícios sem pilotis e com vento a 135° constam no gráfico apresentado na Figura 75.

Figura 75: ΔCP dos modelos sem pilotis e vento a 135° (sudeste).

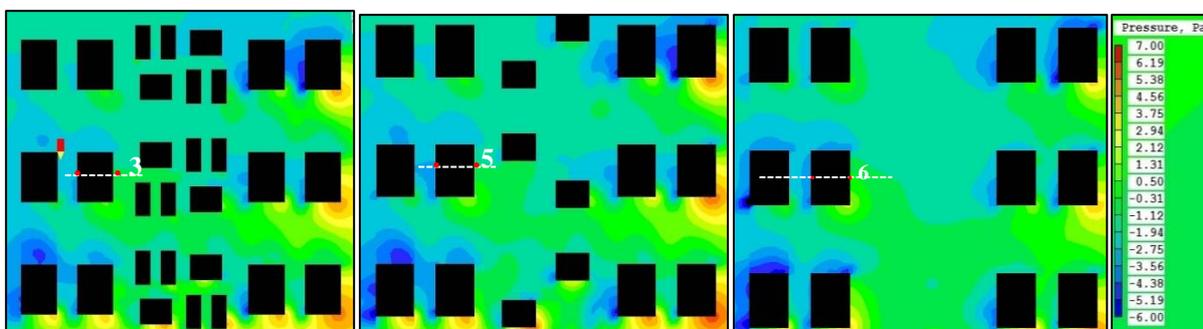


Fonte: Autora (2019).

Como já era previsto, o modelo 01 foi o que apresentou as mais baixas diferenças de C_p entre os pontos escolhidos nas suas fachadas, o que ratifica o baixo potencial para a utilização da ventilação natural na direção sudeste para este tipo de cenário, como estratégia de resfriamento passivo. Os obstáculos formados pelos edifícios a frente dos pontos analisados contribuíram para que os ventos alcançassem as fachadas com pressões negativas

(Figura 76). Os campos com maiores diferenças de pressões (ΔCP) foram registrados junto aos pontos 3, 5 e 6, justamente onde ocorreu efeitos de canalização do vento ao longo da via, que pôde ser verificado na Figura 67. Nos demais pontos se observou pequenas diferenças de C_p , como indica o gráfico da Figura 75.

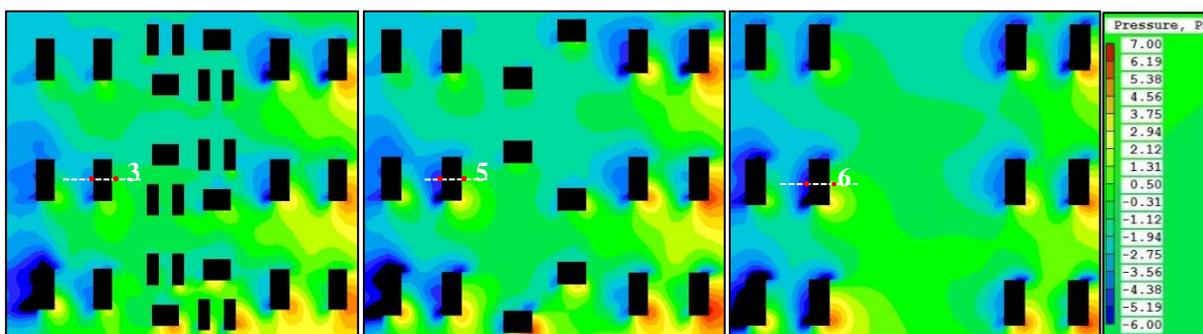
Figura 76 - Visualização dos campos de pressão em planta com incidência a 135° à 1,50 m / 16,5 m (2/3 da altura média dos edifícios) / 36,5 m do solo no modelo M1_S/EN_SE_R1_SPL.



Fonte: Autora (2019).

135°

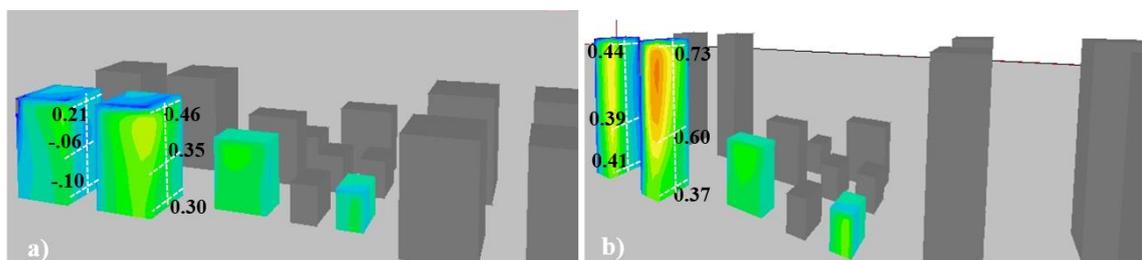
Figura 77 - Visualização dos campos de pressão em planta com incidência a 135° a 1,50 m / 22.4 m (2/3 da altura média dos edifícios) / 74 m do solo no modelo M15_S/EN_SE_R8_SPL.



Fonte: Autora (2019).

135°

Figura 78 - Indicação do ΔC_p nos pontos de interesse 3, 5, 6 e 4, 7, 8 - modelo M1. b) Indicação do ΔC_p nos pontos de interesse 3, 5, 6, e 4, 7, 8 - modelo M15.



Fonte: Autora (2019).

Nota-se que todos os modelos registraram suas maiores diferenças de pressões nos pontos 3, 5 e 6, todos localizados nos corredores de vento, onde o escoamento do fluxo ocorreu de forma menos turbulenta, devido à composição do arranjo de edifícios de alturas variadas (Figura 78). Verifica-se ainda que as zonas de maior pressão estavam situadas mais distantes do solo.

Dentre os oito arranjos urbanos avaliados, ao considerar edifícios sem pilotis, com orientação do vento a sudeste, o modelo M15_S/EN_SE_R8_SPI foi o que apresentou as maiores diferenças de C_p , principalmente na altura intermediária e mais distante do solo (Figuras 77 e 78). A 1,5 m do solo por sua vez, o cenário que apresentou as maiores diferenças de C_p foi o M13_S/EN_SE_R7_SPI, que foi dimensionado com o acréscimo de 100% em todos os recuos mínimos iniciais. Isto indica serem estes os cenários com maior potencial para o uso da ventilação natural como estratégia para o resfriamento dos edifícios (Figura 75).

Um outro aspecto que merece ser destacado é que o modelo M15, que apresenta um arranjo mais verticalizado, registrou maiores magnitudes do ΔC_p nos pontos 4, 7 e 8, em relação aos demais cenários. Acredita-se que tal fato foi consequência do fluxo de ar descendente associado à canalização do vento promovido pela via secundária, como pode ser visto nas Figuras 75 e 78.

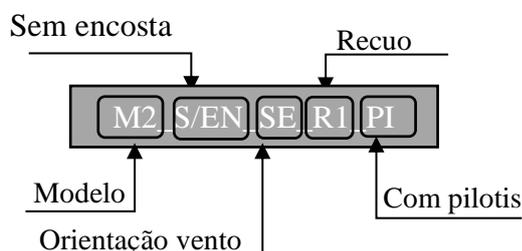
A partir dos resultados alcançados para os modelos sem pilotis e vento a 135° , é possível estabelecer um resumo dos principais resultados, conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Resumo dos principais resultados. Modelos sem Pilotis e vento a 135°.

Mod	Característica	Resultado	Discussão
M1	R1 / sem pilotis / 135°	Menores velocidades a 1,5m do solo (pontos 1, 2, 3 e 4) – 0,35 m/s a 2,4 m/s.	Menores afastamentos e maior adensamento resultaram em menores velocidades do vento ao nível do pedestre (para esta orientação e tipologia de arranjo).
M3	R2 / sem pilotis / 135°		
M5	R3 / sem pilotis / 135°		
M11	R6 / sem pilotis / 135°	Maiores velocidades mais próximo ao solo – 0,61 m/s a 3,1 m/s.	Edifícios com recuos de maior dimensão (acréscimo de 75% no recuo inicial), com variação de alturas que chegaram até 64 m (25 pavimentos).
M15	R8/ sem pilotis / 135°	Maiores velocidades mais distante ao solo – 0,91 m/s a 3,34 m/s.	Blocos mais altos, de até 76 metros (30 andares) e conseqüentemente a formação de maiores afastamentos.
M1	R1 / sem pilotis / 135°	Menores diferenças de <i>CP</i> , (-0,06 a 0,46).	Obstáculos formados pelos edifícios à frente dos pontos analisados contribuíram para que os ventos alcançassem as fachadas com pressões mais baixas.
M13	R7 / sem pilotis / 135°	Maiores diferenças de <i>CP</i> , à 1,5m do solo (0,02 a 0,54).	Cenários com maior potencial para o uso da ventilação natural como estratégia para o resfriamento dos edifícios.
M15	R8 / sem pilotis / 135°	Maiores diferenças de <i>CP</i> , principalmente na altura intermediária e mais distante do solo (0,39 a 0,73).	

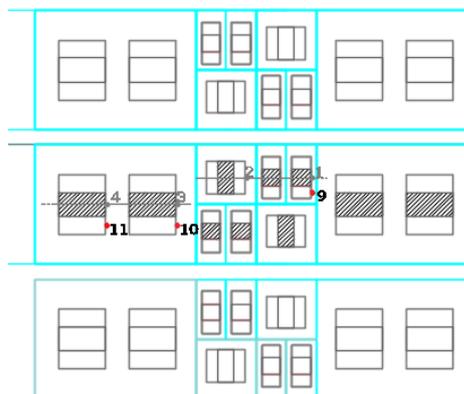
Fonte: Autora (2019).

5.2 Modelos com pilotis e vento a 135° (SUDESTE)



Antes de apresentar as análises do efeito do pilotis para os cenários construídos a partir das propostas de recuos, é necessário ratificar que a parte edificada do pilotis foi dimensionada como um volume fechado de área de construção de 40% da lâmina de projeção do prédio (a partir da sua menor largura), localizada no centro da projeção dele. Dessa forma, as seções verticais que interceptaram os pontos 1, 2, 3 e 4 (ambos situados a 1,50 m do solo e no eixo das fachadas) localizaram-se nas posições mais desfavoráveis dos pilotis, ao seccionar a sua massa como também a do edifício. Na tentativa de também avaliar o efeito do pilotis para a ventilação na sua área não edificada, adicionou-se mais um ponto em três dos edifícios avaliados sendo estes os pontos 9, 10 e 11, conforme pode ser observado na representação em planta da Figura 79.

Figura 79 - Pontos extras para análise do pilotis a 1,5 m do solo.

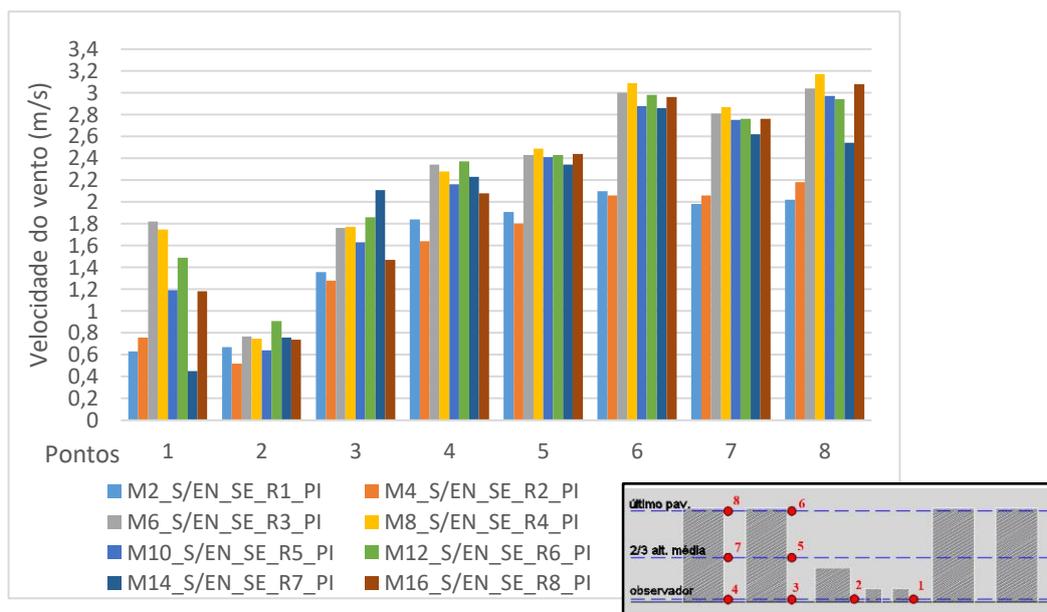


Fonte: Autora (2019).

Os valores de velocidades do ar registrados nesses pontos extras foram considerados para efeito de comparação com os outros resultados encontrados nos pontos 1, 3 e 4, pelo fato de possivelmente melhor expressar a realidade do comportamento do vento ao penetrar trechos de uma malha urbana menos desobstruída.

O gráfico apresentado na Figura 80 demonstra que o modelo M4_S/EN_SE_R2_PI apresentou as menores velocidades do vento dentre os cenários que continham edifícios com pilotis e com incidência a 135°. Seus piores resultados foram registrados principalmente a altura de 1,50 m do solo nos pontos 2, 3 e 4 com velocidades de 0,52 m/s, 1,28 m/s e 1,64 m/s, respectivamente. O acréscimo de 25% no recuo mínimo lateral / posterior apresentou pior desempenho inclusive em relação ao modelo M2, dimensionado a partir dos recuos estabelecidos pelo código de Maceió, exceto nos pontos 7 e 8.

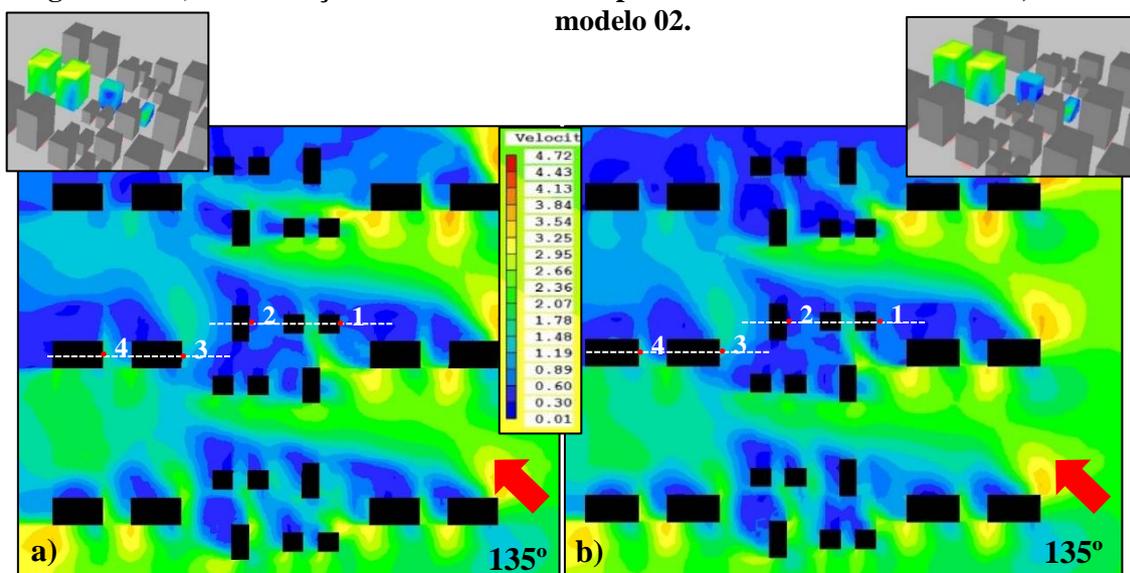
Figura 80 - Velocidade do vento (m/s) dos modelos com pilotis e incidência a 135° (sudeste).



Fonte: Autora (2019).

As diferenciações entre os contornos de velocidades dos modelos M2_S/EN_SE_R1_PI e M4_S/EN_SE_R2_PI foram bastantes sutis. Ambos apresentaram a sotavento dos edifícios, da parte central, áreas de estagnação do ar, cujas velocidades situaram abaixo de 0,79 m/s (Figura 81).

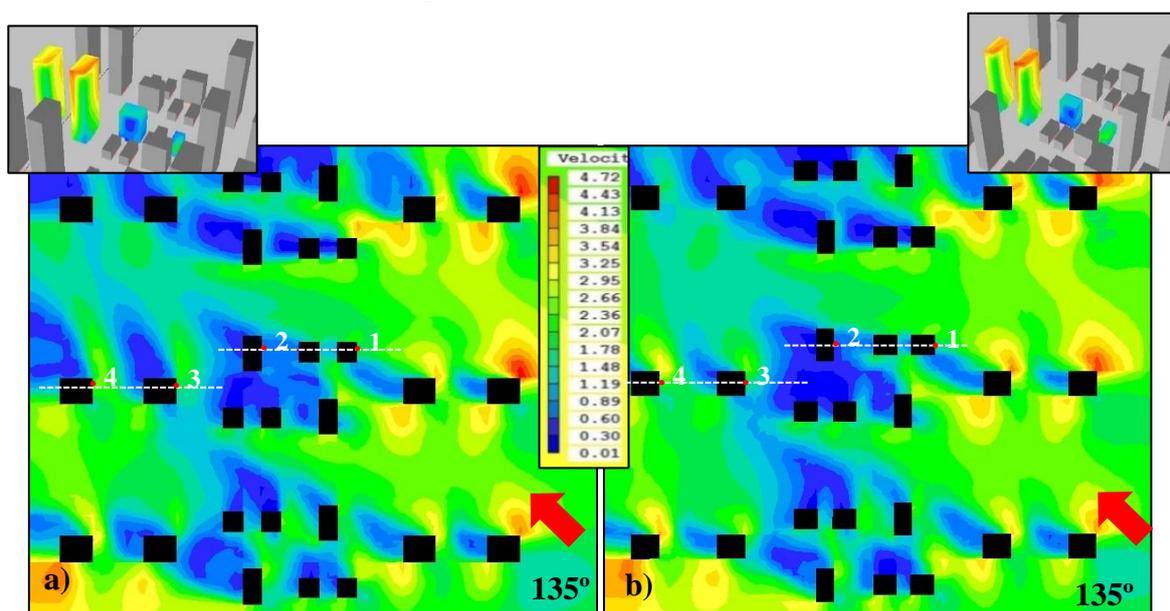
Figura 81 - a) Visualização da vel. do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo 02.



Fonte: Autora (2019).

Nos pontos de medição, observa-se que as sombras de vento apresentaram tons mais escuros de azul no ponto 1 do modelo com recuos R1, com registro de velocidade na ordem de 0,63 m/s. Já no modelo com recuos R2, como já mencionado, as velocidades foram mais baixas nos pontos 2, 3 e 4 (de até 1,28 m/s) com diferenças, em relação ao cenário anterior, de apenas 0,15 m/s, 0,08 m/s e 0,20 m/s, respectivamente (Figura 81).

Figura 82 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° à 1,50m do solo no modelo M6.
b) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50 m do solo no modelo M8.



Fonte: Autora (2019).

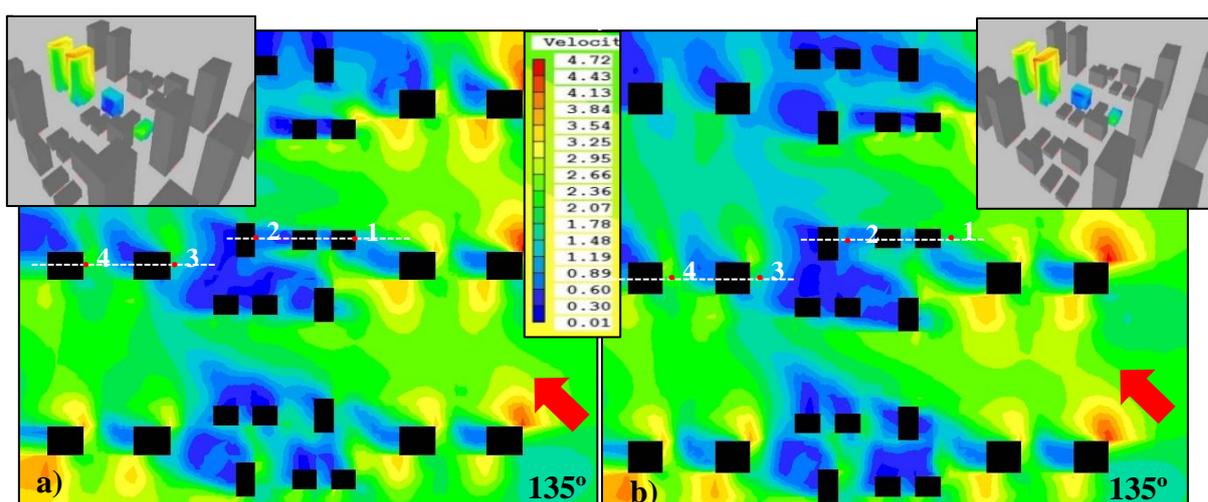
Os recuos R3 e R4 aplicados aos modelos M6 e M8 com pilotis resultaram em uma aceleração significativa das velocidades do vento, em relação ao modelo M2 (com recuos estabelecidos pelo código), especialmente no ponto 1 com um acréscimo de 189% a 178%, respectivamente. Os demais pontos localizados a 1,5 m do solo tiveram um aumento de 12% a 30%. Já os pontos localizados na altura intermediária e no último pavimento obtiveram um acréscimo na velocidade do ar de 27% a 57%, respectivamente (Figura 82).

Os contornos de velocidades dos modelos M6 (com acréscimo de 25% nos recuos mínimos frontais) e 08 (acrécimo de 25% em todos os recuos) indicam que o primeiro cenário apresentou aumento de até 4% nas velocidades do ar a 1,50 m do solo em relação ao segundo cenário (Figura 80). No entanto, nas alturas intermediárias e nos últimos pavimentos, o modelo M8 atingiu, ainda que sutilmente, as maiores velocidades do vento (novamente aumentos de até 4%). O modelo M8 obteve o melhor desempenho nos pontos mais distantes

do solo, inclusive em relação a todos os outros cenários, com velocidades do ar variando de 2,49 m/s a 3,17 m/s, como pode ser observado no gráfico contido na Figura 80.

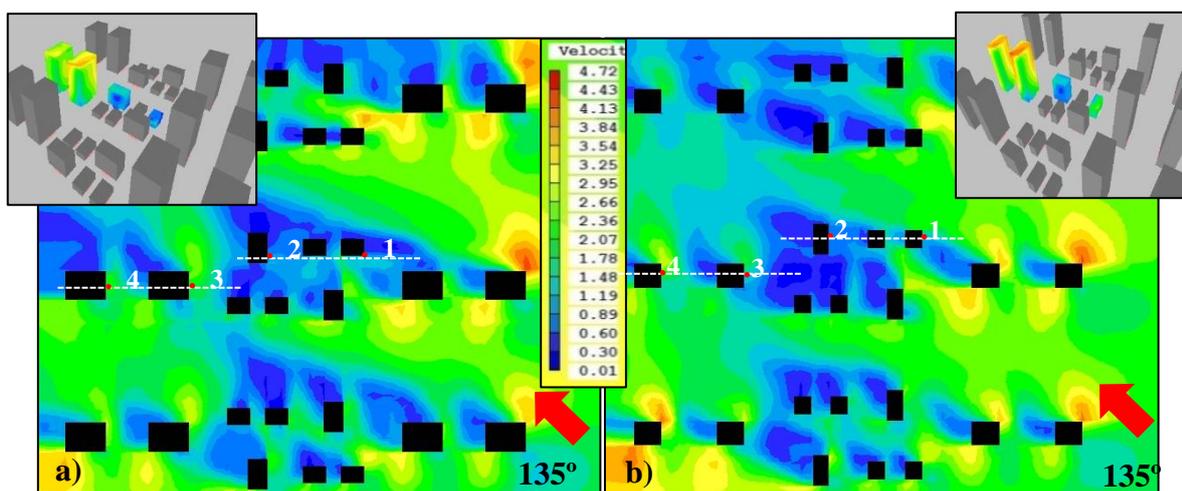
A partir dos contornos de velocidades foi possível verificar que a nível do pedestre as alterações mais significativas no comportamento do fluxo foram encontradas junto aos pontos de medição situados nos edifícios mais altos. Essas alterações no fluxo de ar foram ainda mais evidentes nos modelos M8, M10, M12, M14 e M16, conforme Figuras 82, 83 e 84.

Figura 83 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M10; b) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M12.



Fonte: Autora (2019).

Figura 84 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M14. b) Velocidade do vento em planta com incidência a 135° a 1,50m do solo no modelo M16.



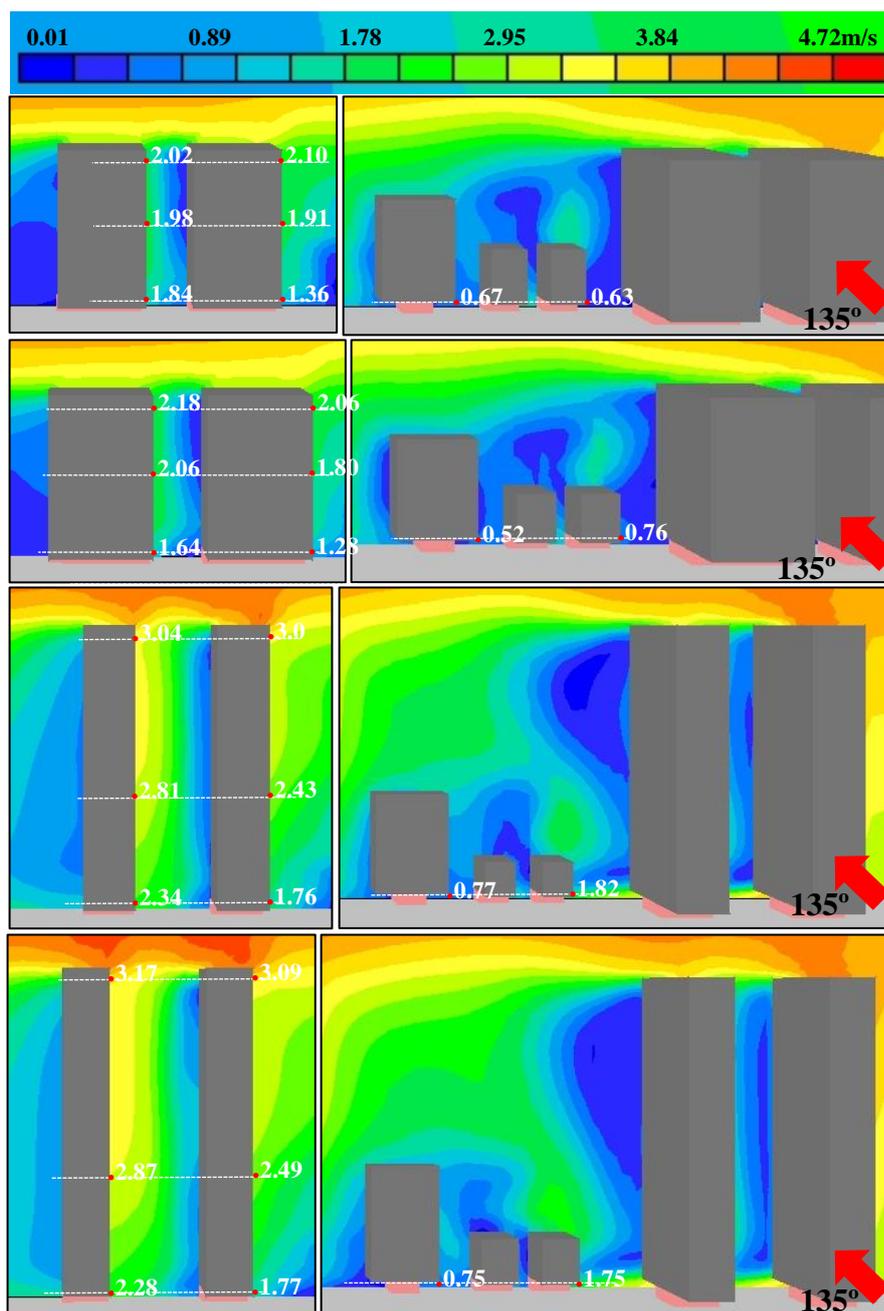
Fonte: Autora (2019).

Dentre os oitos cenários apresentados, observou-se que os modelos M2 e M4, por apresentarem um maior nível de adensamento construtivo, no nível mais próximo ao solo, obtiveram as maiores regiões de vórtices a sotavento dos edifícios, com velocidades entre 0,52 m/s até 1,84 m/s. O reflexo de tais condições de ocupação foi que o modelo M4_S/EN_SE_R2_PI registrou as menores velocidades do vento nos pontos de interesse (Figuras 81 e 85).

O modelo M8_S/EN_SE_R4_PI apresentou as maiores magnitudes do vento. Seu cenário construído a partir da proposta de recuos com acréscimos de 25% em todos os recuos mínimos associada a edifícios de até 30 pavimentos registraram as maiores velocidades do ar, a 2/3 da altura média dos edifícios e no último pavimento, como pode ser visto no gráfico da Figura 80. Tal efeito deve-se ao fato do vento atingir as fachadas nos pontos de interesse sem grandes dificuldades, devido ao fato dos edifícios mais baixos terem 4 e 11 pavimentos, como pode ser visto na seção vertical contida na Figura 85.

Contudo, ao considerarmos apenas os pontos localizados a 1,5 m do solo, observou-se que as maiores velocidades do vento foram registradas nos cenários M12_S/EN_SE_R6_PI e M14_S/EN_SE_R7_PI modelados a partir da proposta de acréscimos de 75% e de 100% em todos os recuos mínimos, respectivamente. Apesar de apresentarem maiores recuos, esses modelos foram construídos com edifícios de 2, 8 e 25 pavimentos e 2, 7 e 20 pavimentos, respectivamente. Isso possivelmente resultou em menores velocidades do ar nos pontos mais distantes do solo, se comparado aos modelos M8 e M16, cujos edifícios mais altos apresentavam 30 pavimentos (Figura 85).

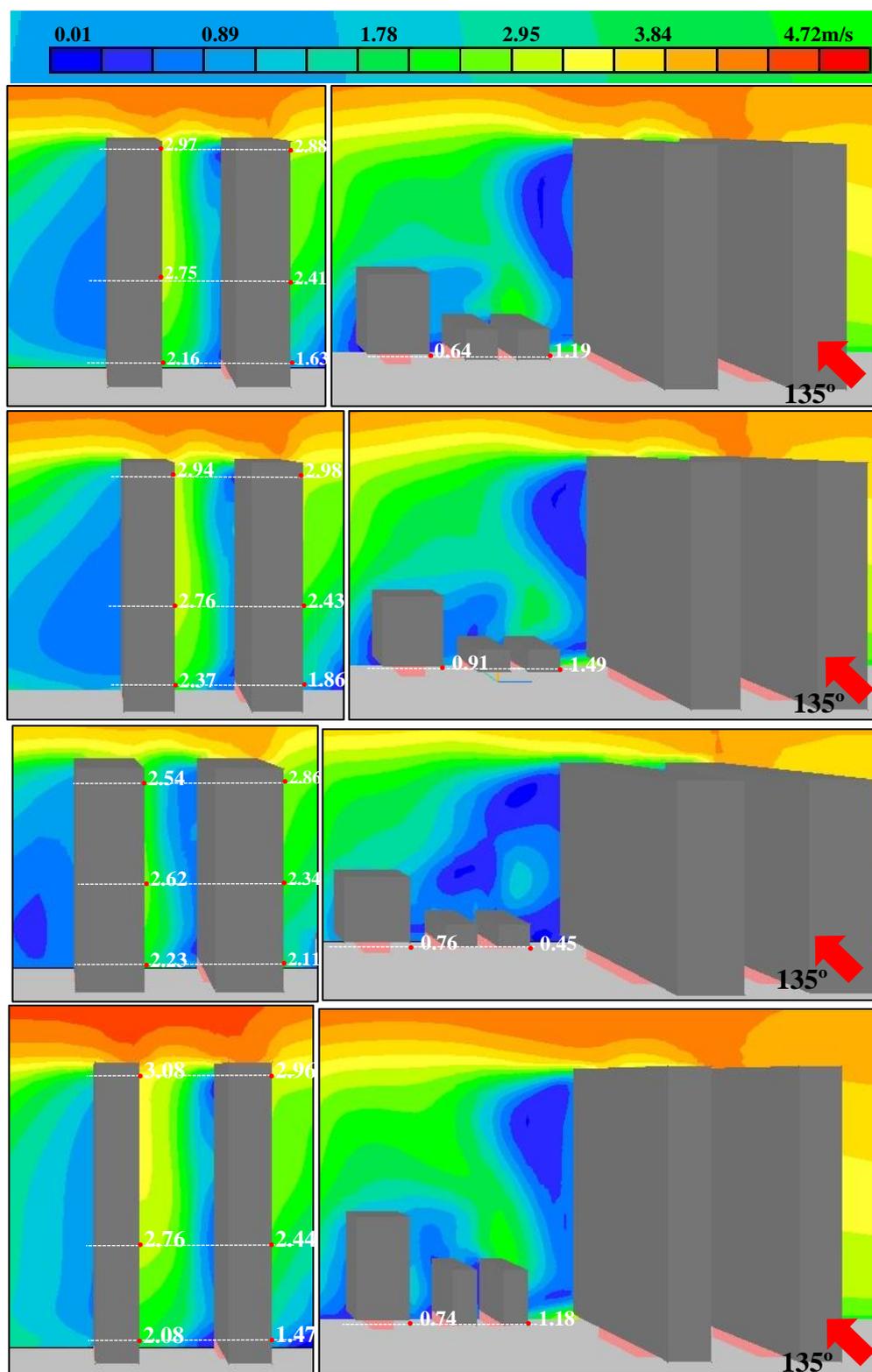
Figura 85 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M2_S/EN_SE_R1_PI, M4_S/E_SEN_R2_PI, M6_S/EN_SE_R3_PI e M8_S/EN_SE_R4_PI,



Fonte: Autora (2019).

A partir das Figuras 85 e 86, nota-se manchas de cores mais claras, indo do verde ao amarelo, o que sugerem maiores velocidades nos pontos das fachadas mais distantes do solo, que vão de 2,43 m/s a 3,17 m/s.

Figura 86 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M10_S/EN_SE_R5_PI, M12_S/EN_SE_R6_PI, M14_S/EN_SE_R7_PI e M16_S/EN_SE_R8_PI, respectivamente.

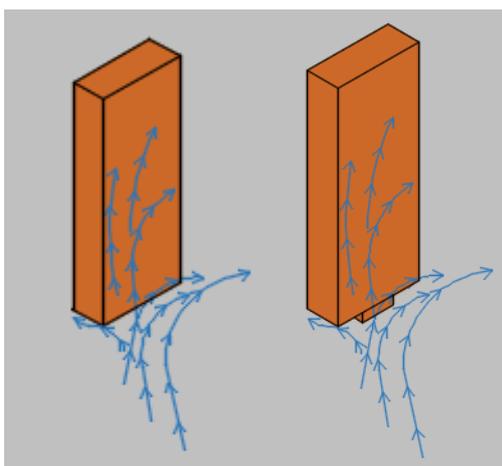


Fonte: Autora (2019).

Analisando comparativamente os modelos com pilotis M12_S/EN_SE_R6_PI e M14_S/EN_SE_R7_PI com os modelos sem pilotis M11_S/EN_SE_R6_SPI e M13_S/EN_SE_R7_SPI, que apresentam em comum os recuos R6 e R7, respectivamente, e proporcionaram as maiores intensidades de vento no nível do pedestre.

Verificou-se que a posição dos pontos, junto as áreas obstruídas dos pilotis resultou em menores velocidades de vento, se comparados aos modelos sem pilotis. O modelo M12 (com pilotis) registrou redução da velocidade de 11% a 33%, em relação ao modelo M11 (sem pilotis). E o modelo M14 sofreu redução de 13% a 76%, em relação ao modelo M13. A exceção ocorreu apenas no ponto 2, onde os modelos com pilotis tiveram melhor desempenho, 49% e 69%, respectivamente (Figura 88). O fluxo de ar a 135° ao penetrar as vias onde se encontram os edifícios, atinge as massas edificadas dos pilotis de forma acelerada, e em seguida tende a ascender pela fachada do edifício ou a seguir no sentido da via (Figura 87). No entanto a situação pode mudar quando considerada a orientação a 90°, como pode ser visto no item 5.4.

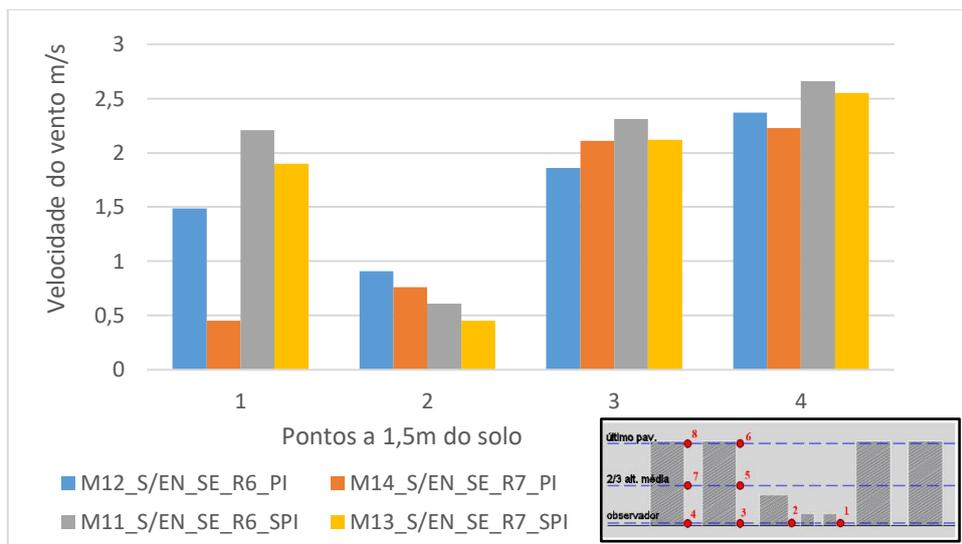
Figura 87 - Croquis do fluxo do vento a 135° sobre o edifício – com e sem pilotis.



Fonte: Autora (2019).

O ponto 2 está localizado nos modelos sem pilotis em uma região de evidente estagnação do ar, devido às proximidades com os edifícios arredores. Ao se considerar o uso do pilotis nos edifícios, percebeu-se que neste ponto o fluxo passou a escoar com maior facilidade. Isso explica a melhor performance destes modelos (Figura 88).

Figura 88 - Gráfico comparativo entre modelos com e sem pilotis a 1,5 m do solo, orientação Sudeste. Recuos R6 e R7, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

Comparando a situação do vento nos pontos 9,10 e 11, na região desobstruída do pilotis, com os pontos 1, 3 e 4 situados junto à massa edificada dele, percebeu-se que na região onde se localizou os pontos 1, 3 e 4 houve o registro de maiores velocidades para a incidência do vento de forma oblíqua ao arranjo, como pode ser observado nos destaques da Tabela 17. As diferenças de velocidade do vento entre os pontos 1 e 9, 3 e 10, e 4 e 11 foram de até 56%, 40% e 22%, respectivamente.

Tabela 17 - Velocidades do vento na área edificada do pilotis x área livre do pilotis – incidência do vento a 135°.

Valores de velocidade do vento(m/s) – Modelos com pilotis e com incidência a 135° (SUDESTE)						
MODELOS	PONTOS					
	ÁREA OBSTRUÍDA			ÁREA DESOBSTRUÍDA		
	1	3	4	9	10	11
M02_S/E_SE_R1_PI	0,63	1,36	1,84	0,84	1,06	1,5
M04_S/E_SE_R2_PI	0,76	1,28	1,64	0,45	0,87	1,44
M06_S/E_SE_R3_PI	1,82	1,76	2,34	0,83	1,3	1,83
M08_S/E_SE_R4_PI	1,75	1,77	2,28	0,77	1,1	1,89
M10_S/E_SE_R5_PI	1,19	1,63	2,16	1,21	0,98	1,77
M12_S/E_SE_R6_PI	1,49	1,86	2,37	0,87	1,34	2,02
M14_S/E_SE_R7_PI	0,45	2,11	2,23	1,35	1,33	1,82
M16_S/E_SE_R8_PI	1,18	1,47	2,08	1,18	1,06	1,79

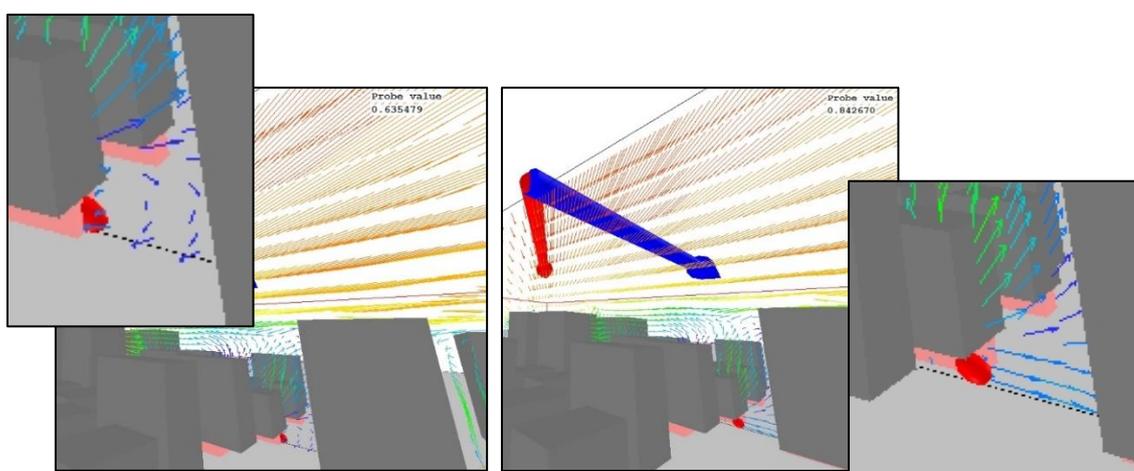
Maiores registros de vel. do vento (m/s).

Fonte: Autora (2019).

As imagens das seções verticais com os vetores de velocidades permitem perceber que a incidência do vento de forma oblíqua à malha do conjunto contribuiu para que o fluxo de ar penetrasse as vias onde se encontravam os edifícios e atingissem as massas edificadas dos pilotis de forma acelerada, e em seguida seguisse no sentido da via. Esse vento circulou pelos pontos 9, 10 e 11, e parte atravessou a área livre do pilotis, em menor magnitude, e parte ascendeu em contato com a fachada para logo após seguir no sentido da via (Figuras 89, 90 e 91). Isso justifica o fato de nos pontos de interesse localizados na área livre do pilotis terem sido registradas velocidades mais baixas do que nos pontos 1, 3 e 4.

A Figura 89 indica que o vento, ao convergir para a rua principal, foi criada uma área de vórtices que entra em contato com a massa edificada do pilotis no ponto 1 e em seguida ganha força e tende a ascender.

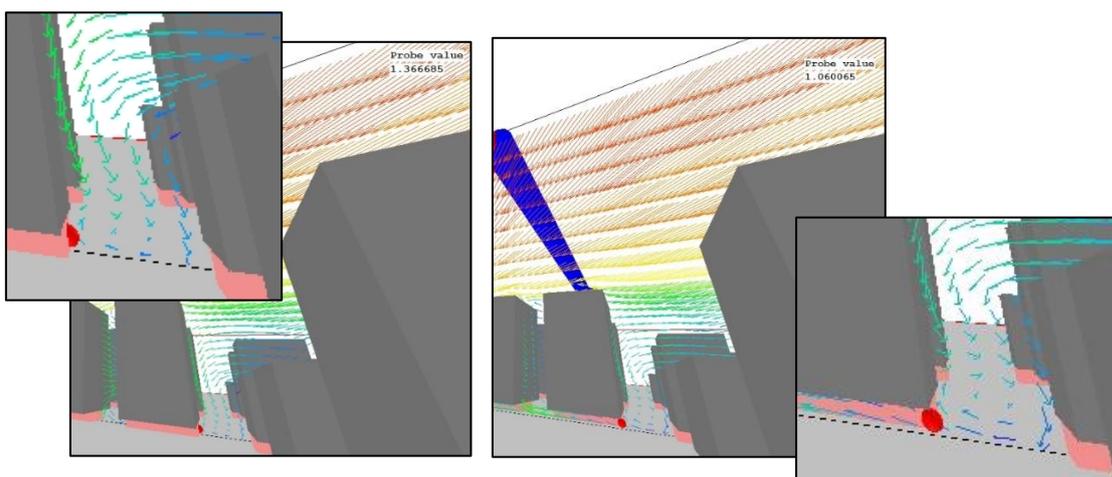
Figura 89 - Comportamento do vento nos pontos 1 e 9, junto ao pilotis – modelo M2_S/EN_SE_R1_PI.



Fonte: Autora (2019).

Nos edifícios de grande altura, o ponto 3 é atingido por um vento descendente que em seguida segue o caminho canalizado pela rua (Figura 90). Já no ponto 10 esse vento em parte penetra na área livre do pilotis e em parte segue o fluxo da via (Figura 90).

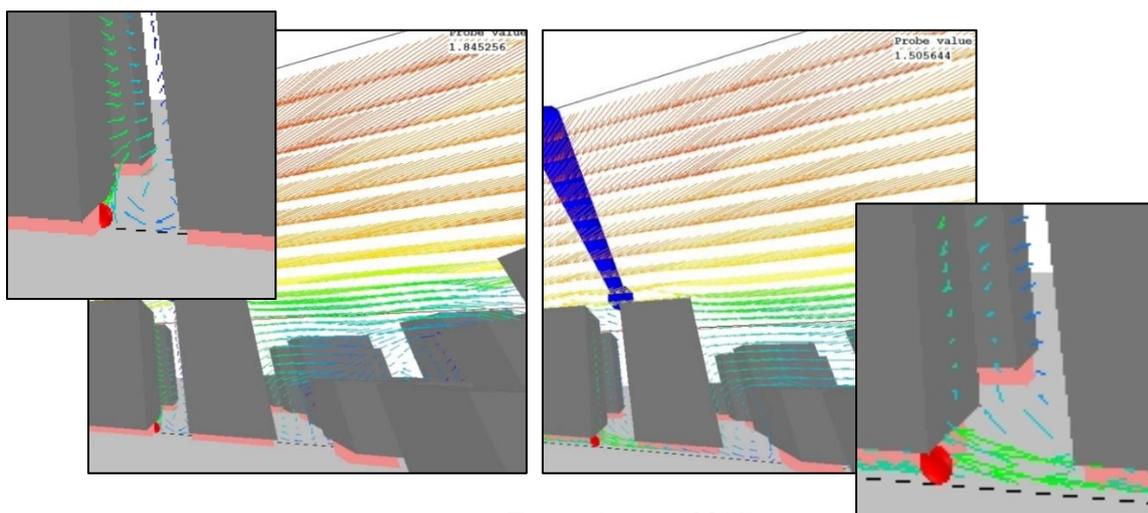
Figura 90 - Comportamento do vento nos pontos 3 e 10, junto ao pilotis – modelo M2_S/EN_SE_R1_PI.



Fonte: Autora (2019).

Nos pontos 4 e 11 os movimentos aerodinâmicos foram similares aos ocorridos nos pontos 1 e 9, respectivamente, conforme figura 91.

Figura 91: Comportamento do vento nos pontos 4 e 11, junto ao pilotis – modelo M2_S/EN_SE_R1_PI.



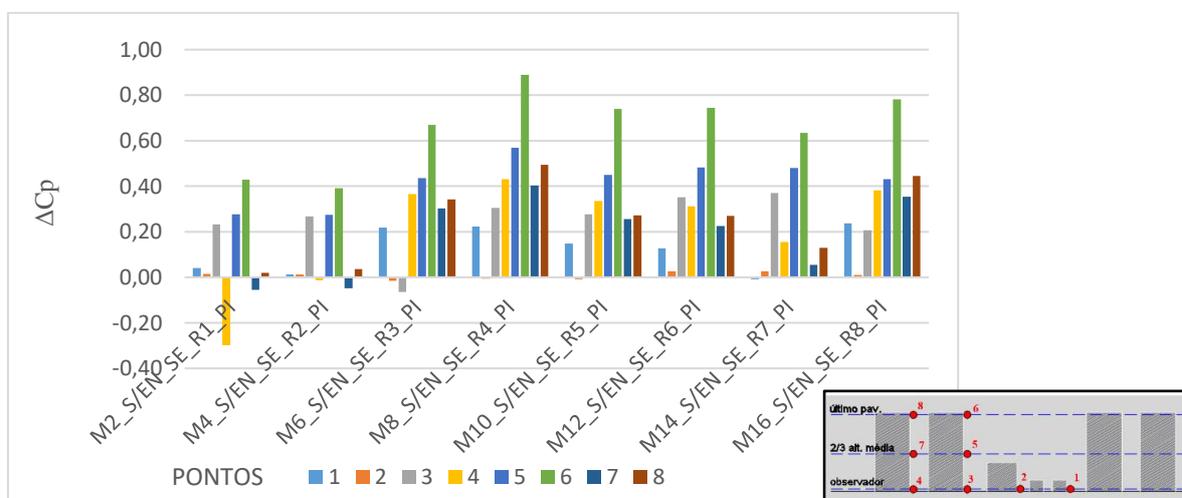
Fonte: Autora (2019).

O fenômeno que ocorreu nos pontos 1, 3 e 4 assemelha-se ao efeito de redemoinho ou *wise*, que é quando o vento incide na fachada e produz uma área turbulenta na base do edifício, como já descrito no Quadro 1 desta tese.

Tais efeitos ocorreram em todos os modelos com pilotis e com incidência do vento a 135°, como pode ser comprovado nos dados da Tabela 16 e nas imagens contidas no Apêndice C.

5.2.1 Análise dos coeficientes de pressão (C_p) nos modelos com pilotis e com incidência a 135° (sudeste).

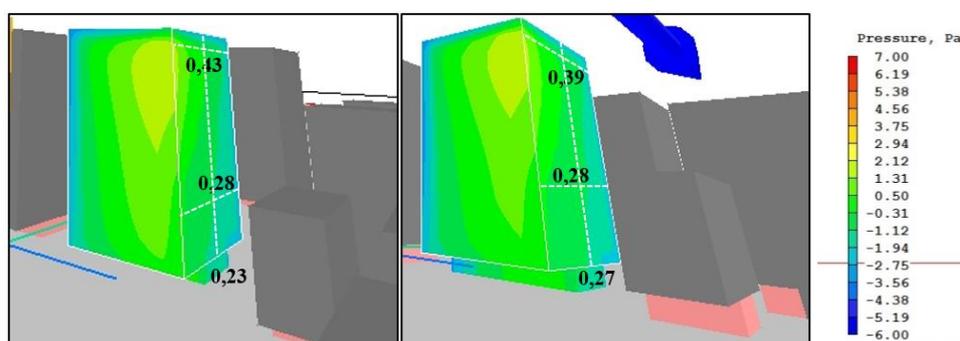
Figura 92 - ΔC_p dos modelos com pilotis e vento a 135° (sudeste).



Fonte: Autora (2019).

A análise das diferenças de coeficientes de pressão (ΔC_p) nos pontos de entrada e saída de ar apontam que as menores diferenças foram registradas nos modelos M2_S/EN_SE_R1_PI (de -0,30 à 0,43) e M4_S/EN_SE_R2_PI (de -0,05 à 0,39), ambos os cenários formaram campos de pressões favoráveis a captação da ventilação natural apenas na região em que se encontravam os pontos 3, 5 e 6, ainda que em menor escala (Figura 92). Tal resultado pode ser explicado pela existência, a sua frente, de obstruções proporcionalmente mais baixas do que a altura dos pontos de análise (edifícios de 5 e 10 pavimentos no modelo M2, e de 4 e 9 pavimentos no modelo M4), o que provocou uma menor perturbação do fluxo e aumentou a pressão sobre a fachada, se comparado aos outros pontos de interesse (Figura 93).

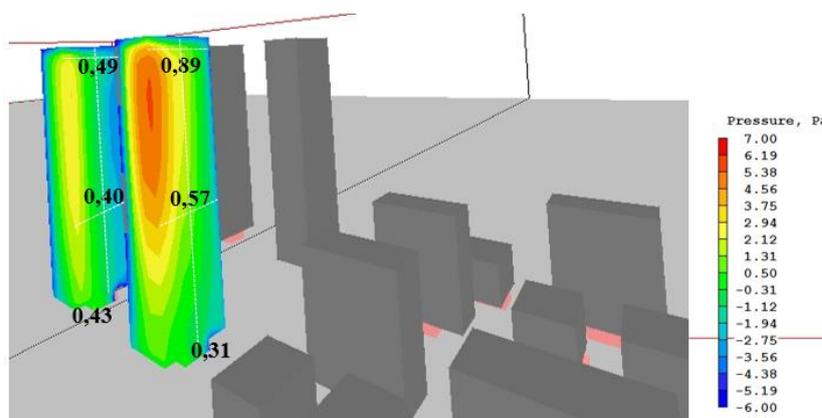
Figura 93 - Indicação do ΔC_p nos pontos de interesse 3, 5 e 6 - Modelo M2 e M4.



Fonte: Autora (2019).

O modelo M8_ S/EN_SE_R4_PI por sua vez apresentou as maiores ΔC_p nos pontos de análise, com valores mais significativos nos pontos 3, 4, 5, 6, 7 e 8, situados nos três níveis de distância do solo dos edifícios de maior altura, conforme figura 94.

Figura 94 -Variação de pressão nas fachadas dos edifícios de maior altura - modelo M8.



Fonte: Autora (2019).

Quando o vento a 135° incide sobre os edifícios, as diferenças de pressão nas fachadas se tornaram significativas com a elevação da altura deles, especialmente nas suas esquinas (Figura 94), consequência inclusive do efeito de redemoinho ou *wise*, citado anteriormente. Com isso, ao calcular as diferenças de C_p a barlavento e a sotavento, observou-se que as maiores ΔC_p foram registradas também nos pontos mais distantes do solo, exceto no ponto 7 que teve um ΔC_p de 0,40, conforme gráfico da Figura 92.

A partir dos resultados alcançados para os modelos com pilotis e vento a 135° , é possível estabelecer um resumo dos principais resultados, conforme Tabela 18.

Tabela 18 - Resumo dos principais resultados. Modelos com Pilotis e vento a 135°.

Mod	Característica	Resultado	Discussão
M4	R2/ com pilotis / 135°	Menores velocidades do vento, principalmente a 1,5m do solo (pontos 2, 3 e 4) – 0,52m/s; 1,28m/s; e 1,64m/s.	Menores afastamentos resultaram em menores velocidades do vento ao nível do pedestre (para esta orientação e tipologia de arranjo).
M8	R4 /com pilotis / 135°	Maiores velocidades mais distante do solo – 2,49m/s a 3,17m/s.	Edifícios com recuos de dimensão (acréscimo de 25% em todos os recuos iniciais), com variação de alturas que chegaram até 76,5 m (30 pavimentos).
M12	R6 /com pilotis / 135°	Maiores velocidades a 1,5 m do solo – 0,91 m/s a 2,37 m/s.	Blocos com acréscimos de 75% e de 100% em todos os recuos mínimos.
M14	R7 /com pilotis / 135°		
M12 x M11	R6 / com pilotis / 135° x R6 / sem pilotis / 135°	Menores velocidades no M12 (redução de 11% à 33%).	O fluxo de ar a 135° ao penetrar as vias onde se encontram os edifícios, atinge as massas edificadas dos pilotis de forma acelerada, e em seguida tende a ascender pela fachada do edifício ou a seguir no sentido da via.
M14 x M13	R7 / com pilotis / 135° x R7 / sem pilotis / 135°	Menores velocidades no M14 (redução de 13% à 76%).	
M2, M4, M6, M8, M10, M12, M14 e M16	R1 a R8 / com pilotis / 135°. Pontos 9,10 e 11 x Pontos 1, 3 e 4.	Maiores velocidades do vento nos pontos 1, 3 e 4, diferenças de até 56%, 40% e 22%, em relação aos pontos 9,10 e 11.	O vento circula pelos pontos 9, 10 e 11, e parte atravessa a área livre do pilotis, em menor magnitude, e parte ascendeu em contato com a fachada para logo após seguir no sentido da via.
M2 e M4	R1 e R2 /com pilotis / 135°	Menores diferenças de de CP (-0,30 a 0,43) e (-0,05 a 0,39), respectivamente.	Campos de pressão favoráveis à captação do vento apenas nos pontos 3, 5 e 6.
M08	R4 /com pilotis / 135°	Maiores diferenças de de CP (-0,01 a 0,89)	Quando o vento a 135° incide sobre os edifícios as diferenças de pressão nas fachadas se tornaram significativas com a elevação da altura deles.

Fonte: Autora (2019).

5.3 Modelos sem pilotis e vento a 90° (LESTE)

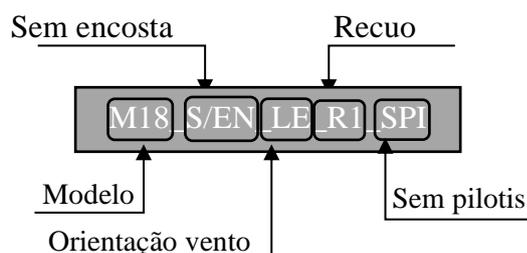
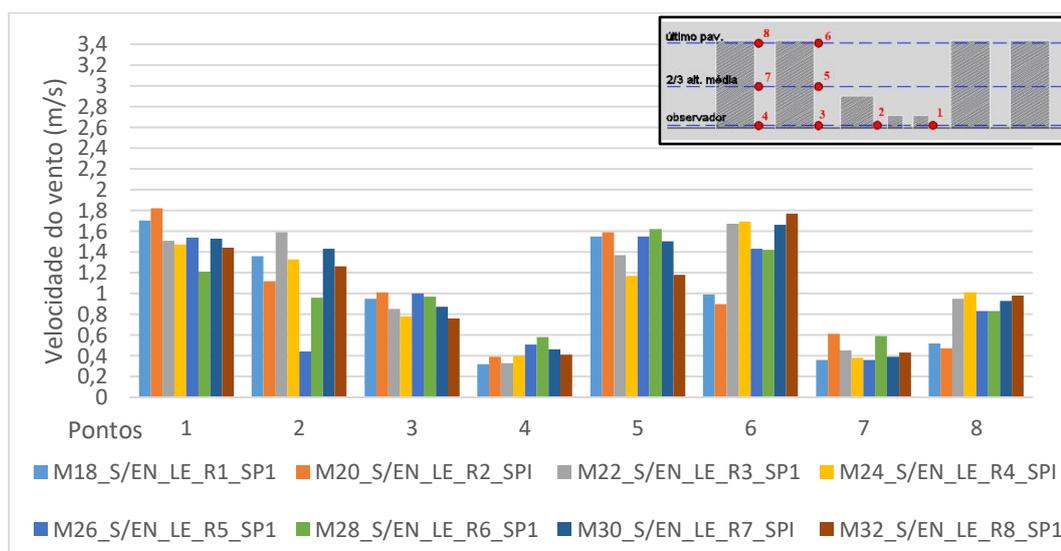


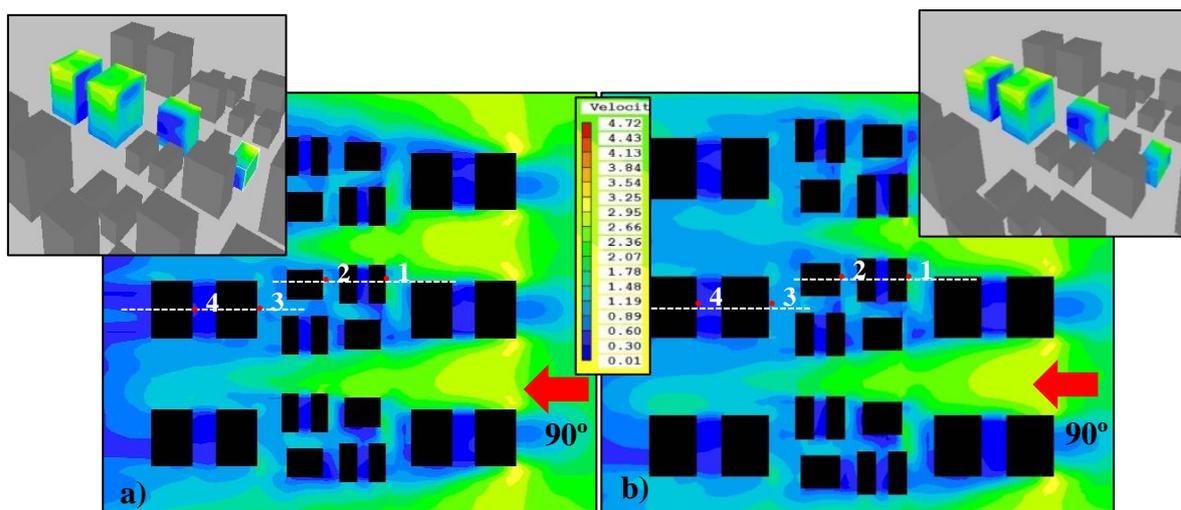
Figura 95 - Velocidade do vento (m/s) dos modelos sem pilotis e incidência a 90° (leste).



Fonte: Autora (2019).

Dentre os cenários compostos por edifícios sem pilotis e com incidência de vento à 90°, o modelo M18_S/EN_LE_R1_SPI foi o que obteve as menores velocidades do vento, que variaram entre 0,32 a 1,55m/s. Os resultados demonstraram que o uso dos cálculos de recuos progressivos, como atualmente se apresentam, para determinar os afastamentos entre os edifícios representou uma redução entre 4% a 39% nas velocidade do vento se comparado ao modelo M28_S/EN_LE_R6_SPI, que por sua vez foi o cenário que apresentou as maiores velocidades nos pontos de análise, da ordem de 0,58 m/s a 1,62 m/s (Figura 95).

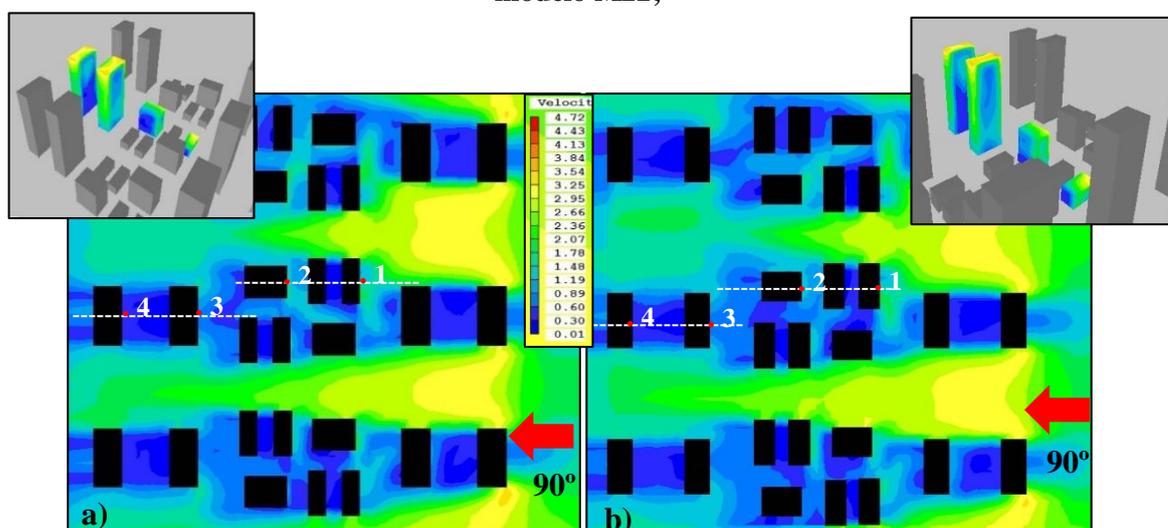
Figura 96 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M18.



Fonte: Autora (2019).

A incidência do vento a 90° (leste) contribuiu para o registro de maiores velocidades nos pontos 1 e 2 localizados a 1,5m do solo. No ponto 4 onde o vento foi bloqueado pelo edifício de mesma altura logo a sua frente, foi gerado uma zona de recirculação do ar de baixas velocidades. Gonçalves et al. (2015) explicam esse fenômeno ao citar que meios urbanos de proporções compactas são prejudicados pelo efeito de barreira causado pela envoltória dos edifícios à frente. Essa situação é evidenciada nos dois modelos analisados, como pode ser verificada nas Figuras 95 e 96.

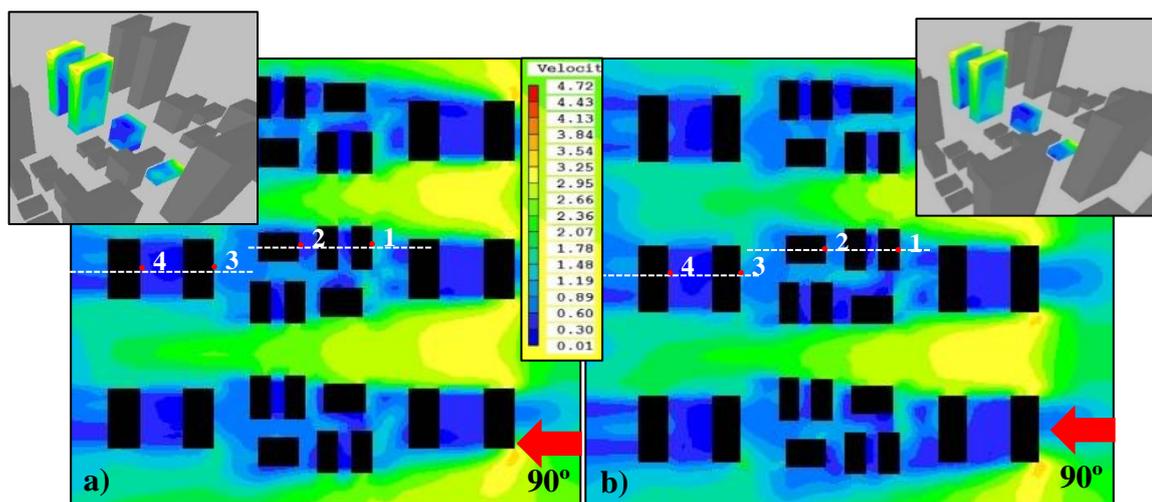
Figura 97 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50 m do solo no modelo M22;



Fonte: Autora (2019).

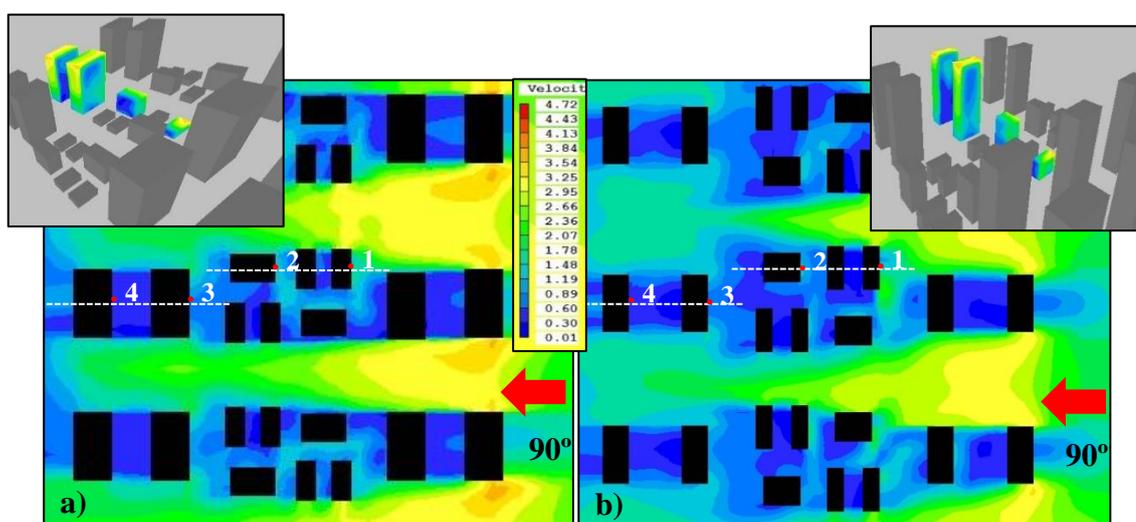
Ainda a 1,5 m do solo, observou-se que o ponto 1 por estar localizado a barlavento e livre de obstrução apresentou as maiores velocidades de vento em todos os cenários, como pode ser verificado nos tons esverdeados dos contornos de velocidades (Figuras 95, 96, 97, 98 e 99).

Figura 98 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M26;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M28.



Fonte: Autora (2019).

Figura 99 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50 m do solo no modelo M30;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50 m do solo no modelo M32.



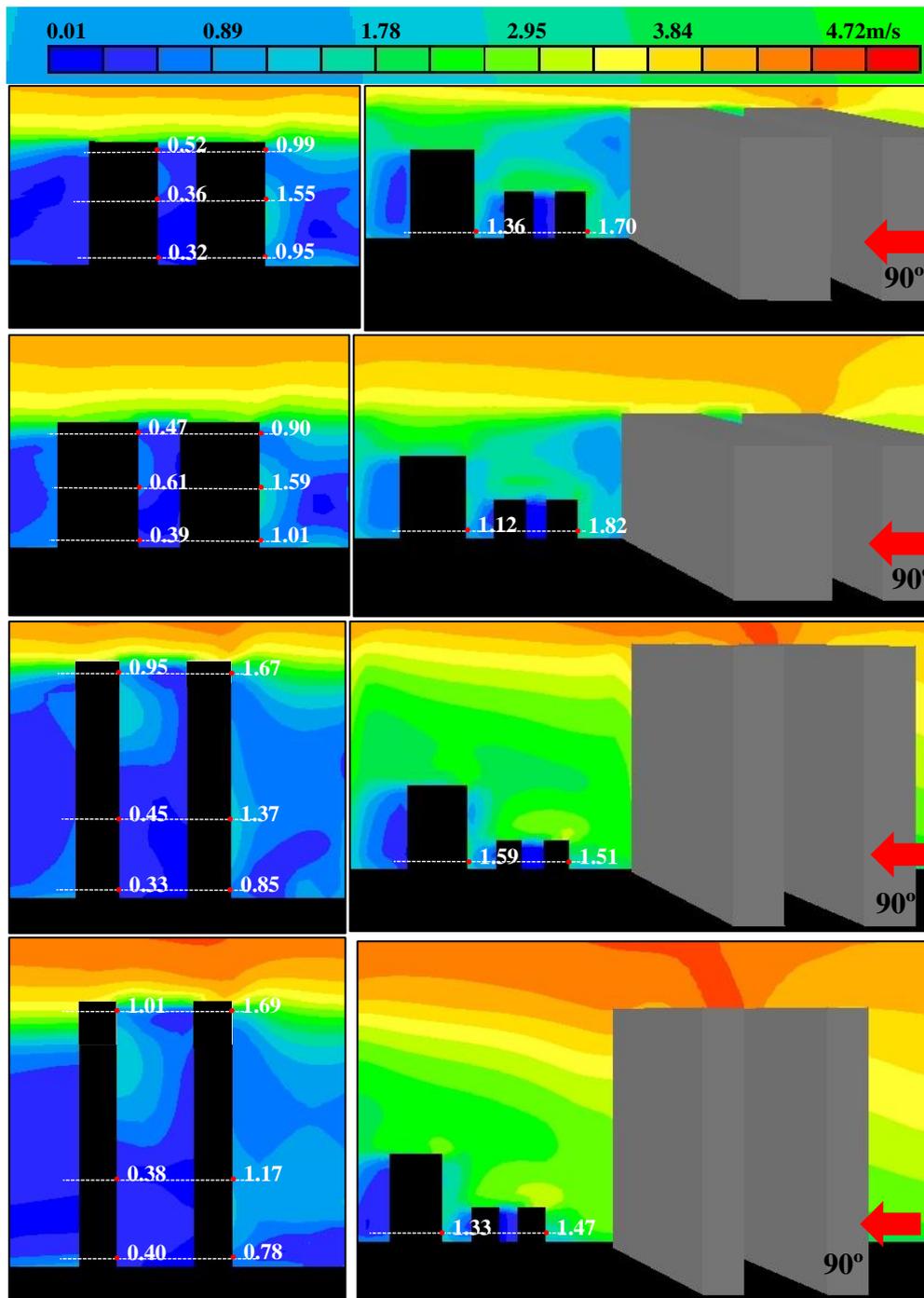
Fonte: Autora (2019).

A partir das seções verticais foi identificado que dentre as regiões avaliadas, as principais sombras de vento estavam localizadas a sotavento dos edifícios mais altos, nos pontos 4, 7 e 8. Essa desaceleração do ar foi mais significativa nos pontos 4 e 7, onde se percebe um fluxo de ar mais turbulento e instável e, por isso, incapazes de alcançar os níveis de pedestres com muita intensidade. No ponto 8, por ser mais distante do solo, o vento começa a ganhar mais intensidade, principalmente nos modelos de maiores alturas: M24_S/EN_LE_R4_SPI e M32_S/EN_LE_R8_SPI, ambos com 30 pavimentos; M22_S/EN_LE_R3_SPI, com 28 pavimentos; e M30_S/EN_LE_R7_SPI, com 20 pavimentos (Figuras 98 e 99).

Lima e Bittencourt (2017) relatam que a uniformidade das alturas dos edifícios, associada a reduzidos recuos resultam em um movimento turbulento entre os blocos, e o fluxo de ar tende a ser desviado para cima deles.

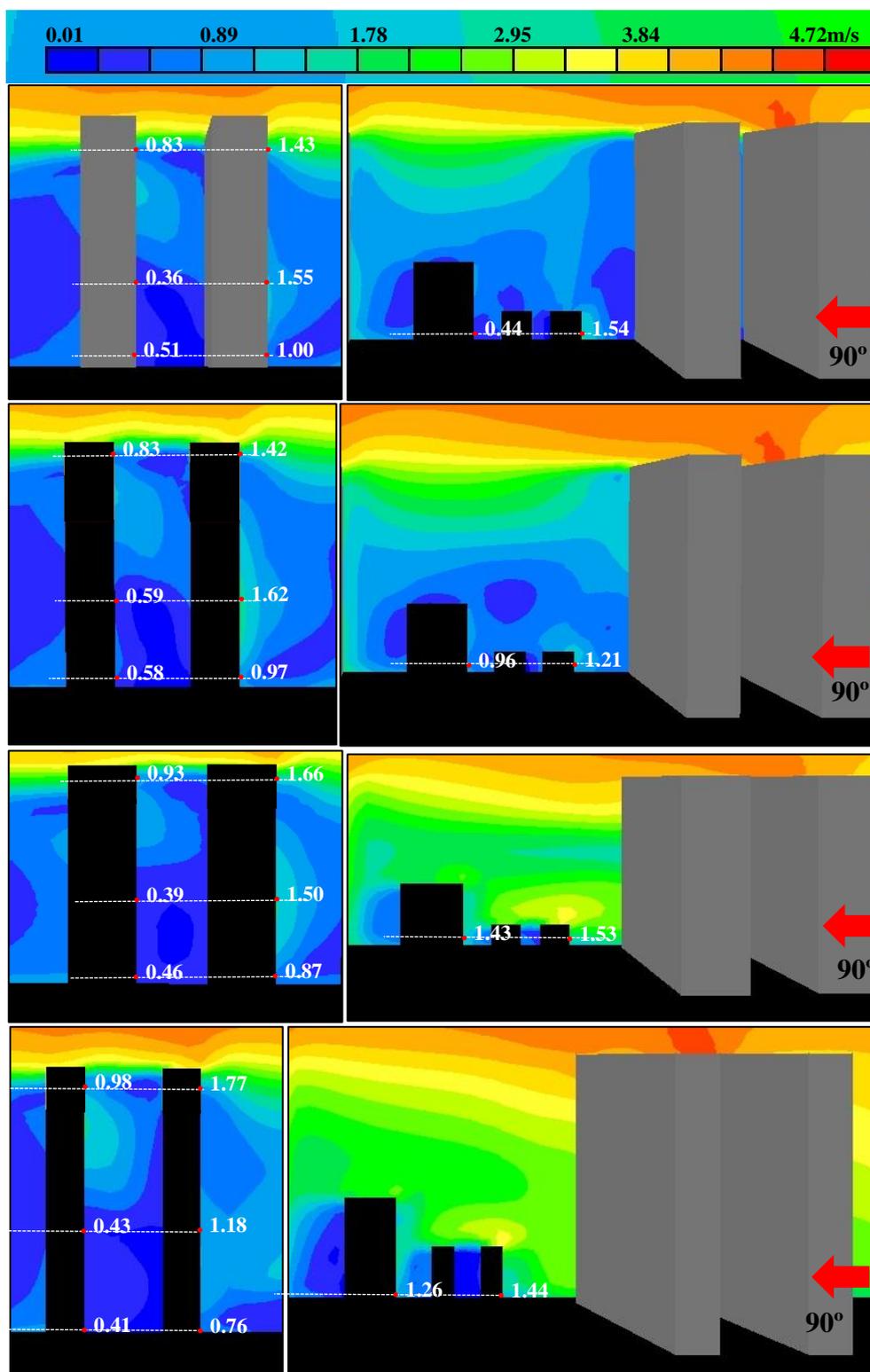
A heterogeneidade dos cenários com edifícios mais altos (modelos M22, M24, M30 e M32), permitiu que a camada intra-urbana apresentasse as maiores magnitudes do vento na parte central do arranjo, isso se refletiu principalmente nas velocidades registradas no ponto 2 desses modelos (Figuras 95, 100 e 101).

Figura 100 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M18_S/EN_LE_R1_SPI, M20_S/EN_LE_R2_SPI, M22_S/EN_LE_R3_SPI e M24_S/EN_LE_R4_SPI, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

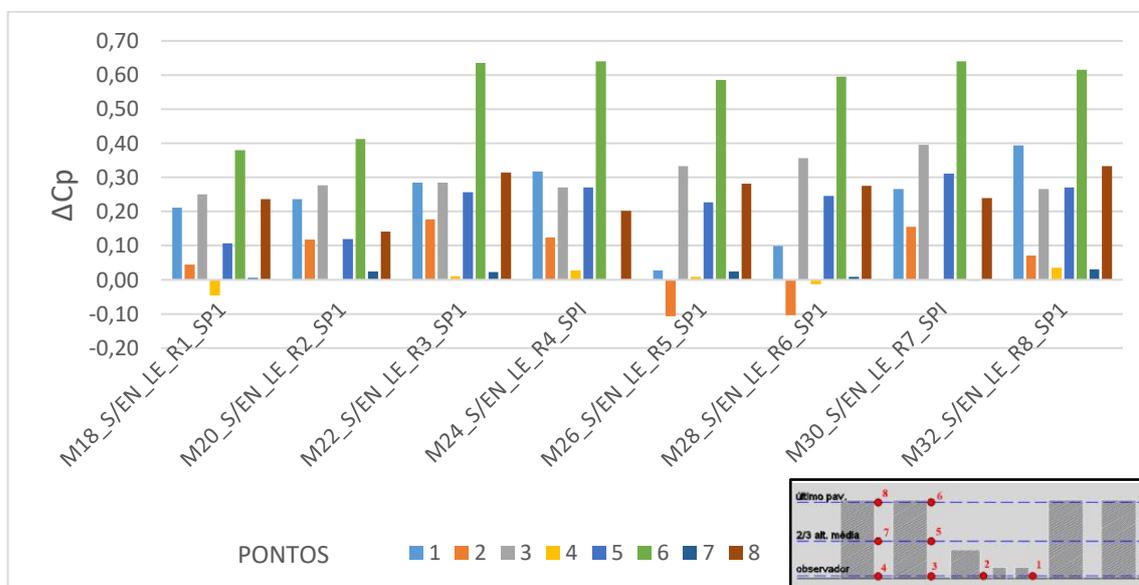
Figura 101 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M26_S/EN_LE_R5_SPI, M28_S/EN_LE_R6_SPI, M30_S/EN_LE_R7_SPI e M32_S/EN_LE_R8_SPI, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

5.3.1 Análise dos coeficientes de pressão (C_p) nos modelos sem pilotis e com incidência a 90° (leste).

Figura 102 - ΔC_p dos modelos sem pilotis e vento a 90° (leste).

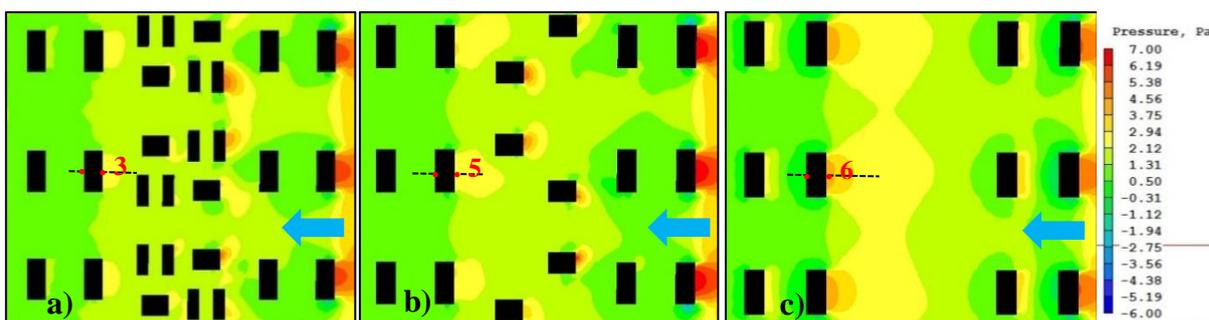


Fonte: Autora (2019).

Os cálculos das diferenças de coeficiente de pressão, onde supostamente estariam localizadas as aberturas de entrada e saída de ar, evidenciaram que nos arranjos sem pilotis e com incidência do vento a 90° , ou seja, perpendicular às fachadas, o cenário elaborado a partir dos recuos vigentes (modelo M18_S/EN_LE_R1_SPI) apresentou o mais baixo potencial no uso da ventilação natural como estratégia de resfriamento passivo. Esse baixo desempenho foi apontado principalmente próximo aos edifícios de maior altura a sotavento, onde ocorreu um leve aumento da pressão no ponto 6, influenciado pela variação de altura dos edifícios a sua frente e por estar mais distante do solo (Figura 102).

Os edifícios mais robustos, mais próximos entre si e de menor variação de altura, modelados para o cenário M18_S/EN_LE_R1_SPI, fez com que o vento alcançasse os pontos de interesse situados a sotavento com menor intensidade e isso refletiu na formação de baixos campos de pressão, e conseqüentemente em reduzidos ΔC_p s (Figura 103).

Figura 103 - a) Visualização dos campos de pressão em planta com incidência a 90° a 1,50 m; b) 26,4 m (2/3 da altura média dos edifícios); c) 74 m do solo no modelo 32.



Fonte: Autora (2019).

Os modelos M32_S/EN_LE_R8_SP1 e M30_S/EN_LE_R7_SPI, por sua vez, apontaram as maiores diferenças de C_p , de até 0,62 no ponto 6. Ambos os modelos tiveram os pontos 3, 5 e 6 com maior diferença de pressão, o que significa que dentre os pontos analisados, esta região foi a mais adequada para a localização das aberturas, ao se desejar a captação do vento leste, uma vez que possibilitaria maximizar o fluxo de ar para o interior do edifício. A variação das alturas dos edifícios à frente desses pontos também favoreceu o escoamento do vento, resultando na formação de uma zona de pressão positiva a barlavento, além de uma zona de sucção na face a sotavento (Figura 103).

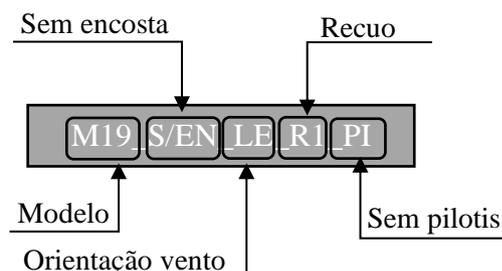
Diante dos resultados encontrados para os modelos sem pilotis e vento a 90°, é possível estabelecer um resumo dos principais resultados, conforme Tabela 19.

Tabela 19 - Resumo dos principais resultados. Modelos sem Pilotis e vento a 90°.

Mod	Característica	Resultado	Discussão
M18	R1/ sem pilotis / 90°	Menores velocidades do vento – 0,32m/s; 1,55m/s.	Menores afastamentos resultaram em menores velocidades do vento, uma redução entre 4% a 39% se comparado ao modelo que apresentou as maiores velocidades.
M28	R6 /sem pilotis / 90°	Maiores velocidades do vento, da ordem de 0,58 m/s a 1,62 m/s.	Edifícios com recuos de dimensão (acréscimo de 75% em todos os recuos iniciais), com variação de alturas que chegaram até 64 m. (25 pavimentos).
M18	R1/ sem pilotis / 90°	Menores diferenças de <i>CP</i> -	Edifícios mais robustos, mais próximos entre si e de menor variação de altura, fez com que o vento alcançasse os pontos de interesse situados a sotavento com menor intensidade e isso refletiu na formação de baixos campos de pressão.
M30 e M32	R7 /sem pilotis / 90° e R8 /sem pilotis / 90°	Maiores diferenças de <i>CP</i> – de até 0,62 no ponto 6.	Especialmente nos pontos 3, 5 e 6 – região mais adequada para a localização das aberturas, para a captação do vento leste. A variação das alturas dos edifícios favoreceu o escoamento do vento, resultando na formação de uma zona de pressão positiva a barlavento, além de uma zona de sucção na face a sotavento.
M18, M20, M22, M24, M26, M28, M30 e M32	R1 a R8 / sem pilotis / 90°.	A 1,5m do solo: Ponto 1 - Maiores velocidades do vento; Ponto 4 – Menores velocidades do vento.	Ponto 1 – localizados mais a barlavento; Ponto 4 – Localizados a sotavento. Ocorre o efeito de barreira pelos edifícios à frente.

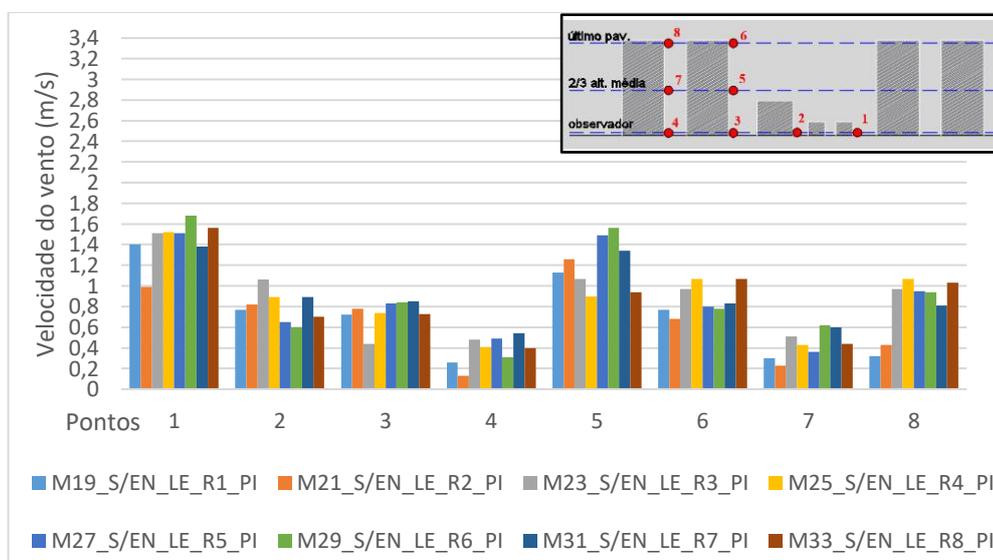
Fonte: Autora (2019).

5.4 Modelos com pilotis e vento a 90° (LESTE)



Os resultados apresentados na Figura 104 indicam ser o modelo M21_S/EN_LE_R2_PI (com recuos acrescidos de 25% nos recuos mínimos laterais e posterior) o que obteve as menores velocidades do ar nos pontos de medição. Os pontos de menor magnitude foram os localizados junto às fachadas dos edifícios mais a sotavento, inclusive nos pontos mais distantes do solo (pontos 3, 4, 6, 7 e 8, exceto no ponto 5), com velocidades entre 0,13 m/s a 0,78 m/s. Já o cenário M29_S/EN_LE_R6_PI por sua vez, foi o que registrou os maiores picos de velocidade, entre 0,31 m/s a 1,68 m/s. Os dois cenários apresentaram entre si diferenças de 8% a 138% a 1,50 m do solo, e de 24% a 170% nos pontos mais distantes do solo.

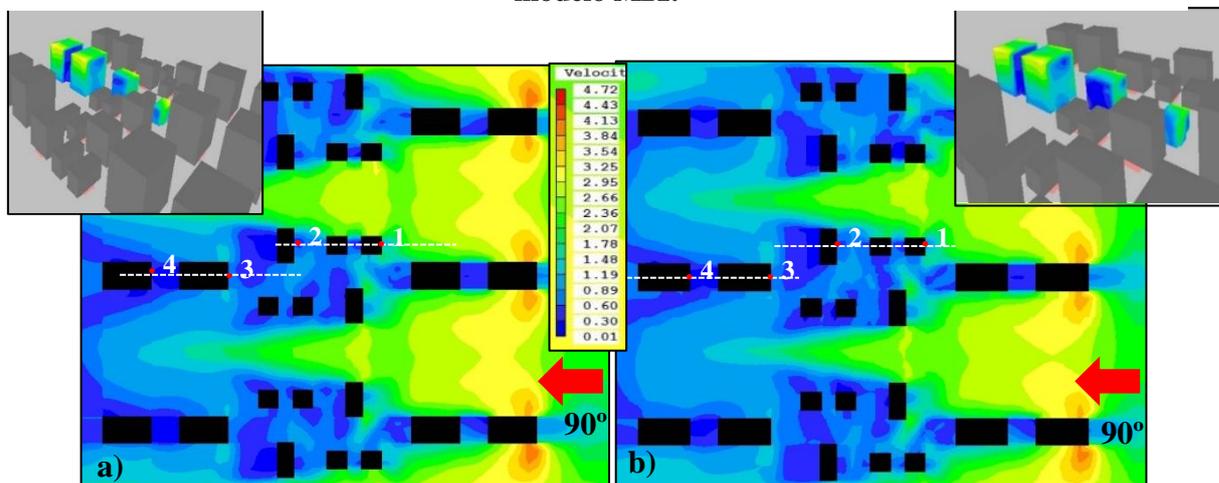
Figura 104 - Velocidade do vento (m/s) dos modelos com pilotis e incidência a 90° (leste).



Fonte: Autora (2019).

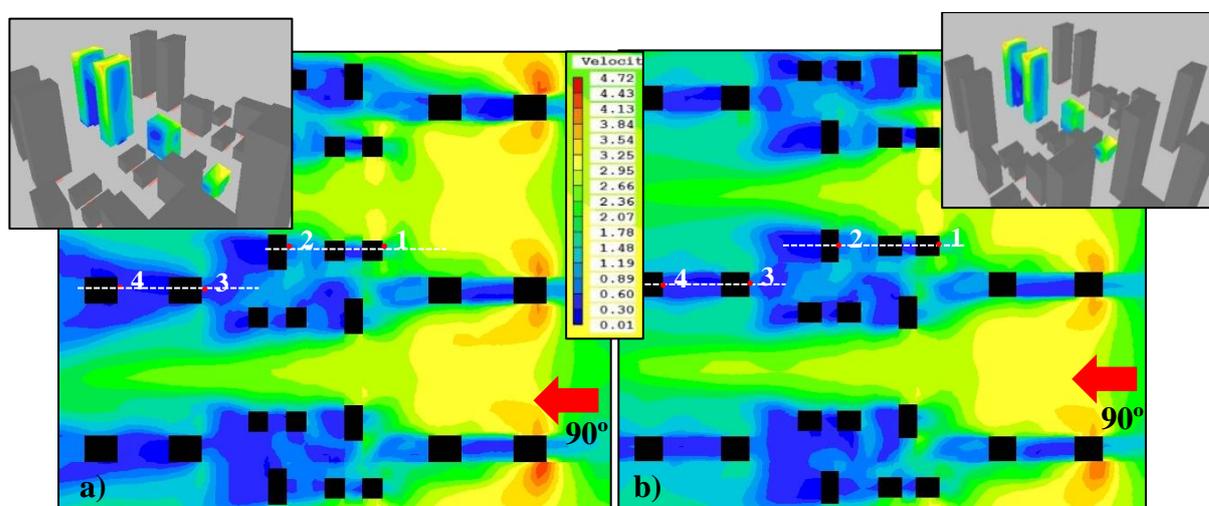
Nos modelos 19 e 21, as manchas de cores apontaram grande semelhanças do comportamento do vento a 1,5 m do solo, com formação de esteiras de vento tanto na parte central como a sotavento do arranjo. A maior oscilação foi registrada no ponto 1, onde o modelo M19_S/EN_LE_R1_PI apresentou velocidade do ar 41% maior (Figura 105).

Figura 105 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M19;b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M21.



Fonte: Autora (2019).

Figura 106 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M23.a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M25.



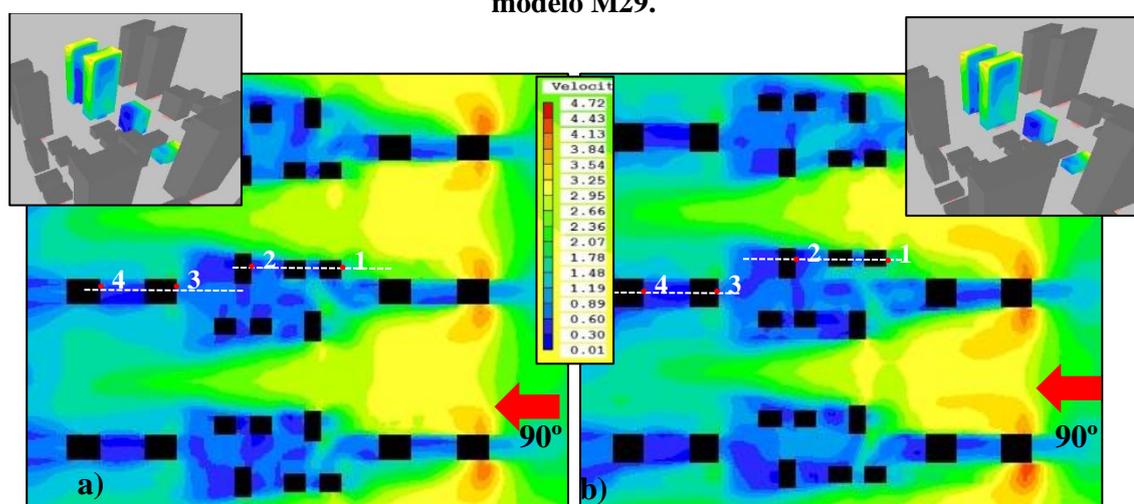
Fonte: Autora (2019).

Nos cenários com pilotis, incidência do vento a 90° e recuos R3 e R4, aplicados aos modelos 23 e 25 resultaram a 1,5 m do solo, e comparados ao modelo M19_S/EN_LE_R1_PI, apenas em um leve aumento da velocidade do vento, da ordem de 0,11 m/s a 0,29 m/s e de

0,02 m/s a 0,15 m/s, respectivamente. O que tornou essa variação praticamente imperceptível nas imagens das manchas de cores (Figura 106). Contudo, pelo fato dos arranjos disporem de edifícios de 28 e 30 andares, nos pontos mais distantes do solo esse aumento foi mais significativo, de até 0,65 m/s e 0,75 m/s no ponto 8 dos dois modelos (Figura 109).

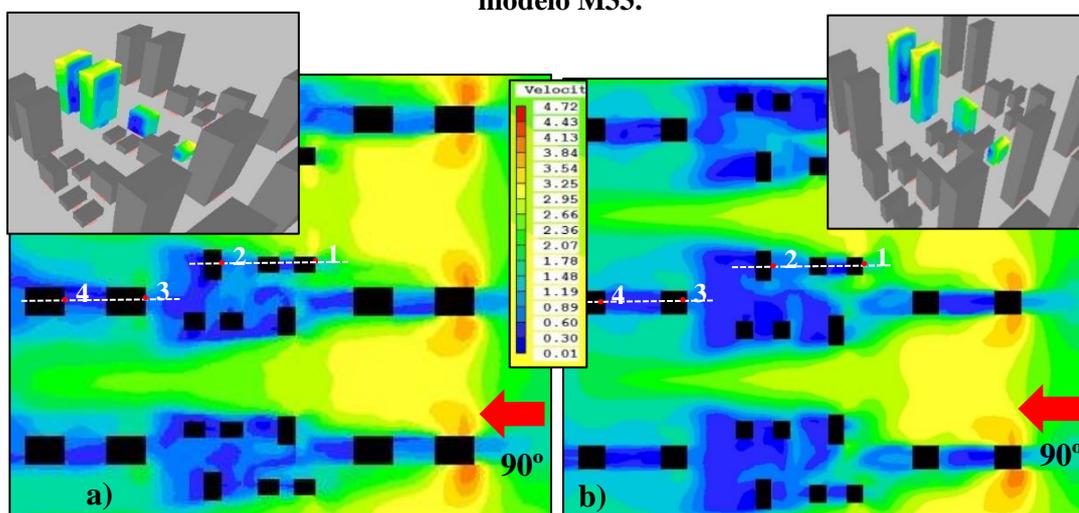
Os demais cenários também apresentaram contornos de velocidades bastantes semelhantes a 1,5 m do solo, com diferença de 0,11 m/s a 0,23 m/s no modelo 27; de 0,12 m/s a 0,28 m/s no modelo 31; e de 0,01 m/s a 0,16 m/s no modelo 33, todos em relação ao modelo 19 com recuo R1 (Figuras 107 e 108).

Figura 107 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M27; b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M29.



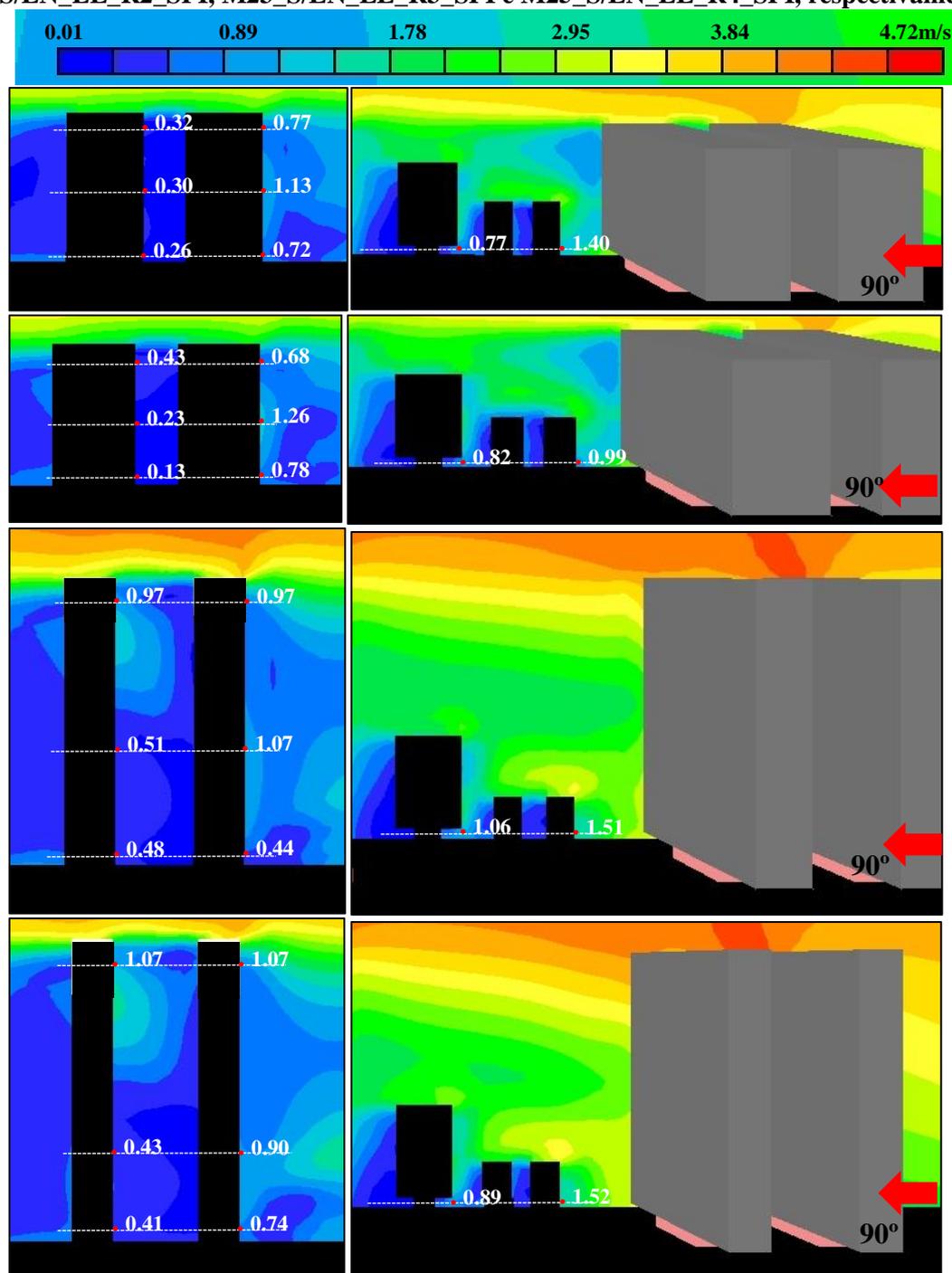
Fonte: Autora (2019).

Figura 108 - a) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M31; b) Velocidade do vento em planta com incidência a 90° a 1,50m do solo no modelo M33.



Fonte: Autora (2019).

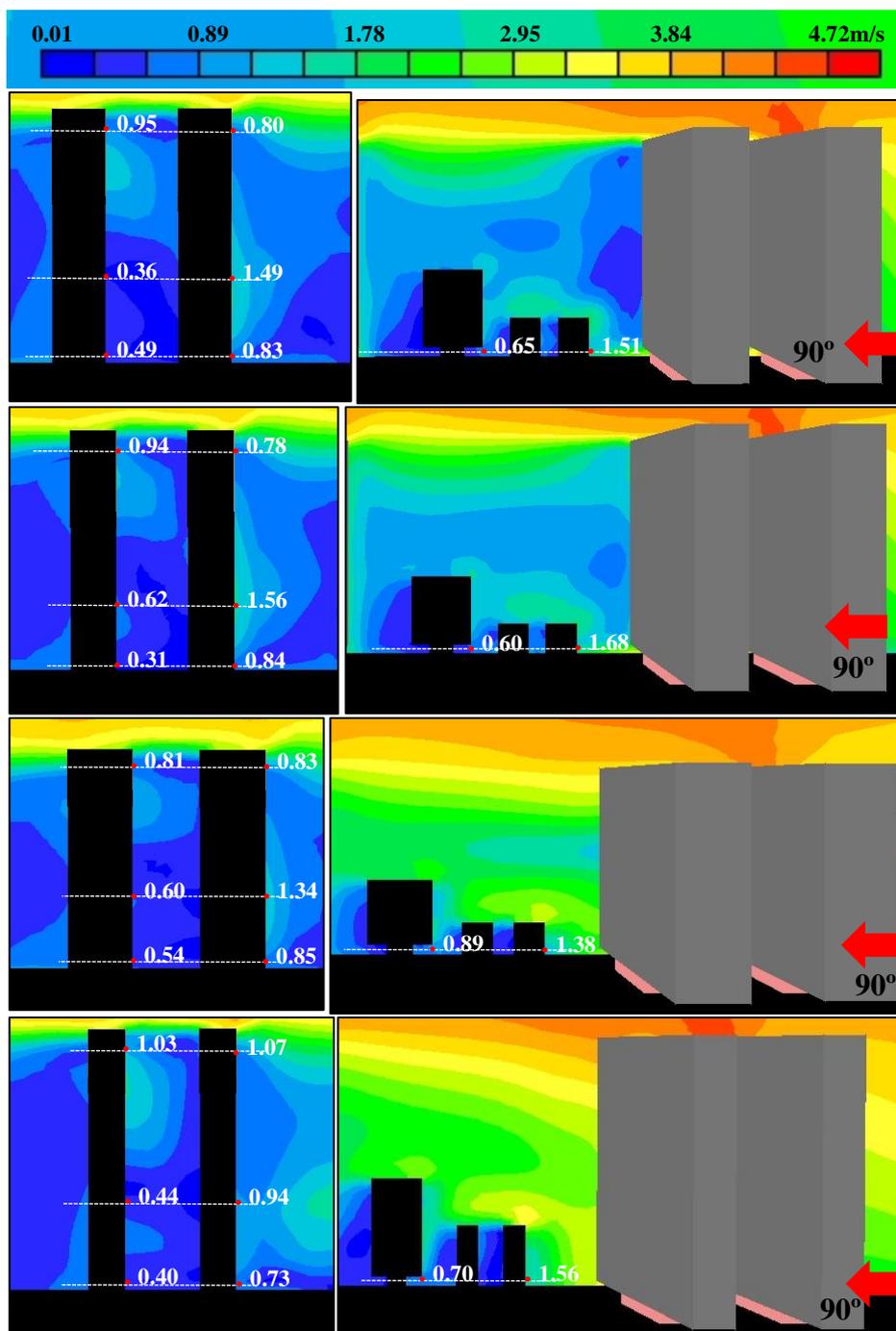
Figura 109 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M19_S/EN_LE_R1_SPI, M21_S/EN_LE_R2_SPI, M23_S/EN_LE_R3_SPI e M25_S/EN_LE_R4_SPI, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

No ponto 8, localizado mais a sotavento e mais distante do solo, a partir da seção vertical observa-se que a velocidade ganha mais força e registra um aumento de 0,63 m/s, de 0,49 m/s e de 0,71 m/s, nos modelos 27, 31 e 33, respectivamente (Figura 110).

Figura 110 - Seção vertical de velocidade do vento modelos M27_S/EN_LE_R5_SPI, M29_S/EN_LE_R6_SPI, M31_S/EN_LE_R7_SPI e M33_S/EN_LE_R8_SPI, respectivamente.

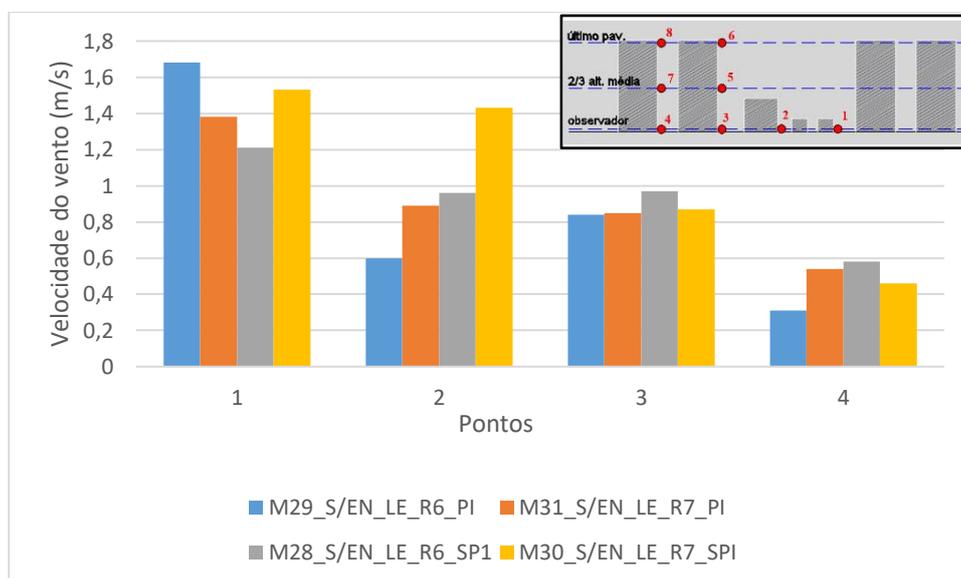


Fonte: Autora (2019).

Confrontando os modelos com pilotis M29_S/EN_LE_R6_PI e M31_S/EN_LE_R7_PI com os modelos sem pilotis M28_S/EN_LE_R6_SPI e M30_S/EN_LE_R7_SPI, por ambos apresentarem os maiores registros de velocidade de vento a nível do pedestre, assim como ocorreu nos cenários com vento a 135°. Percebe-se, que os pontos junto as áreas obstruídas dos pilotis, também apresentaram menores magnitudes

de vento, comparando-se aos cenários sem pilotis. O modelo 29 (com pilotis) registrou redução da velocidade de 13% a 36%, em relação ao modelo 28 (sem pilotis). E o modelo 31 (com pilotis) sofreu redução de 13% a 47%, em relação ao modelo 30, que não possui pilotis (Figura 111).

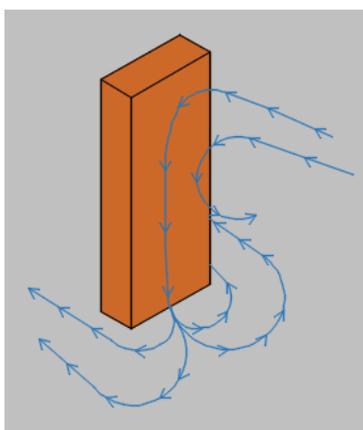
Figura 111- Gráfico comparativo entre modelos com e sem pilotis a 1,5 m do solo, orientação Leste. Recuos R6 e R7, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

Com a orientação leste, o vento ao entrar em contato com o edifício, segue um fluxo descendente e atinge o ponto de análise, em seguida cria-se um redemoinho que faz com que o vento siga pelas laterais do edifício (Figura 112).

Figura 112 - Croqui do fluxo do vento a 90° sobre o edifício.



Fonte: Autora (2019).

No entanto, com o intuito de verificar o fluxo do vento na área desobstruída do pilotis para o arranjo estudado, comparou-se os pontos 1, 3 e 4 com os pontos 9, 10 e 11. Verificou-se que a incidência do vento normal à malha do conjunto, contribuiu para um maior escoamento dele na área não edificada do pilotis, diferentemente do que ocorreu nos cenários com incidência a 135°, onde o vento tendeu a ascender e a ser desviado de acordo com o sentido da via, penetrando o pilotis com menor intensidade.

Tabela 20 - Velocidades do vento na área edificada do pilotis x área livre do pilotis – incidência do vento a 90°.

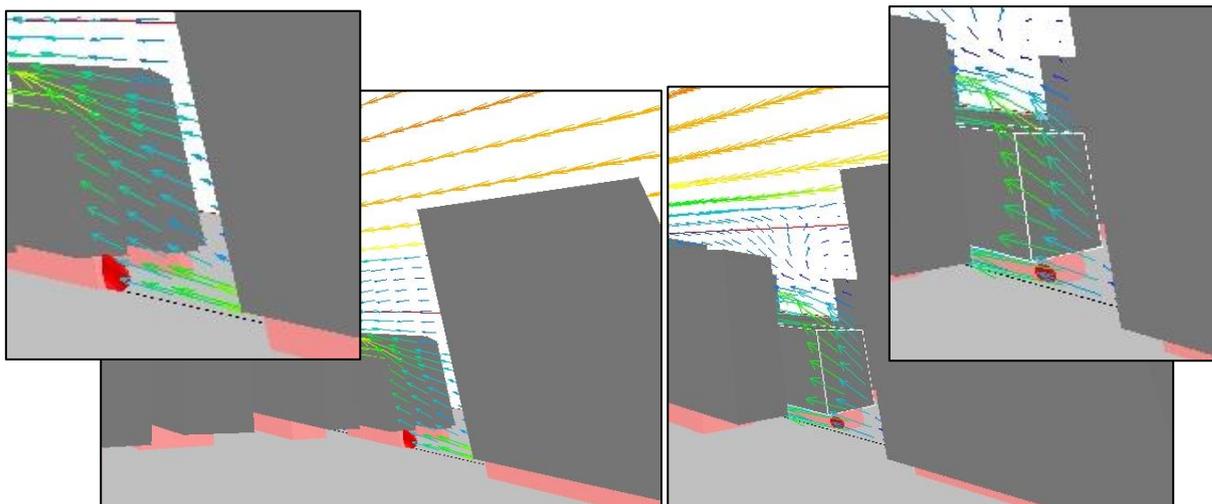
Valores de velocidade do vento(m/s) – Modelos com pilotis e com incidência a 90° (LESTE)						
MODELOS	PONTOS					
	ÁREA OBSTRUÍDA			ÁREA DESOBSTRUÍDA		
	1	3	4	9	10	11
M19_S/E_LE_R1_PI	1,4	0,72	0,26	1,76	1,22	0,49
M21_S/E_LE_R2_PI	0,99	0,78	0,13	1,53	1,17	0,57
M23_S/E_LE_R3_PI	1,51	0,44	0,48	2,49	1,56	0,38
M25_S/E_LE_R4_PI	1,52	0,74	0,41	2,52	1,66	1,35
M27_S/E_LE_R5_PI	1,51	0,83	0,49	0,86	1,59	1,24
M29_S/E_LE_R6_PI	1,68	0,84	0,31	1,45	1,64	1
M31_S/E_LE_R7_PI	1,38	0,85	0,54	2,3	1,8	1,28
M33_S/E_LE_R8_PI	1,56	0,73	0,4	2,74	1,54	1,4

Maiores registros de vel. do vento (m/s).

Fonte: Autora (2019).

Em função dos resultados apresentados na tabela 20, pôde-se observar, com exceção dos modelos 27 e 29, que os demais apresentaram em média velocidades do vento 37% maiores no ponto 9, em relação ao ponto 1. Nesse ponto o vento leste incide diretamente na fachada e tende a subir, já no ponto 9 ocorre o efeito de pilotis, onde há a saída do vento em jatos de grande intensidade, como pode ser observado na Figura 113.

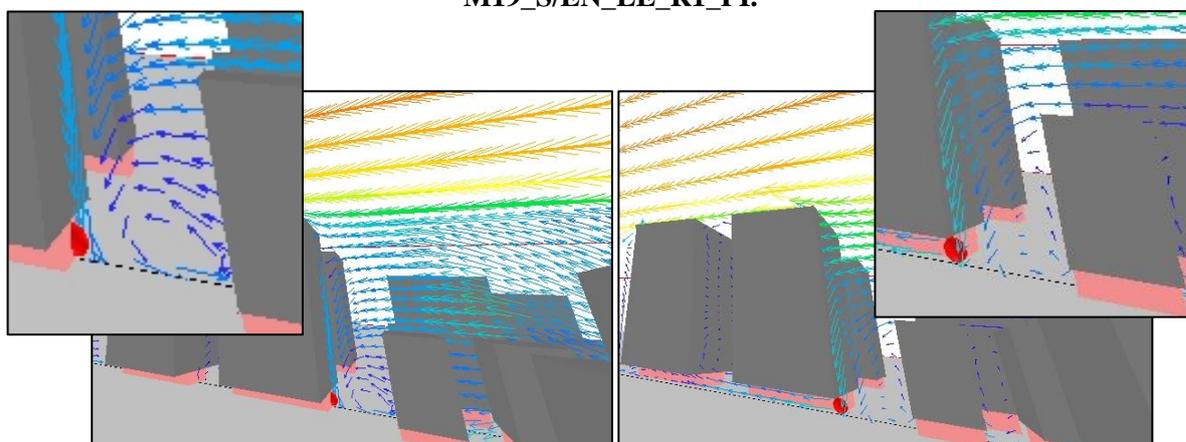
Figura 113 - Comportamento do vento nos pontos 1 e 9, junto ao pilotis – modelo M19_S/EN_LE_R1_PI.



Fonte: Autora (2019).

No ponto 10, ocorreu um aumento médio da velocidade do vento de 113% em relação ao ponto 3. A figura 114 mostra que foram formados vórtices de recirculação de baixa intensidade na região do ponto 3. No entanto, no ponto 10 o vento que atinge a fachada desce e em seguida tem a sua saída desobstruída pelo pilotis.

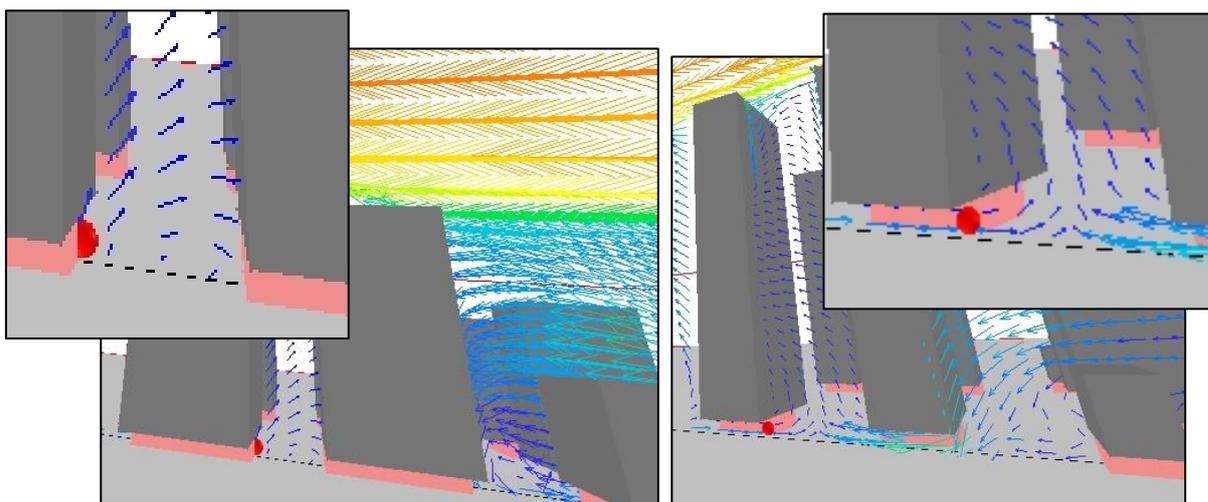
Figura 114 - Comportamento do vento nos pontos 3 e 10, junto ao pilotis – modelo M19_S/EN_LE_R1_PI.



Fonte: Autora (2019).

No ponto 11 o aumento da velocidade do vento foi em média de 175%, em relação ao ponto 4. O fenômeno aerodinâmico assemelha-se ao que ocorreu nos pontos 3 e 10 (Figura 115).

Figura 115 - Comportamento do vento nos pontos 4 e 11, junto ao pilotis – modelo M19_S/EN_LE_R1_PI.

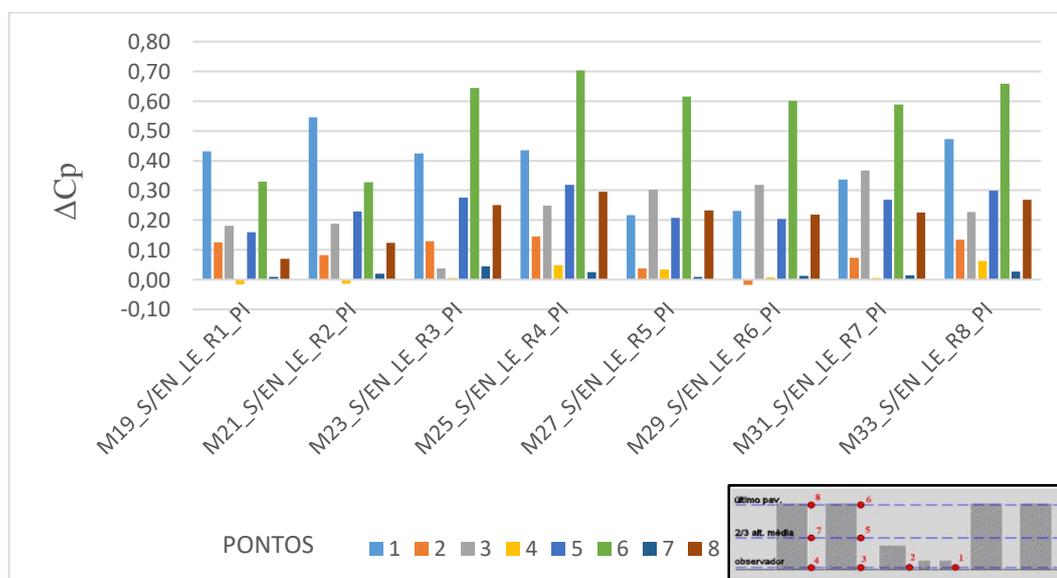


Fonte: Autora (2019).

Tais efeitos ocorreram em todos os modelos com pilotis e com incidência do vento a 90°, como pode ser verificado na tabela 20 e no quadro contido no apêndice C.

5.4.1 Análise dos coeficientes de pressão (C_p) nos modelos com pilotis e com incidência a 90° (leste).

Figura 116 - ΔC_p dos modelos com pilotis e vento a 90° (leste).



Fonte: Autora (2019).

A análise das diferenças dos coeficientes de pressão a barlavento e a sotavento revelou que o modelo M19_S/EN_LE_R1_PI seguido do modelo M21_S/EN_LE_R2_PI foram os cenários que apresentaram os menores valores de ΔCPs , (-0,02 a 0,43 e -0,01 a 0,55, respectivamente). Seus melhores resultados ficaram restritos apenas aos pontos 1 (posicionados mais a barlavento), e aos pontos 6 (mais distantes do solo e livre de obstrução a sua frente), como pode ser observado na Figura 116.

O cenário M25_S/EN_LE_R4_PI apresentou os pontos com maiores diferença de pressão (0,05 a 0,70), constituindo, para essa configuração, o cenário com melhor potencial para a utilização da ventilação natural como estratégia passiva de conforto térmico, já que possibilitaria maximizar o fluxo de ar para o interior das edificações (Figura 115).

A variação da altura dos edifícios contribuiu para oscilações significativas na distribuição de pressão especialmente nos pontos 1, 3, 5, 6, e seus respectivos pontos a sotavento. O ponto 6 registrou o maior campo de pressão na maioria dos cenários por estar mais distante do solo e livre de obstrução a sua frente, o que fortaleceu os fluxos de ar perto desse edifício mais alto. Já o ponto 8, apesar de se encontrar na mesma altura do anterior, apresentou variações de pressões menos significativas. Isso confirma que a heterogeneidade nas alturas associada a maiores afastamentos resultaram na obtenção de diferentes distribuição de pressões e conseqüentemente na melhor captação do fluxo do ar, sob a incidência de vento normal ao arranjo estudado.

A partir dos resultados alcançados para os modelos com pilotis e vento a 90°, é possível estabelecer um resumo dos principais resultados, conforme Tabela 21.

Tabela 21 - Resumo dos principais resultados. Modelos com Pilotis e vento a 90°.

Mod	Característica	Resultado	Discussão
M21	R2/ com pilotis / 90°	Menores velocidades do vento – 0,13m/s a 0,78 m/s.	Os pontos com menor velocidades foram os localizados junto às fachadas dos edifícios mais a sotavento, inclusive nos pontos mais distantes do solo (pontos 3, 4, 6, 7 e 8, exceto no ponto 5).
M29	R6 /com pilotis / 90°	Maiores velocidades do vento– 0,31m/s a 1,68m/s.	Edifícios com recuos de dimensão (acréscimo de 75% em todos os recuos iniciais), com variação de alturas que chegaram até 64 m (25 pavimentos).
M21 x M29	R2/ com pilotis / 90° x R6 /com pilotis / 90°	Diferenças de 8% a 138% - a 1,5m do solo; Diferenças de 24% a 170% - nos pontos mais distantes do solo.	Comparação entre o pior e melhor resultado, para os modelos com pilotis e vento a 90°.
M29 x M28	R6 / com pilotis / 90° x R6 / sem pilotis / 90°	Menores velocidades no M29 (redução de 13% a 36%).	O vento ao entrar em contato com o edifício, segue um fluxo descendente e atinge o ponto de análise, em seguida cria-se um redemoinho que faz com que o vento siga pelas laterais do edifício.
M31 x M30	R7 / com pilotis / 90° x R7 / sem pilotis / 90°	Menores velocidades no M31 (redução de 13% a 47%).	
M19, M21, M23, M25, M27, M29, M31 e M33	R1 a R8 / com pilotis / 90°. Pontos 9,10 e 11 x Pontos 1, 3 e 4.	Maiores velocidades do vento nos pontos 9, 10 e 11. Diferenças de até 37%, 113% e 175%.	Ponto 9 - ocorre o efeito de pilotis, onde há a saída do vento em jatos de grande intensidade; Ponto 10 e 11 - o vento que atinge a fachada desce e em seguida tem a sua saída desobstruída pelo pilotis.
M19 e M21	R1 e R2 /com pilotis / 90°	Menores diferenças de CP (-0,02 a 0,43) e (-0,01 a 0,55), respectivamente.	Campos de pressão favoráveis à captação do vento apenas nos pontos 1 (barlavento) e 6 (livre de obstrução).
M25	R4 /com pilotis / 90°	Maiores diferenças de de CP (-0,05 a 0,70)	A heterogeneidade nas alturas associada a maiores afastamentos resultaram na obtenção de diferentes distribuição de pressões e conseqüentemente na melhor captação do fluxo do ar.

Fonte: Autora (2019).

5.5 Análise do grau de adensamento dos cenários

Analisou-se o grau de adensamento dos cenários estudados que apresentaram os resultados mais significativos, a partir dos parâmetros da forma desenvolvidos por Grimond e Oke (1999) para as cidades, já citados no item 2.3.1. Utilizou-se neste estudo o índice da área plana $\lambda_p = AP/AT$ e o índice da área frontal $\lambda_f = AF/AT$. Onde AT é igual a área total em planta da superfície analisada, AP é a área de projeção dos edifícios em planta e AF é a área total das fachadas voltadas para o vento dominante.

A partir dos resultados apresentados pôde-se constatar a relação direta da porosidade em planta com o melhor desempenho da distribuição da ventilação natural nos cenários em estudo, pois quanto menor o índice da área plana (λ_p) maior é a porosidade do arranjo na seção horizontal. Pôde - se ainda observar que os modelos que apresentaram os maiores registros de ventilação natural nos pontos mais distantes do solo foram os que apresentaram os maiores índice da área frontal (λ_f), conforme pode ser visto na Tabela 22.

Tabela 22 - Grau de adensamento dos modelos com resultados mais significativos.

MODELOS	PARÂMETROS DA FORMA	
	λ_p	λ_f
M01 S/E SE R1 SPI	27%	22%
M03 S/E SE R2 SPI	29%	21%
M04 S/E SE R2 PI	29%	21%
M08 S/E SE R4 PI	15,50%	41%
M11 S/E SE R6 SPI	20%	36%
M15 S/E SE R8 SPI	14%	28%
M18 S/E LE R1 SP1	27%	10%
M21 S/E LE R2 PI	29%	10%
M28 S/E LE R6 SP1	20%	15%
M29 S/E LE R6 PI	20%	15%

Fonte: Autora (2019).

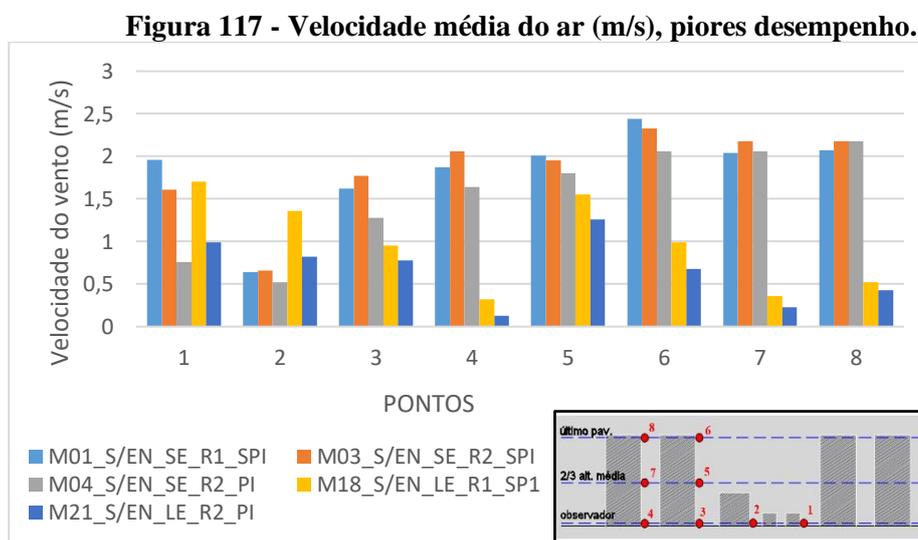
Vale salientar que o λ_f representa a densidade de rugosidade na seção vertical, onde é computado a área integrada de cada fachada do arranjo voltada para o vento dominante. Sendo assim, para os cenários investigados, os modelos que apresentaram edifícios com maiores alturas resultaram em maiores valores do λ_f . Tais resultados reforçam o que afirma Givoni (1998), que malhas urbanas mais densas, mas com variação na altura dos edifícios, podem contribuir para uma melhor ventilação urbana, se comparada a áreas urbanas de menor densidade e com edifícios de mesma altura. A integração de um edifício mais alto no tecido

com outros de menor altura contribui para uma melhoria da taxa de renovação do ar em níveis mais baixos.

5.6 Análise dos principais resultados encontrados

A partir dos resultados encontrados nos quatro blocos de análise, é possível tecer algumas considerações:

Em relação a velocidade do vento, de um modo geral, os cenários simulados com a incidência do vento a 90° foram os que obtiveram as menores intensidades, na condição com e sem pilotis. Seus melhores desempenhos foram registrados apenas nos pontos 1 e 2, por estarem posicionados mais a barlavento. A pior situação foi registrada no cenário M21_S/EN_LE_R2_PI, modelada a partir do cálculo dos recuos acrescidos de 25% nos recuos mínimos laterais e posterior e de tipologia de edifícios com pilotis, com velocidades do vento entre 0,13 m/s a 1,26 m/s (Figura 117).



Fonte: Autora (2019).

Dentre os cenários que apresentaram os melhores desempenhos, os resultados obtidos indicaram que a incidência do vento a 135° produziram as maiores velocidades de vento nos oito pontos de interesse. A exceção ocorre apenas no ponto 2 onde o modelo M28_S/EN_LE_R6_SPI apresentou velocidade superior aos demais (Figura 117).

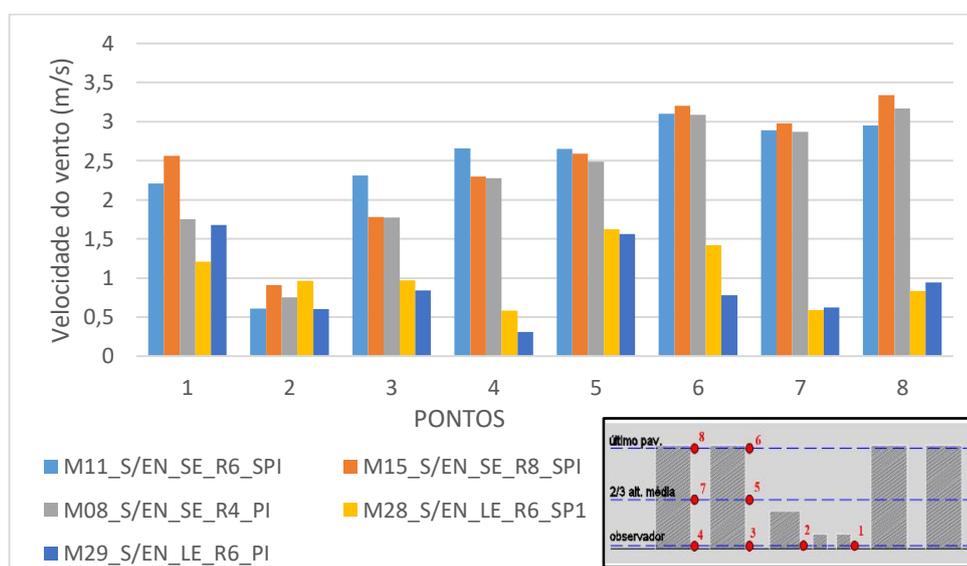
Ou seja, para essa tipologia de arranjo urbano estudada, composta por edifícios com três alturas distintas, mas cuja a heterogeneidade de altura se concentra na região central, seus

maiores desempenhos foram registrados ao se considerar o vento com incidência oblíqua às fachadas dos edifícios estudados.

Dentre os 32 modelos analisados no presente trabalho, os cenários constituídos a partir do cálculo com recuos mínimos iniciais acrescidos de 75% - R6 (M11_S/EN_SE_R6_SPI, M28_S/EN_LE_R6_SPI, M29_S/EN_LE_R6_PI) ficaram entre as cinco melhores performances, como indica a figura 118.

Ao considerar a altura a 1,5 m do solo, o modelo M11_S/EN_SE_R6_SPI foi o que registrou as maiores velocidades do vento, na ordem de 2,66 m/s. Na altura intermediária e no eixo da janela do último pavimento, o modelo M15_S/EN_SE_R8_SPI foi o que obteve as maiores magnitudes do vento, que variaram de 2,59 m/s a 3,34 m/s (figura 118). Ambos foram modelados com tipologia de edifícios sem pilotis e incidência do vento a 135°.

Figura 118 - Velocidade média do ar (m/s), melhores desempenhos.



Fonte: Autora (2019).

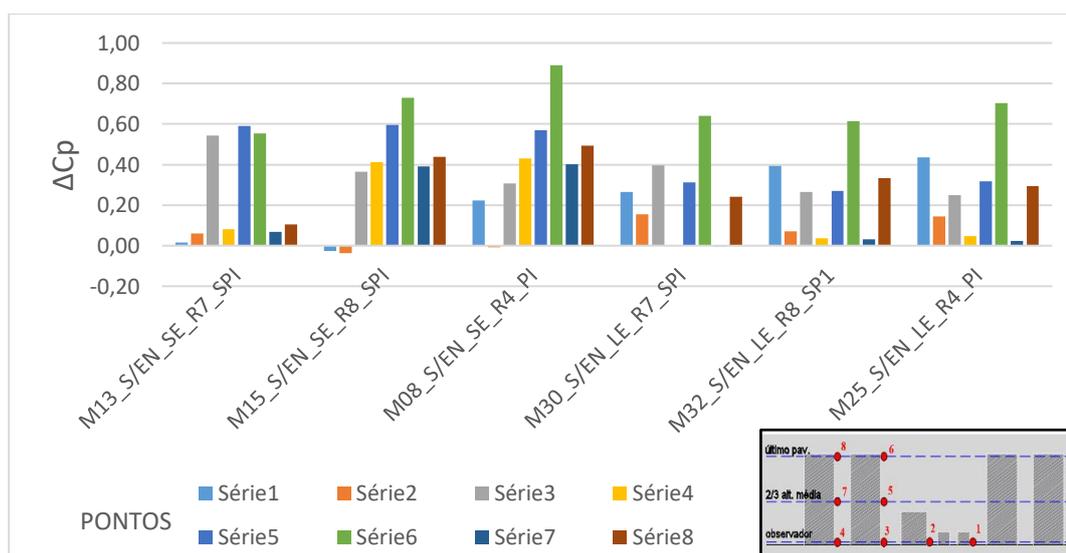
Dentre os cenários constituídos por edifícios com pilotis, o modelo que registrou as maiores velocidades foi o M8_S/EN_SE_R4_PI (com acréscimo de 25% em todos os recuos mínimos iniciais). Já o modelo M29_S/EN_LE_R6_PI construído com recuo R6, e com incidência a 90°, apresentou as menores magnitudes de vento, que ficaram entre 0,31 m/s a 1,68 m/s (Figura 118).

Ainda em relação aos pilotis, verificou-se que seus espaços vazados só resultaram na melhora do desempenho da ventilação no nível do pedestre quando considerado a incidência

à 90° (leste), ou seja, sua eficiência só foi alcançada quando a malha do arranjo estava voltada para a direção do vento dominante, o que possibilitou que o fluxo de ar penetrasse essa região do pilotis com velocidades mais altas. Todavia nos cenários cuja incidência do vento foi oblíqua ao arranjo, o fluxo do vento ocorreu em maior intensidade através da sua canalização por entre os edifícios, o que contribuiu para maiores registros de velocidades nos pontos localizados na massa edificada do pilotis.

Os cenários urbanos formados por edifícios mais baixos resultaram em menores valores de ΔC_p como indicado na figura 117 e no conjunto de dados já apresentados anteriormente. O que se viu foram as variações de pressões se comportarem como o esperado, ratificando que o modelo M15, modelado com edifícios de 6, 12 e 30 pavimentos, seguido pelo modelo M8 (constituído por edifícios de 4, 11 e 30 pavimentos) seriam os cenários que apresentaram maior potencial para o aproveitamento da ventilação natural, especialmente junto aos edifícios de maior altura, conforme Figura 119.

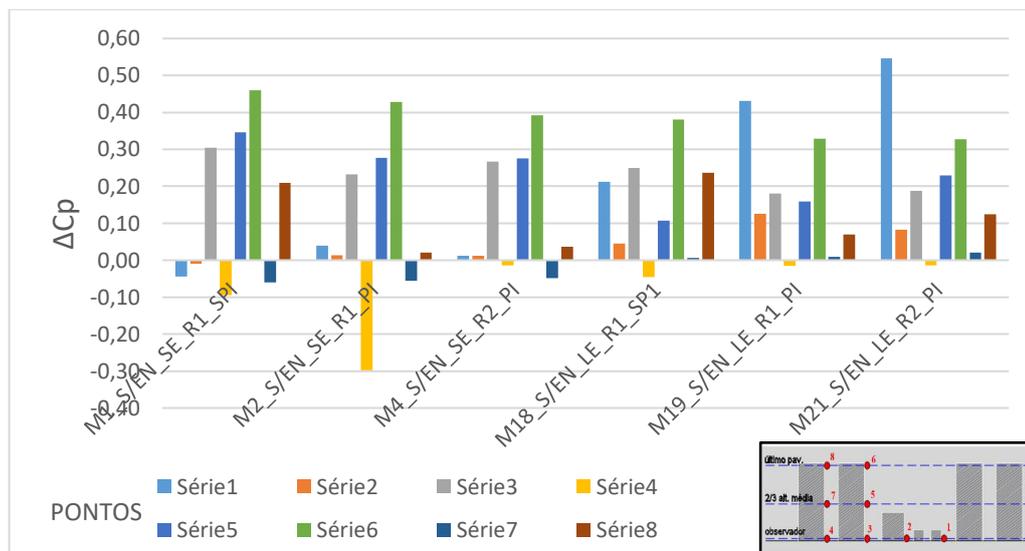
Figura 119 - Variação do ΔC_p nos pontos de interesse dos cenários analisados - melhores desempenhos.



Fonte: Autora (2019).

Percebe-se ainda que os melhores ΔC_p s foram obtidos nos modelos com incidência de vento a 135°, alcançando mais de 169% no ponto 6 do modelo M15 em relação ao modelo M2, que apresentou os menores valores de ΔC_p s (figuras 119 e 120).

Figura 120 - Variação do ΔC_p nos pontos de interesse dos cenários analisados - piores desempenhos.

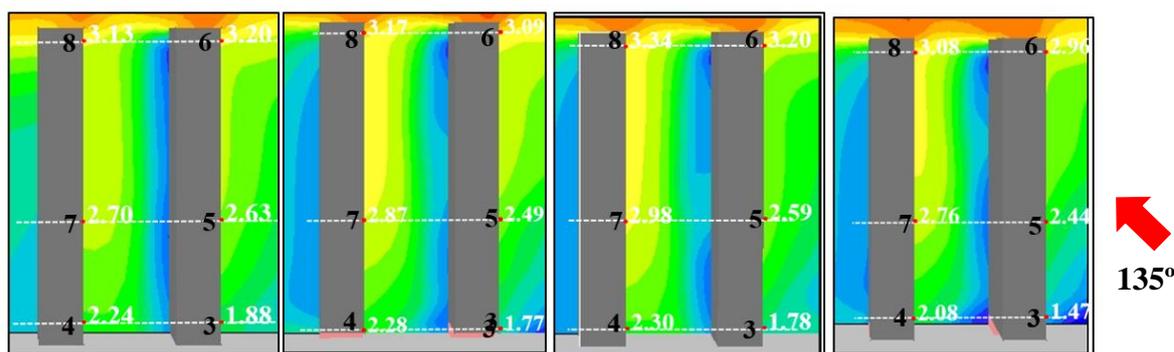


Fonte: Autora (2019).

A discussão dos resultados em cada seção de análise apontam ainda que os cenários com menores índice de área plana (λP), ou seja, maior porosidade em planta, foram os que obtiveram as maiores velocidades do vento além de maiores diferenças de coeficientes de pressão (ΔC_p) nos pontos de interesse, ainda que apresentassem níveis mais elevados de adensamento urbano por meio da verticalização.

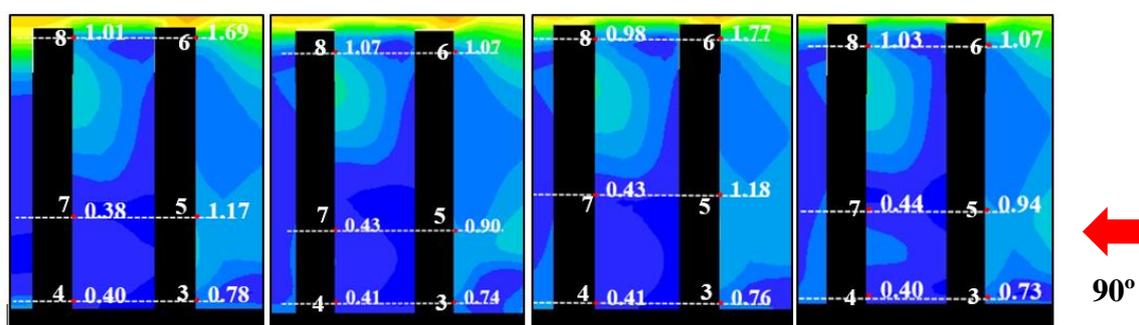
Quanto aos efeitos da verticalização, a partir dos resultados encontrados, é possível perceber que nas fachadas dos edifícios mais altos foram registrados as maiores velocidades do vento, em função da distância do solo. Contudo, o comportamento do vento se diferencia ao se levar em conta a posição do edifício em relação à direção do vento e ao seu entorno imediato. Quando se fala dos cenários que estão sob a incidência do vento sudeste (M7_S/EN_SE_R4_SPI, M15_S/EN_SE_R8_SPI, M8_S/EN_SE_R4_PI, M16_S/EN_SE_R8_PI), verificou-se que os pontos 4, 7 e 8 registraram velocidades do vento de 3% a 29% maiores do que nos pontos 3, 5, e 6, sendo esta diferença mais significativa nos pontos mais próximos ao solo. Já nos cenários com a incidência do vento leste (M24_S/EN_LE_R4_SPI, M32_S/EN_LE_R8_SPI, M25_S/EN_LE_R4_PI e M33_S/EN_LE_R8_PI), a situação se inverte, são os pontos 3, 5 e 6 (mais a barlavento e com menores obstruções) que registraram as maiores velocidades, com diferenças de até 68% em relação aos pontos 4, 7 e 8, estando localizadas as maiores diferenças na altura intermediária (Figuras 121 e 122).

Figura 121 - M7_S/EN_SE_R4_SPI, M15_S/EN_SE_R8_SPI, M8_S/EN_SE_R4_PI, M16_S/EN_SE_R8_PI - Modelos cujo a canalização e fluxo descendente do ar contribuiu para maiores velocidades nos pontos 4, 7 e 8.



Fonte: Autora (2019).

Figura 122: M24_S/EN_LE_R4_SPI, M32_S/EN_LE_R8_SPI, M25_S/EN_LE_R4_PI e M33_S/EN_LE_R8_PI - Modelos cujo a heterogeneidade do entorno a barlavento resultou em maiores velocidades nos pontos 3, 5 e 6.



Fonte: Autora (2019).

Desta forma, conclui-se que para os cenários com incidência de vento leste, a heterogeneidade da parte central do arranjo contribuiu para uma maior captação do vento nos edifícios que contêm os pontos 3, 5 e 6. Já nos cenários com incidência de vento sudeste, embora o edifício que contém os pontos 4, 7 e 8 tenha em seu entorno edifícios de mesma altura, o fluxo do vento ocorre de forma descendente e é canalizado por entre a sua via, resultando em maiores velocidades, em relação aos pontos anteriormente citados. Para Luo e Li (2011), esse fenômeno em arranjos verticalizados faz com que o ar na parte mais baixa do cânion urbano seja renovado, e consequentemente as temperaturas sejam mais baixas nessa região.

5.7 Análise estatística dos dados

Neste item foi realizada a análise estatística dos dados trabalhados na presente tese, a partir da regressão múltipla, a fim de verificar se as variáveis pré-definidas foram capazes de prever o comportamento da ventilação natural, e qual o nível de influência de cada uma.

Tais variáveis foram organizadas conforme Tabela 15 contida no item 4.5, e o software utilizado para essas análises estatísticas foi o Statistica, versão 7.

5.7.1 A influência das variáveis para o desempenho da ventilação natural

Ao analisar a Tabela 23, é possível comprovar que o resultado da amostra utilizada para a presente tese nos dá evidências estatísticas de relação entre as variáveis com a variação da velocidade do vento. Os valores do coeficiente de correlação (R^2) e do coeficiente de correlação ajustado (R^2 ajustado), 0,6215 e 0,6155, respectivamente, indicam uma relação moderada entre as variáveis.

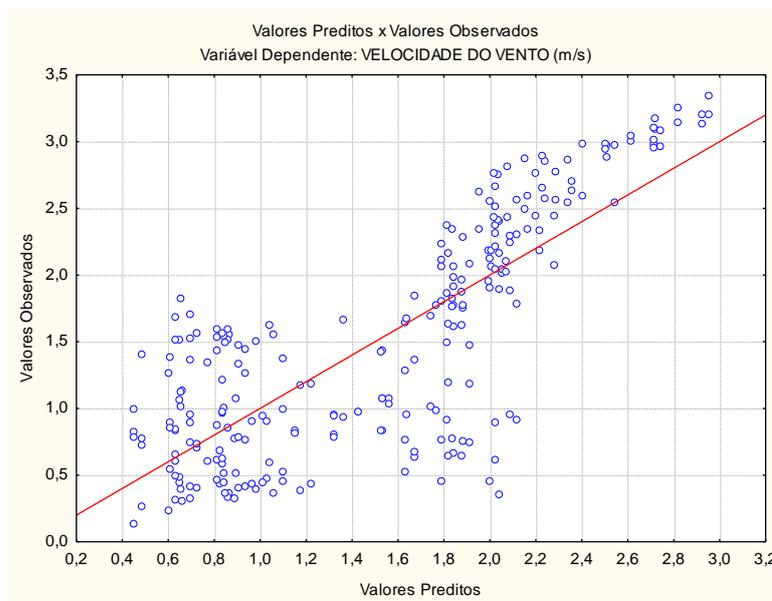
Tabela 23 - Coeficientes do modelo de regressão.

Valor de R^2 : 0,6215 e R^2 ajustado: 0,6155					
	VARIÁVEL	Coeficiente padronizado (Beta)	Coeficiente não padronizado (B)	Teste - t	Valor - p
	Intercept*		1,66	10,96	0,00
Var.02	LOCALIZAÇÃO	0,32	0,01	8,20	0,00
Var.03	ÍNDICE ÁREA PLANA (λp)	-0,10	-0,01	-2,67	0,01
Var.04	ORIENTAÇÃO	0,69	0,59	17,81	0,00
Var.05	PILOTIS	0,12	0,10	3,13	0,00

***B0** de uma reta. Valor que representa o ponto onde a reta cruza o eixo de y.

Fonte: Autora (2019).

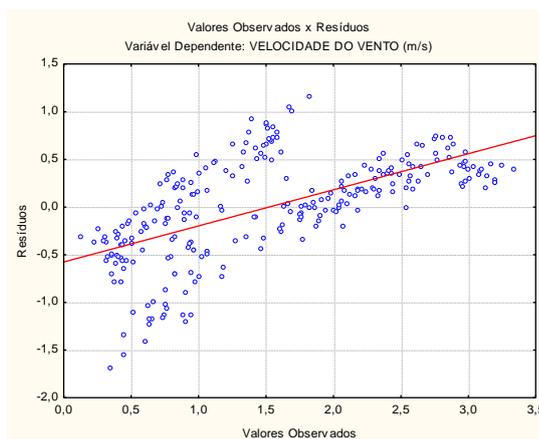
Um outro fator que indica essa evidência de relação entre as variáveis é o valor - p (que é a probabilidade de significância), que se apresentou menor do que 0,05. Um valor - p menor do que 5% indica que a probabilidade é nula de se obter um valor de estatística de teste igual ao valor observado (sem predictor), conforme pode se observado na Tabela 23.

Figura 123 - Gráfico Valores Preditos x Valores Observados.

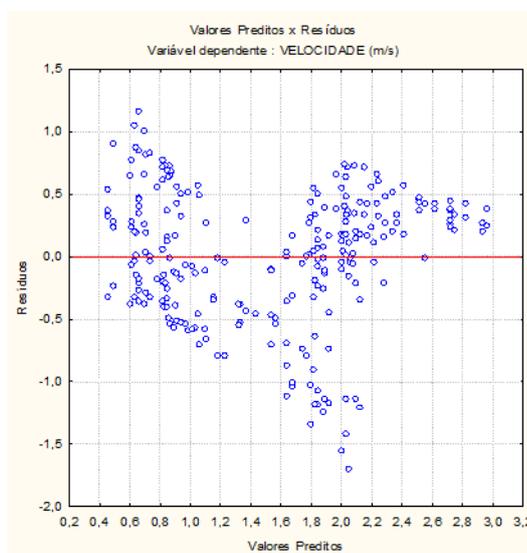
Fonte: Autora (2019).

A Figura 123 contém o gráfico da relação valores preditos x valores observados e indica quanto os valores do modelo estatístico estão se distanciando dos valores observados. Observa-se uma tendência de maior variabilidade nos pontos localizados na região que apresentou os valores mais baixos de velocidades do vento. Para os modelos com orientação do vento a 135° , a região de maior estagnação do ar localizou-se nos pontos mais próximos ao solo. Já para os modelos com orientação do vento a 90° , as menores velocidades foram nos pontos situados junto às fachadas dos edifícios a sotavento. Ambas situações apresentaram zonas mais turbulentas nessas regiões, o que possivelmente contribuiu para essa maior variabilidade, já que o escoamento turbulento é caracterizado pelo movimento aleatório das partículas.

Vale salientar que os dados de velocidades do vento gerados nas simulações já traz consigo alguns ajustes nos modelos, devido às simplificações necessárias para o processamento dos dados e isso também contribuiu para uma maior variabilidade.

Figura 124 - Gráfico valores observados x resíduos.

Fonte: Autora (2019).

Figura 125 - Gráficos valores preditos x resíduos.

Fonte: Autora (2019).

A distribuição dos resíduos em relação ao eixo 0 (resíduo nulo) indica a existência de uma aleatoriedade, o que para a estatística é visto como um aspecto positivo, pois significa que o modelo estatístico não apresentou nenhum vício, e que também não ocorreu nenhum indicativo de que alguma variável induziu o experimento ao erro (Figuras 124 e 125).

Os resultados estatísticos contidos na tabela 23 indicam que a variável orientação do vento foi o preditor mais forte (mais relevante) para prever o resultado da velocidade do vento. Isso ratifica o que já havia sido exposto nas análises paramétricas, onde foi constatado

a forte interferência do ângulo de incidência na magnitude das velocidades do vento, onde o modelos sob o efeito da ventilação sudeste apresentaram os melhores desempenhos.

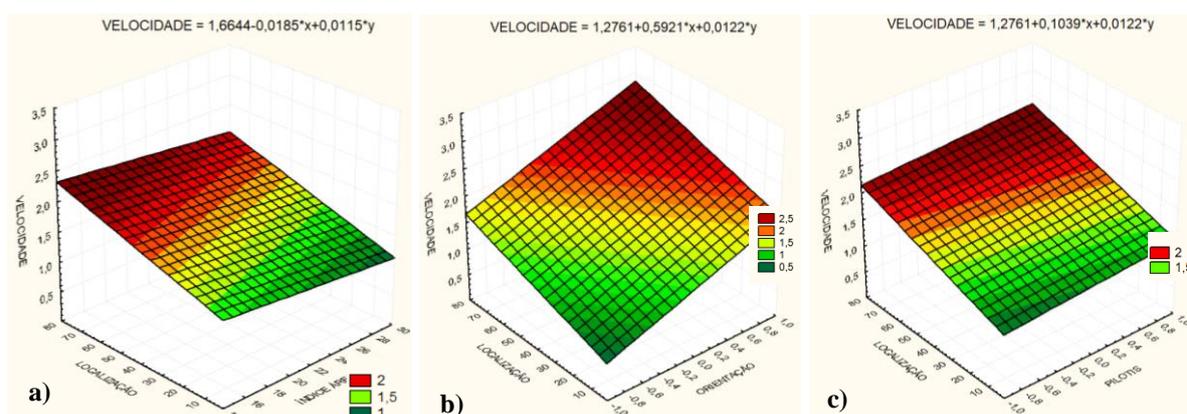
Em substituição à variável recuo (já explicada no item 4.5), utilizou-se o parâmetro índice de área plana (λp), e constatou-se que essa variável pesou negativamente na velocidade do vento, o que significa que quanto maior o valor deste índice menor foi a velocidade do vento (Tabela 23). Esse efeito negativo corrobora as proposições encontradas na literatura e também na presente tese, pois o λp é inversamente proporcional a porcentagem de porosidade construtiva em planta, ou seja, quanto maior tal índice menor será essa porosidade.

A partir das superfícies de respostas apresentadas nas Figuras 126 e 127, é possível verificar as interações de duas variáveis independentes e o seu efeito resultante para a velocidade do vento.

Ao comparar o efeito da localização dos pontos de interesse com o λp , observou-se que ao diminuir o seu valor do mesmo índice mantendo a localização a 1,5 m do solo, ocorreu um aumento da velocidade do vento e essa melhora foi ainda mais significativa a medida que os pontos de interesse se distanciaram do solo (Figura 126-a).

Verifica-se que a relação entre a localização dos pontos e a orientação do vento foi ainda maior. Ao considerar a orientação sudeste (1) com os pontos mais distantes do solo, a ventilação adquiriu a maior intensidade, inclusive se comparada a todas as outras relações. O mesmo ocorreu para a orientação leste (-1), porém em menor magnitude (Figura 126-b)

Figura 126 - Plotagens de superfícies em função da velocidade do vento (m/s). a) localização x λp ; b) localização x orientação; c) localização x pilotis.

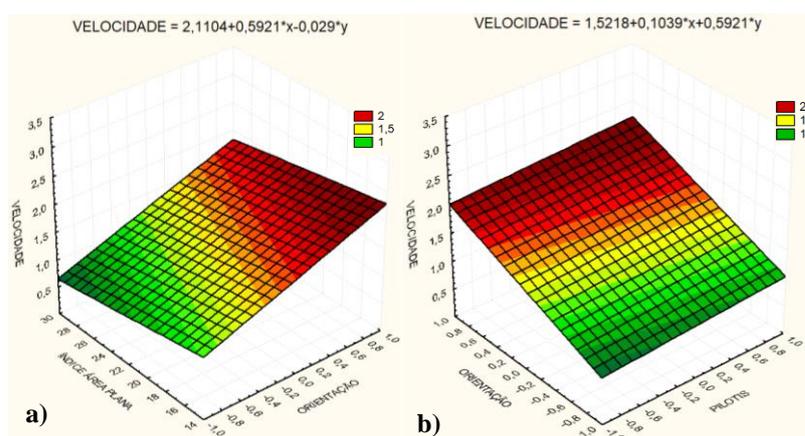


Fonte: Autora (2019).

Como já explicado em seções anteriores, os pontos de interesse localizaram-se junto às áreas obstruídas dos pilotis, e isso certamente contribuiu para subestimar o seu efeito. É tanto que na análise estatística verificou-se que a ausência do pilotis (1) contribuiu para um maior velocidade do vento, independente da localização dos pontos em relação ao solo (Figura 126-c).

A variável orientação do vento ao ser considerada leste (-1) adquiriu maior velocidade quanto menor foi o λp . Porém as maiores intensidades foram alcançadas ao se considerar o vento com orientação sudeste (1), conforme Figura 127-a.

Figura 127 - Plotagens de superfícies em função da velocidade do vento (m/s). a) λp x orientação; b) orientação x pilotis.



Fonte: Autora (2019).

A variável pilotis (-1) desempenhou seu melhor papel quando associada à velocidade sudeste (1), apresentando maiores velocidades do vento. Contudo, ao considerar a orientação leste (-1), as maiores velocidades só foram alcançadas nos modelos sem pilotis, conforme também foi indicado nas análises paramétricas (Figura 127-b).

Diante dos dados apresentados, ao explicar aproximadamente 62% da variabilidade do vento, considera-se que esse experimento apresentou uma relação estatística satisfatória, uma vez que a variável dependente estudada trata-se de um fluido (o vento), elemento de difícil controle que tem a capacidade de se deformar continuamente quando submetido a uma força tangencial constante ou até mesmo diferenças de temperaturas.

Dessa forma, a equação que descreve as relações entre as variáveis através da Análise de Regressão Múltipla é:

(Equação 10)

$$V = B0 + (\text{Localização} \times B.02) - (\lambda p \times B.03) + (\text{Orientação} \times B.04) + (\text{Pilotis} \times B.05)$$

Onde:

V: Variável dependente – velocidade do vento;

B0: Valor que representa o ponto onde a reta cruza o eixo de y; (ver tabela 19).

Localização: Variável independente – altura do ponto em relação ao solo;

λp : Variável independente – índice da área plana;

B: Coeficiente não padronizado; (ver tabela 19).

Orientação: Variável independente – ângulo de incidência do vento;

Pilotis: Variável independente – pilotis.

Diante dos resultados estatísticos apresentados, constata-se que a orientação do vento foi a variável que mais pesou na previsão da velocidade do vento. Em segundo lugar foram as localizações dos pontos de medição que melhor definiu as intensidades das velocidades.

6. CONCLUSÃO

A presente tese teve como objetivo geral avaliar o efeito da porosidade da malha urbana em função de diferentes recuos progressivos, à luz da legislação urbanística da cidade de Maceió-AL vigente desde 2007, associados às alturas dos edifícios e ao uso do pilotis, de modo a potencializar a ventilação natural, tendo como recorte espacial o trecho da planície litorânea da região norte da cidade.

O trabalho analisou diferentes cenários construtivos hipotéticos elaborados a partir de sete propostas de recuos progressivos (além dos recuos estabelecidos na legislação vigente para a região), associadas aos parâmetros pilotis, orientação do vento e alturas dos edifícios. As alturas dos edifícios foram dimensionadas a partir da premissa de se preservar o máximo coeficiente de aproveitamento possível para o recorte espacial escolhido e sem a limitação do gabarito da altura.

Os resultados oriundos das simulações nos forneceu evidências da influência da interação dos parâmetros estudados no comportamento do vento, em contato com os edifícios que compuseram os cenários.

Notadamente, as análises mostraram que os cenários modelados apresentaram-se bastantes sensíveis à orientação do vento, sendo a incidência oblíqua à malha edificada a que promoveu as maiores velocidades de vento.

Pode-se dizer que o elemento construtivo pilotis teve seu desempenho atenuado, uma vez que os pontos escolhidos para captar o registro das velocidades do vento localizaram-se junto às suas áreas edificadas. Somado a isso, destaca-se que os pontos de análises situaram-se na região central dos arranjos, o que seria a área mais afetada pela rugosidade construtiva. Tais fatores contribuíram para que os cenários com pilotis registrassem as velocidades do vento mais baixas, inclusive a 1,5 m do solo.

A escolha de pontos localizados na região desobstruída do pilotis revelou que, para os cenários estudados, o vento em contato com os obstáculos formados pelos próprios edifícios resultaram em efeitos aerodinâmicos que trouxeram melhora apenas no desempenho da ventilação no nível do pedestre quando considerada a incidência normal à malha (90°). Todavia, nos cenários cuja incidência do vento foi oblíqua ao arranjo, o fluxo do vento ocorreu em maior intensidade através da sua canalização por entre os edifícios, o que

contribuiu para maiores registros de velocidades nos pontos localizados na massa edificada do pilotis (destinada à concentrar os equipamentos de circulação vertical - escadas e elevadores). Isso leva a concluir que as áreas de pilotis dos edifícios, para contribuir para a permeabilidade do vento na altura ao nível do pedestre, é necessário que se reserve apenas uma pequena parcela de área para esses equipamentos de circulação vertical (de modo a diminuir a obstrução do vento), e aliado a isto que se avalie a sua localização no edifício, de forma a potencializar essa captação do vento.

De um modo geral, pode-se afirmar que os cenários compostos por edifícios com um número maior de pavimentos apresentaram as maiores velocidades do vento, como também as maiores variações de pressões, o que confirma o potencial para o aproveitamento da ventilação natural. Contudo, o que se viu foi que ao analisar a altura a 1,5 m do solo, o melhor desempenho da velocidade foi registrado em um modelo com recuos acrescidos de 75% e que possuíam edifícios de até 25 pavimentos. Já na altura intermediária e no eixo da janela do último pavimento, as maiores intensidades do vento foram registradas em um modelo com edifícios mais altos (de até 30 pavimentos), mas cujo recuo apresentou apenas 5% de acréscimo no seu valor final.

Para regiões de clima tropical que apresentam fluxos de vento estáveis ao longo do ano e velocidade superior a 3 m/s, a orientação do arranjo em relação aos ventos dominantes é um aspecto de grande importância para proporcionar melhor circulação do vento entre seus edifícios. Além disso, o adequado ajuste dos edifícios à incidência do vento dominante também contribui para corroborar a eficiência de elementos construtivos, a exemplo do pilotis, capaz de melhorar a sua porosidade, e conseqüentemente potencializar o fluxo desse vento.

A porosidade da malha urbana a partir do dimensionamento dos afastamentos representou em melhoras significativas da ventilação, principalmente a nível do pedestre. A sua relação com maiores alturas dos edifícios denotaram também em melhor desempenho nas regiões mais distantes do solo.

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que ao analisar o comportamento do vento em um cenário urbano, diversos fatores podem influenciar o seu desempenho. A relação equilibrada de tais fatores é que vai definir o melhor aproveitamento da ventilação por entre os arranjos construtivos.

Para as variáveis estudadas, percebe-se que os melhores cenários, via de regra, foram os que apresentaram maiores afastamentos, em relação à legislação vigente, bastaria apenas um aumento 5% no seu valor final, associado à uma liberação de altura dos edifícios (que resultaram em edifícios mais delgados), para se promover melhores resultados. No entanto, deve-se destacar que aliado a esses condicionantes está o fato desses arranjos terem apresentados variações nas alturas dos seus edifícios, o que possibilitou dar heterogeneidade aos cenários, contribuindo assim para uma melhor circulação e velocidade do vento.

Diante do exposto, para os casos estudados, bem como arranjos construtivos semelhantes, pode-se destacar algumas recomendações:

- Sugere-se que seja aproveitada a canalização do fluxo do vento através da malha, de modo a assegurar o seu contato sobre as fachadas;

- Dispor a localização das aberturas nas fachadas sempre orientadas para as incidências dominantes do vento, e em especial para a incidência oblíqua;

- Promover a ampliação dos afastamentos entre edifícios, a partir do acréscimo de 5% no recuo final, ou até 75% nos recuos mínimos iniciais Frontal e Lateral/Posterior, contidos na fórmula de recuos progressivos;

- Privilegiar edifícios que contemplem pilotis em seus projetos, porém considerando sempre estudos prévios para definir a melhor localização de sua área construída e volumetria, objetivando a captação da ventilação natural.

- Promover a implantação da verticalização dos edifícios, desde que o planejamento da área resulte em malhas urbanas heterogêneas, a partir de diferentes dimensionamentos de lotes, de modo a melhorar o potencial construtivo destes terrenos.

Vale salientar que para a presente tese foi concentrada apenas a pesquisa da ventilação natural no meio urbano, sendo desconsiderados os efeitos de sombreamento, desempenho térmico e conforto dos usuários. Cabendo a trabalhos futuros a pesquisa de tais condicionantes.

6.1 Limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros

Esta pesquisa foi realizada a partir de simulações computacionais com o programa CFD *Phoenix* na sua versão 2018 v1.0. Para tais simulações, os modelos precisaram ser simplificados, a fim de compatibilizar o tempo de processamento.

Optou-se por considerar os edifícios como modelos selados. Estudos realizados indicam que utilizar modelos fechados para determinar valores de C_p é possível apenas nos casos em que a porosidade do edifício é inferior a 20%.

Para a modelagem hipotética dos cenários urbanos, utilizou-se apenas três dimensões mais recorrentes de lotes: 15 x 30 m, 30 x 30 m e 60 x 80 m;

Foram simuladas as duas incidências de vento mais recorrentes ao longo do ano na cidade de Maceió, restringindo a aplicabilidade dos resultados apenas para tais situações;

As simulações consideraram apenas o valor de velocidade do ar externa de 3,1 m/s (na altura de 10 m do solo), que segundo dados das normais climatológicas do Brasil, do período de 1981-2010, seria o valor médio anual para a região;

Optou-se por descartar as simulações dos cenários que continham as encostas, uma vez que os dados resultantes apresentaram-se com variações que não se permitiu estabelecer uma lógica entre as condições com e sem encosta.

A partir do que foi observado ao longo da pesquisa, algumas sugestões de trabalhos futuros podem ser apontadas:

- Analisar a disposição de outros desenhos de arranjos construtivos, considerando a aplicação dos recuos que obtiveram os melhores resultados na pesquisa;

- Estudar outras disposições e configurações de pilotis no edifício, de maneira que o fluxo de ar seja potencializado pela maior permeabilidade entre as construções;

REFERÊNCIAS

- ALLEGRI, J.; DORER, V.; CARMELIET, J. Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons. **Building and Environment**. v. 59, p. 315 - 326, 2013.
- AMARAL, D. de O.; ASSIS, E. S. de. Impacto da variação de altura de edificações em modelos urbanos teóricos para estudos de ventilação natural em edificações residenciais. In: III CLIV – III CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ENGENHARIA DO VENTO, 2018, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPT, 2018. v. 1, p. 169 -174.
- ASHLEY, S.; SHERMAN, M. **The calculation of natural ventilation and comfort**. In: ASHRAE Transactions. v.90. Part 1B, Atlanta, 1984.
- ASHRAE. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, R. A. A.-C. E. Atlanta 2003.
- ASSIS, E. S. de. **A abordagem do clima urbano e Aplicações no planejamento da cidade: Reflexões sobre uma trajetória**. In: ENCAC – VIII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió, AL; In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió, AL, 2005.
- ASSIS, E. S. de. Bases teóricas para a aplicação da climatologia ao planejamento urbano. In: ENCAC – IV ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: FAUFBA / LACAM – ANTAC, 1997. v. 1, p. 134 -139.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 15220**: Desempenho térmico para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2013.
- AYNSLEY, R. M. M.; MELBOURNE, W.; VICKERY, B. J. **Architectural aerodynamics**. Applied Science Publishers Ltd, London, 1977.
- AYNSLEY, R. Estimating summer wind driven natural ventilation potential for indoor thermal comfort. **Journal of wind Engineering and industrial aerodynamics**. v.83, 1999.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**: Tradução Maria Juraci Zani dos Santos, revisão Suely Bastos, DIFEL, São Paulo, 1986. 321p.
- BARBIRATO, G. M. **Aplicação do modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano de Maceió - AL**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- BITTENCOURT, L. S.; CRUZ, J. M.; D. G. F. LÔBO. **A influência da relação entre taxa de ocupação X n° de pavimentos no potencial de ventilação natural dos ambientes**

internos e externos. In: ENCAC – IX ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1997, Salvador, BA, 1997.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural.** Maceió: EDUFAL, 2005.

BITTENCOURT, L; MONTEIRO, L. M; YANNAS, S. Arquitetura da adaptação. In: GONÇALVES, J. C. S.; KLAUS, B., Org. **Edifício Ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, p. 27 – 55, 2015.

BODHISATTA, H. A Review of Some Recent Studies on Buoyancy Driven Flows in an Urban Environment. **International Journal of Atmospheric Sciences.** v. 2014, p. 15–15, 2014.

BOTTEMA, M. Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion. **Atmospheric Environment.** V. 31, p. 3059–3075, 1997.

BOTTEMA, M; MESTAYER, P. G. Urban roughness mapping: Validation techniques and some first results. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.** V. 74 – 76, p. 163 – 173, 1998.

BRANDÃO, R. S. **As interações espaciais urbana e o clima:** incorporação de análises térmicas e energéticas no planejamento urbano. Tese (Doutorado em Arquitetura) – FAUUSP/ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo / Programa de Pós-graduação em Arquitetura, São Paulo, 2009.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas 1981-2010.** Brasília, INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: janeiro, 2018.

BRE – Building Research Establishment. Principles of Natural Ventilation. **BRE Digest,** n.210. BRE, Garston, 1978.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos.** São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2 ed, 2008.

BRUSE, M. **ENVI-met 4.0 Updated Model Overview. 2015.** Disponível em: <<http://www.envi-met.com/#section/intro>>. Acesso em: Novembro, 2015.

CABUS, Ricardo Carvalho. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil.** Thesis (Doctor of Philosophy). School of Architectural Studies. University of Sheffield. 2002.

CÂNDIDO, C. M. **Ventilação natural e códigos de obras:** Uma análise das tipologias de aberturas nos edifícios de escritórios em Maceió - AL. Maceió, 2006. Dissertação (Mestrado de Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CARLOS, A. F. A. **O espaço urbano: novos escritos sobre a cidade.** São Paulo: Contexto, 2004.

CARRILHO DA GRAÇA, G.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L.R.; NORFORD, L. K. Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai. **Energy and Buildings** v. 34, p. 1 – 11, 2002.

CARVALHO, M. L. S. **Eficiência da luz solar refletida e desempenho de dispositivos de sombreamento**: Estudo para salas de aula na cidade de Maceió. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

CHAM. **Experts in CFD Software and Consultancy**. Disponível em: <<http://www.cham.co.uk/about.php>>. Acesso em: 31/12/2017.

CHAM. **Practical CFD for design engineers**: From the pioneers of CFD. 2005.

CHAVES, J. R. G; FREIXANET, V. F. **Arquitectura Bioclimática y energia solar**. México: Universidad Autonoma Metropolitana, 1985.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building and Environment**. V 44(4), p. 848 – 858, 2009.

CHEN, S. L.; LU, J.; YU, W. W. A quantitative method to detect the ventilation paths in a mountainous urban city for urban planning: A case study in Guizhou, China. **Indoor and Built Environment**, v. 26 (3), p. 422–437, 2017.

CHENG H, CASTRO I.P. **Near wall flow over urban-like roughness**. Boundary-Layer Meteorol 104:229–259, 2002.

CHEUNG, J. O. P.; LIU, C. CFD simulations of natural ventilation behaviour in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings. **Energy and Buildings**. v. 43, p. 1149–1158, 2011.

CHOW, w. k. Wind-induced indoor-air flow in a high-rise building adjacent to a vertical wall. **Applied Energy**, v. 77, p. 225–234, 2004.

CLARK, G. **Passive cooling systems**. Chapter 6 of passive cooling. Cook, J. Cambridge: MIT Press, 1989.

COSTA, F. J. de M. **Ventilação e prescrições urbanísticas**: Uma aplicação simulada no bairro de Petrópolis em Natal / RN. Dissertação (Mestrado - em Arquitetura e Urbanismo) / PPGAU - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001.

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

CRUZ, J. M. **Sustentabilidade do ambiente construído**: Conservação de energia através do uso da ventilação natural como forma de refrigeração passiva do ambiente urbano. Dissertação (Mestrado – em Desenvolvimento e Meio Ambiente) / PRODEMA - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2001.

CRUZ, M. DE S.; BARBOSA, R. V. R. **Análise comparativa entre a atuação dos ventos alísios de sudeste e ventos alísios de nordeste na malha urbana do bairro de ponta verde, em maceió-al**. In: ENCAC – XIII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO

AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2015, Campinas, SP; In: IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2015, Campinas, SP, 2015.

CUMPLIDO NETO, R. H.; TIBIRIÇA, A.M.B.; TIBIRIÇA, A. C. G. CAMPOS, J. C. C. **Um roteiro para simulação CFD de ventilação natural por ação dos ventos em edificações.** In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Búzios, RJ. 2011.

DELEUZE, G.; GUATTARI, F. *Mil Platôs: Capitalismo e esquizofrenia 2*, São Paulo: Editora 34, V.5, 2ª ed., 2011.

DI SABATINO, S.; SOLAZZO, E.; PARADISI, P.; BRITTER, R. A simple model for spatially-averaged wind profiles within and above an urban canopy. **Boundary-Layer Meteorol** 127:131–151, 2008.

DUARTE, D. O clima urbano e o ambiente construído. In: GONÇALVES, J. C. S.; KLAUS, B., Org. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 155 – 179, 2015.

EDWARDS, B. **O guia básico para a sustentabilidade.** ESPASANDIN, C. A / Itinirário Editorial Ltda. (trad.) Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS). Disponível em: <http://www.esss.com.br> Acesso: dezembro, 2018.

ESSS - Engineering Simulation and Scientific Software. **Métodos dos elementos finitos: o que é?** Disponível em: <<http://www.esss.com.br/blog/2016/01/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 02/01/2018.

FARAH, F. **Habitação e encostas.** São Paulo: Coleção Habitare, 2003. (Publicação IPT; 2795).

FERREIRA, D. G. **O uso do solo e os padrões de vento: O caso da cidade de Belo Horizonte, MG.** Dissertação (Mestrado – em Ambiente construído e patrimônio sustentável) / Escola de Arquitetura - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2009.

FREITAS, R. **Entre mitos e limites: As possibilidades do adensamento construtivo face à qualidade de vida no ambiente urbano.** Tese (Doutorado em Arquitetura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GANDEMER, J. (1978). **Discomfort due to wind near buildings aerodynamic concepts.** Washington: U.S. Govt. Print. Of.

GANDEMER, J.; BERNAUD, G. **Ventilation dès habitations sous Climat Tropical Humide: Approach Aerodynamique.** Report for the CSTB, Nantes, 1989.

Givoni, B. **Climate Considerations in building and urban design.** Canada: Copyright by John Wiley & Sons, 1998.

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture.** Applied Science Publishers Ltd. London, 1976.

GOMES, P. S.; LAMBERTS, R. O Estudo do Clima Urbano e Legislação Urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros, MG. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.9, n. 1, p. 73-91, jan./mar. 2009.

GONÇALVES, J. C. S. ROMERO, M. de A. **O debate da verticalidade e o novo protótipo do edifício alto no projeto Millennium Tower, Londres**. In: ENTAC – IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, PR, 2002.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. The environmental value of buildings: a proposal for performance assessment with the reference to the case of the office tall building. In: Innovation. **The European Journal of Social Sciences** (versão eletrônica). Routledge, Taylor and Francis, 2011.

GONÇALVES, J. C. S.; ROMERO, M. de A. **O debate da verticalidade e o novo protótipo do Edifício alto no projeto Millennium Tower, Londres**. In: ENTAC – IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, PR, 2002.

GONÇALVES, J. C. S.; MELLO, M.; MIANA, A. C.; ROSA, M. L. Edifícios altos e forma urbana. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. Org. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 181 – 221, 2015.

GONÇALVES, J.; MULFARTH, R. K.; MONTEIRO, L. M.; MOURA, N. C.; PRATA, A. R.; MIANNA, A. C.; CAVALCANTE, R. Adensamento urbano e desempenho ambiental no centro da cidade de São Paulo. In: ENCAC – XI ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2011, Búzios, RJ; In: VII ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2011, Búzios. *Anais...* Búzios: FAUFRJ, 2011.

GRIMMOND, C; OKE, T. Aerodynamic properties of urban áreas derived from analysis of surface form. **Journal of Applied Meteorology**. v. 38, p. 1262-1292, 1999.

HAGISHIMA, A; TANIMOTO, J; NAGAYAMA, K; MENO, S. Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries. **Boundary-Layer Meteorology** v. 132, p. 315–337, 2009.

HAJRA, B. A Review of Some Recent Studies on Buoyancy Driven Flows in an Urban Environment. **International Journal of Atmospheric Sciences**, v. 2014, 15p, 2014.

HANG, J.; SANDBERG, M.; LI, Y. Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models. **Atmospheric Environment**. v. 43, p. 869–878, 2009.

JIANG, Y.; CHEN, Q. Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation. **Building and environment**, v. 37, p. 379 -386, 2002.

KANDA M. Large-eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures. **Boundary-Layer Meteorol** 118:151–168, 2006.

KARAM, H. A.; OLIVEIRA, A. P. E.; SOARES, J. Application of Mass Conservation Method to Investigate the Wind Patterns over an Area of Complex Topography. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas**, v. 25 (2), p.107-113, 2003.

- LAM, K. M.; Leung, M. Y. H.; Zhao, J. G. Interference effects on wind loading of a row of closely spaced tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, p. 562–583, 2008.
- LAMBERTS, R.; MACIEL, A. **Analisis Sol-Ar**. 6.2. LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis – Santa Catarina, 2011.
- LAMENHA, M. A.; BARBOSA, R. V. R; BITTENCOURT, L. S. **Análise da ventilação natural em diferentes arranjos construtivos urbanos**. In: PLURIS – 6º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, Lisboa, Portugal, 2014.
- LAMENHA, M. de A. **A escola técnica do programa Brasil profissionalizado: um projeto padrão para diferentes zonas bioclimáticas?** Dissertação (Mestrado - em Arquitetura e Urbanismo) / PPGAU - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.
- LAURENTINO, N.; TOLEDO, A. M. **Análise da ventilação natural em apartamentos reversíveis por meio de ensaios analógicos na mesa d'água**. In: NUTAU 2010 – VIII SEMINÁRIO INTERNACIONAL ARQUITETURA, URBANISMO E DESIGN: PRODUTOS E MENSAGENS PARA AMBIENTES SUSTENTÁVEIS, São Paulo, SP, 2010.
- LEE, R. X.; JUSUF, S. K.; WONG, N. H. The study of height variation on outdoor ventilation for Singapore's high-rise residential housing estates. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 10, p. 15 - 33, 2013.
- LEE, S. H.; KIMURA, F. Comparative Studies in the Local Circulations Induced by Land-Use and by Topography. **Boundary-Layer Meteorology**, v.101, p.157-182, 2001.
- LEITE, C. G. **Alterações da ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da Avenida Litorânea de São Luis / MA**. Dissertação (Mestrado - em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- LEITE, R. C. V. **Cidade, vento, energia: Limites de aplicação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido**. Tese (Doutorado – Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAUUSP, São Paulo, 2015.
- LEITE, R. C. V. **Fortaleza Terra do vento: A influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- LEITE, R. C. V.; FROTA, A. B. **Avaliação de coeficientes de pressão em edifícios em meio Urbano adensado**. In: ENCAC – XII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013, Brasília, DF; In: VIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013, Brasília, DF, 2013.
- LIMA, I. M. de; BARBIRATO, G. M. **Avaliação térmica de vias urbanas em Maceió / AL visando a criação de espaços climaticamente adequados a pedestres**. In: PLURIS – 7º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, Maceió, AL, 2016.

LIMA, R. G. de; BARBIRATO, G. M.; BITTENCOURT, L. S.; SOUZA, C. A. de S. **A influência de diferentes fatores morfológicos urbanos no ambiente térmico da cidade.** In: PLURIS – 7º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, Maceió, AL, 2016.

LIMA, R. G. de; BITTENCOURT, L. S. **A influência de diferentes arranjos construtivos no comportamento da ventilação natural.** In: PLURIS – 7º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, Maceió, AL, 2016.

LIN, M.; HANG, J.; LI, Y.; LUO, Z.; SANDBERG, M. Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. **Building and Environment.** v. 79, p. 152 - 167, 2014.

LIPING, W.; HIEN, W. N.; LI, S. Facade design optimization for naturally ventilated residential buildings in Singapore. **Energy and Buildings,** v.39, p. 954–961, 2007.

LIU, S.; LIU, J.; YANG, Q.; PEI, J.; LAI, D.; CAO, X.; CHAO, J.; ZHOU, C. Coupled simulation of natural ventilation and daylighting for residential community design. **Energy and Buildings,** v. 68, p.686–695, 2014.

LOPES, A. M. S. **Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano:** vento, ilhas de calor de superfície e balanço energético. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003.

LOPES, A.; SARAIVA, J.; ALCOFORADO, M. J. Urban boundary layer wind speed reduction in summer due to urban growth and environmental consequences in Lisbon. **Environmental Modelling & Software,** v. 26, p. 241-243, 2011.

LUO, Z.; LI, Y. Passive urban ventilation by combined buoyancy-driven slope flow and wall flow: Parametric CFD studies on idealized city models. **Atmospheric Environment.** v. 45, p. 5946 - 5956, 2011.

MACEIÓ (2007, 08 de fevereiro). Lei Municipal n. 5.593, de 08 de fevereiro de 2007. **Código de Urbanismo e Edificações de Maceió,** Diretoria do Plano Diretor. Maceió.

MACEIÓ. Base Cartográfica Oficial de Maceió, 2000.

Maceió. **Lei Municipal n. 5.593,** de 08 de fevereiro de 2007. Código de Urbanismo e Edificações de Maceió, Diretoria do Plano Diretor. Maceió, 2007.

MAIA, J. L. M.; NETTO, V. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; GOES, G. **Forma Urbana e Qualidade do Ar:** o caso do Rio de Janeiro. In: ENANPUR – Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional, São Paulo, SP, 2017.

MAIA, R. G. X. **Padrões de escoamento do vento na região metropolitana de Maceió.** Maceió, 2016. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

MARQUES, R. S. **Ventilação e prescrições urbanísticas**: Uma aplicação simulada para a orla da Praia do Meio em Natal / RN. Dissertação (Mestrado - em Arquitetura e Urbanismo) / PPGAU - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

MARTINS, T. A. de L. **De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano**: otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto. Tese (Doutorado em Arquitetura) – UFRJ/ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo / Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Rio de Janeiro, 2014.

MASCARÓ, L. **Ambiência urbana**: Urban environment. Porto Alegre: Sagra: DC Luzzatto, 1996.

MASIERO, E; SOUZA, L. C. L de. **OCUPAÇÃO DO SOLO E MICROCLIMAS EM SÃO JOSÉ DO RIO PRETO, SP**. In: ENCAC – XIII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2015, Campinas, SP; In: IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2015, Campinas, SP, 2015.

MATTSSON, B. The influence of wind speed, terrain and ventilation system on the air change rate of a single-family house. **Energy**. v. 31, p. 719–731, 2006.

MELO, A.P. CÓSTOLA, D. LAMBERTS, R. HENSEN, J.L.M. Development of surrogate models using artificial neural network for building shell energy labelling. **Energy Policy**. v. 69, p.457– 466, 2014.

MILLWARD-HOPKINS, J. T.; TOMLIN, A. S. MA, L.; INGHAM, D.; POURKASHANIAN, M. Estimating Aerodynamic Parameters of Urban-Like Surfaces with Heterogeneous Building Heights. **Boundary-Layer Meteorol**, 141:443–465, 2011. DOI 10.1007/s10546-011-9640-2.

MONTEIRO, C. A. de F. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: Tese de Livre Docência – Instituto de Geografia / USP, 1976.

NAKATA-OSAKI, C. M; SOUZA, L. C. L. de; RODRIGUES, D. S. **Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna**: Análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 73-87, jul./set. 2016.

NASCIMENTO, A. V.; BONO, G. F. F.; BONO, G. **Estudo da ventilação em modelos de edificações com telhado de duas águas**. In:III CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ENGENHARIA DO VENTO, 2018. São Paulo, SP, 2018.

NASCIMENTO, D. M.; TOSTES, S. P. Programa Minha Casa Minha Vida: a (mesma) política habitacional no Brasil. **Arquitextos**, São Paulo, ano 12, n. 133.03, Vitruvius, jun. 2011. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/12.133/3936>>. Acesso em: 27/09/2017.

NASCIMENTO, F. A. do. **Estudo da capacidade de adensamento urbano do Litoral Norte de Maceió, nos bairros de Jacarecica e Guaxuma**. Dissertação (Mestrado – em Desenvolvimento e Meio Ambiente) / PRODEMA - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

NASCIMENTO, T. C. C.; BARROS, P. C. F.; BATISTA, J. O. **Avaliação da ventilação natural em arranjos de implantação de edifícios em condomínio de Maceió-AL.** In: PLURIS – 7º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, Maceió, AL, 2016.

NG, E. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. **Building and Environment**, v. 44, p. 1478–1488, 2009.

NG, E.; YUAN, C.; CHEN, L.; REN, C.; FUNG, J. C. H. Elsevier: Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. **Landscape and Urban Planning**, V. 101, p. 59–74, 2011.

NOTTROT, A.; ONOMURA, S.; INAGAKI, A.; KANDA, M.; KLEISSL, J. Convective heat transfer on leeward building walls in an urban environment: Measurements in an outdoor scale model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 3128–3138, 2011.

NUCCI, J. C. **Qualidade ambiental e adensamento urbano: Um estudo de Ecologia e Planejamento da Paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília (MSP).** Curitiba, 2 ed. Edição do Autor, 2008. Disponível em: www.geografia.ufpr.br/laboratorios/labs. Acesso em 25/08/2017.

OKE, T. R. **Boundary layer climates.** 2 ed. London: Methuen, 1987.

OLGYAY, V. **Arquitetura y clima: Manual do desenho bioclimático para arquitectos y urbanistas.** Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

ONOMURA, S.; TAKIMOTO, H.; KANDA, M. **INFLUENCE OF A HEATED WALL ON URBAN CANOPY FLOW USING PIV MEASUREMENTS.** The seventh International Conference on Urban Climate, Yokohama, 2009.

PADARATZ, I. J. **Velocidade básica do vento no Brasil.** Dissertação (Mestrado – em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.

PASSOS, I. C. da S. **Clima e arquitetura habitacional em Alagoas: estratégias bioclimáticas para Maceió, Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar.** Maceió, 2009. Dissertação (Mestrado de Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

PIATTI, A. L. et al. **Plano Estratégico para o Desenvolvimento Sustentável do Litoral Norte de Maceió.** Resumo disponível em INFOHAB. In Belo Horizonte, 2002. p277-292.

PRATA, A. R. **O impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano.** Tese (Doutorado – Área de concentração: Estruturas ambientais urbanas) – FAUUSP, São Paulo, 2005.

RAFAILIDAS S. Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. **Boundary-Layer Meteorol** 85:255–271, 1997.

RAMPONI, R.; GAETANI, I.; ANGELOTTI, A. Influence of the urban environment on the effectiveness of natural night-ventilation of an office building. **Energy and Buildings**. v. 78, p. 25–34, 2014.

REUTEN, C. **Scaling and kinematics of daytime slope flow**. PhD tese - University of British, Columbia, 2006.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo: Proeditores, 2ª ed., 2000.

SABOYA, R. **Zoneamento e planos diretores**. Urbanidades. Urbanismo, Planejamento Urbano e Plano diretores, 2007. Disponível em: <www.urbanidades.arq.br/2007/11/zoneamento-e-planos-diretores/>. Acesso em: Março de 2017.

SACRAMENTO, A. da S. **A influência da dimensão da abertura de saída da cozinha/serviço no potencial de ventilação dos ambientes de edificações multifamiliares em Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.

SACRE, C. **Le confort dans les espaces extérieurs: analyse microclimatique**. Nantes: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, division climatologie, 1983. 138 p.

SALAT, S. Morfologia urbana e impacto energético. **Anais...** Seminário Internacional: iniciativas urbanas de eficiência energética e redução de emissões. Brasília - DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

SALIM, F; MOYA R. **Parallel Analysis of Urban Aerodynamic Phenomena Using High and Low-Tech Tools**. Conference of Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Topic: Simulation, Prediction, and Evaluation, Prague: v.1, n.30, p.621- 630, 2012.

SANAIEIAN, H.; TENPIERIK, M.; LINDEN, K. VAN DEN; SERAJ, F. M.; SHEMRANI, S. M. M. Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 551–560, 2014.

SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOLOUS, D. **Passive cooling of buildings**. James & James (Science Publishers) LTD: London, 1996.

SANTOS, R. C. de A. L. **Evolução da linha de costa a médio e curto prazo associada ao grau de desenvolvimento urbano e aos aspectos geoambientais na planície costeira de Maceió - Alagoas**. Tese (Doutorado – em Geociências) / Programa de Pós-graduação em Geociências do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Pernambuco - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

SAPIAN, A. R.; MAJID, N. H. A.; HOKOI, S. **Natural ventilation around open ground floors with pilotis in high-rise residential buildings in tropical areas: harmonization of modern and traditional housing in tropical areas**. 2nd International Conference, Mukogawa Women's Univ. Nishinomiya, Japan, 2012.

SILVA, F. T da. **A exegese legislativa acerca da ventilação urbana: proposição de sistema para avaliação de adequabilidade**. In: ENCAC – XII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013, Brasília, DF; In: VIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013, Brasília, DF, 2013.

SILVA, F. T. **Conforto térmico do transeunte: a porosidade urbana como condicionante da ventilação.** Dissertação (Mestrado - em Arquitetura e Urbanismo) – PPGAU / Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2014.

SOARES, J. **ACA115 – introdução às ciências atmosféricas parte 4: Os movimentos da atmosfera – Circulação Geral da Atmosfera,** 2016. Disponível em: <http://www.dca.iag.usp.br/www/material/apereira/aca115/textos/Aula_4.pdf>. Acesso em: 17/12/2016.

SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R. **Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados para a simulação computacional de ventilação natural, no desempenho térmico de uma edificação residencial unifamiliar.** In: ENTAC – XIV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2012, Juiz de Fora, MG, 2012.

SOUSA, J. P. M. **Influência da forma urbana na ventilação natural: um estudo de caso no Cais José Estelita.** Dissertação (Mestrado – em Desenvolvimento Urbano) / Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2014.

SOUSA, J; LAMENHA, M.; FREITAS, R.; BITTENCOURT, L. **Efeito da altura e porosidade de edifícios na Ventilação urbana.** In: ENTAC – XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Maceió, AL, 2014.

SOUSA, O. N. P. **Investigação do papel da topografia e ocupação do solo na camada limite planetária sobre a cidade de São Paulo.** Dissertação (Mestrado – em Ciências Atmosféricas) / Departamento de Ciências Atmosféricas- Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

SOUZA, C. A. de S.; BARROS, C. R. de A.; OLIVEIRA, F. M. de.; GALDINO, G. A.; SILVA, L. F. de C.; MARTINS, L. de O.; KASPARY, M. G. de A. R.; ALCIDES, M. M.; DANTAS, P. B. de S.; LIMA, R. G. de.; DUARTE, R. de O. **Conectividades: Expressões micro-políticas no contexto urbano Maceoense.** Trabalho produzido na disciplina Atelier de Cidades. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

SOUZA, V. M. B. **A Influência da Ocupação do Solo no Comportamento da Ventilação Natural e na Eficiência Energética em Edificações.** Estudo de Caso em Goiânia – Clima Tropical de Altitude. Dissertação (Mestrado – em Arquitetura e Urbanismo) / Departamento de Pós-Graduação da FAU – UnB - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

STEEMERS, K. **Energy and the city: Density, buildings and transport.** *Energy and Buildings*, v. 35, p. 3–14, 2003.

STEINKE, Ercília. **Climatologia fácil.** São Paulo: Ed. Oficina de textos, 2012.

STRAATEN, J. **Thermal performance of buildings.** London: Elsevier, 1967.

TIBÚRCIO, I. C. da S. P. **Ventilação natural em edificações residenciais: Parâmetros normativos para configuração das aberturas.** Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

TOLEDO, A. M.; RUTTKAY, F. O. **Visualização analógica da ventilação natural pela ação do vento em edifícios residenciais na mesa d'água.** In: claCS – I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2004, São Paulo, SP; In: X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2004, São Paulo, SP, 2004.

TORK, L. D.; TIBIRIÇÁ, A. C. G.; TIBIRIÇÁ, Á. M. B. Análise da ventilação natural conforme planos diretores: resultados de pesquisa em Belém, PA. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 329-351, jan./mar. 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100138>>Acesso em: 16 mar.2020)

TUOMAALA, P. **Implementation and Evaluation of Air Flow and Heat Transfer Routines for Building Simulation Tools.** Tese. (Doutorado em Ciências em Tecnologia) – Helsingin University of Technology, Finlândia, 2002.

UMAKOSHI, E. M. **Avaliação de desempenho ambiental e arquitetura paramétrica generativa para o projeto do edifício alto.** Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

V2 Construções. Edifício Gran Marine. Disponível em: <http://v2construcoes.com.br/gran-marine>>. Acesso: Janeiro de 2018.

VRACHIMI, I., MELO, A. P., CÓSTOLA, D. **Prediction of wind pressure coefficients in building energy simulation using machine learning.** In: 15ª CONFERÊNCIA IBPSA, 2017. São Francisco, CA, EUA, 2017.

WOOD, N. Wind Flow Over Complex Terrain: a Historical Perspective and the Prospect for Large-Eddy Modelling. **Boundary Layer Meteorology**, v. 96, p.11-32, 2000.

XIE, X.; LIU, C.; LEUNG, D. Y. C. Impact of building facades and ground heating on wind flow and pollutant transport in street canyons. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 9030–9049, 2007.

XIE, ZT; COCEAL, O; CASTRO, I. P. Large-eddy simulation of flows over random urban-like obstacles. **Boundary-Layer Meteorol**, 129:1–23, 2008.

YANG, L.; Li, Y. City ventilation of Hong Kong at no-wind conditions. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 3111–3121, 2009.

YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. Elsevier. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. **Energy and Buildings**. p. 243 -251, 2012.

YIM, S.H.L.; FUNG, J. C. H.; NG, E. Y. Y. An assessment indicator for air ventilation and pollutant dispersion potential in an urban canopy with complex natural terrain and significant wind variations. **Atmospheric Environment**. v. 94, p. 297e306, 2014.

YUAN, C.; NG, E. Elsevier: Building porosity for better urban ventilation in high-density cities e A computational parametric study. **Building and Environment**, p. 176 -189, 2011.

ZABADAL, J. R. S.; RIBEIRO, V. G. **Fenômenos de transporte**: Fundamentos e métodos. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

ZARDI, D., WHITEMAN, C. D. Diurnal Mountain Wind Systems. In: CHOW, F. K., DEWEKKER, S. F. J.; SNYDER, B. Org. **Mountain Weather Research and Forecasting**. Berlin: Springer, p. 35-119, 2012.

ZHANG, A.; GAO, C; ZHANG, L. Numerical simulation of the wind field around different building arrangements. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 93, p. 891–904, 2005.

ZHOU, C.; WANG, Z.; CHEN, Q; JIANG, Y.; PEI, J. Design optimization and field demonstration of natural ventilation for high-rise residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 457–465, 2014.

APÊNDICE A – Dados de velocidades do vento dos modelos extraídos das simulações.

Tabela 24 - Dados de velocidade do vento (m/s) - modelos sem pilotis e vento a 135°.

MODELOS SEM ENCOSTA, SEM PILOTIS E COM INCIDÊNCIA A 135° (SUDESTE)								
PONTOS	M01_S/E_SE_R1_SPI	M03_S/E_SE_R2_SPI	M05_S/E_SE_R3_SPI	M07_S/E_SE_R4_SPI	M09_S/E_SE_R5_SPI	M11_S/E_SE_R6_SPI	M13_S/E_SE_R7_SPI	M15_S/E_SE_R8_SPI
1	1,96	1,61	2,16	2,29	2,37	2,21	1,9	2,56
2	0,64	0,66	0,35	0,95	0,89	0,61	0,45	0,91
3	1,62	1,77	1,89	1,88	2,04	2,31	2,12	1,78
4	1,87	2,06	2,4	2,24	2,51	2,66	2,55	2,3
5	2,01	1,95	2,56	2,63	2,57	2,65	2,34	2,59
6	2,44	2,33	3,25	3,2	2,98	3,1	2,97	3,2
7	2,04	2,18	2,77	2,7	2,85	2,89	2,59	2,98
8	2,07	2,18	3,14	3,13	3,01	2,95	2,54	3,34

Tabela 25 - Dados de velocidade do vento (m/s) - modelos com pilotis e vento a 135°.

MODELOS SEM ENCOSTA, COM PILOTIS E COM INCIDÊNCIA A 135° (SUDESTE)								
PONTOS	M02_S/E_SE_R1_PI	M04_S/E_SE_R2_PI	M06_S/E_SE_R3_PI	M08_S/E_SE_R4_PI	M10_S/E_SE_R5_PI	M12_S/E_SE_R6_PI	M14_S/E_SE_R7_PI	M16_S/E_SE_R8_PI
1	0,63	0,76	1,82	1,75	1,19	1,49	0,45	1,18
2	0,67	0,52	0,77	0,75	0,64	0,91	0,76	0,74
3	1,36	1,28	1,76	1,77	1,63	1,86	2,11	1,47
4	1,84	1,64	2,34	2,28	2,16	2,37	2,23	2,08
5	1,91	1,8	2,43	2,49	2,41	2,43	2,34	2,44
6	2,1	2,06	3	3,09	2,88	2,98	2,86	2,96
7	1,98	2,06	2,81	2,87	2,75	2,76	2,62	2,76
8	2,02	2,18	3,04	3,17	2,97	2,94	2,54	3,08
9*	0,84	0,45	0,83	0,77	1,21	0,87	1,35	1,18
10*	1,06	0,87	1,3	1,1	0,98	1,34	1,33	1,06
11*	1,5	1,44	1,83	1,89	1,77	1,98	1,82	1,79

*Pontos extras localizados na área vazada dos pilotis.

Tabela 26 - Dados de velocidade do vento (m/s) - modelos sem pilotis e vento a 90°.

MODELOS SEM ENCOSTA, SEM PILOTIS E COM INCIDÊNCIA A 90° (LESTE)								
PONTOS	M18_S/E_LE_R1_SPI	M20_S/E_LE_R2_SPI	M22_S/E_LE_R3_SPI	M24_S/E_LE_R4_SPI	M26_S/E_LE_R5_SPI	M28_S/E_LE_R6_SPI	M30_S/E_LE_R7_SPI	M32_S/E_LE_R8_SPI
1	1,7	1,82	1,51	1,47	1,54	1,21	1,53	1,44
2	1,36	1,12	1,59	1,33	0,44	0,96	1,43	1,26
3	0,95	1,01	0,85	0,78	1	0,97	0,87	0,76
4	0,32	0,39	0,33	0,4	0,51	0,58	0,46	0,41
5	1,55	1,59	1,37	1,17	1,55	1,62	1,5	1,18
6	0,99	0,9	1,67	1,69	1,43	1,42	1,66	1,77
7	0,36	0,61	0,45	0,38	0,36	0,59	0,39	0,43
8	0,52	0,47	0,95	1,01	0,83	0,83	0,93	0,98

Tabela 27 - Dados de velocidade do vento (m/s) - modelos com pilotis e vento a 90°.

MODELOS SEM ENCOSTA, COM PILOTIS E COM INCIDÊNCIA A 90° (LESTE)								
PONTOS	M19_S/E_LE_R1_PI	M21_S/E_LE_R2_PI	M23_S/E_LE_R3_PI	M25_S/E_LE_R4_PI	M27_S/E_LE_R5_PI	M29_S/E_LE_R6_PI	M31_S/E_LE_R7_PI	M33_S/E_LE_R8_PI
1	1,4	0,99	1,51	1,52	1,51	1,68	1,38	1,56
2	0,77	0,82	1,06	0,89	0,65	0,6	0,89	0,7
3	0,72	0,78	0,44	0,74	0,83	0,84	0,85	0,73
4	0,26	0,13	0,48	0,41	0,49	0,31	0,54	0,4
5	1,13	1,26	1,07	0,9	1,49	1,56	1,34	0,94
6	0,77	0,68	0,97	1,07	0,8	0,78	0,83	1,07
7	0,3	0,23	0,51	0,43	0,36	0,62	0,6	0,44
8	0,32	0,43	0,97	1,07	0,95	0,94	0,81	1,03
9*	1,76	1,53	2,49	2,52	0,86	1,45	2,30	2,74
10*	1,22	1,17	1,56	1,66	1,59	1,64	1,80	1,54
11*	0,49	0,57	0,38	1,35	1,24	1,00	1,28	1,40

*Pontos extras localizados na área vazada dos pilotis.

APÊNDICE B – Dados de Diferença de coeficiente de pressão (ΔC_p).

Tabela 28 - Dados de ΔC_p - modelos sem pilotis e vento a 135°.

ΔC_p								
PONTOS	M01_S/E_SE_R1_SPI	M03_S/E_SE_R2_SPI	M05_S/E_SE_R3_SPI	M07_S/E_SE_R4_SPI	M09_S/E_SE_R5_SPI	M11_S/E_SE_R6_SPI	M13_S/E_SE_R7_SPI	M15_S/E_SE_R8_SPI
1	-0,04	-0,06	-0,01	0,00	-0,07	-0,08	0,02	-0,03
2	-0,01	0,00	0,01	-0,02	-0,05	0,03	0,06	-0,04
3	0,30	0,36	0,38	0,36	0,39	0,47	0,54	0,37
4	-0,10	-0,09	0,31	0,33	0,24	0,23	0,08	0,41
5	0,35	0,39	0,52	0,53	0,50	0,57	0,59	0,60
6	0,46	0,53	0,67	0,67	0,65	0,68	0,55	0,73
7	-0,06	-0,05	0,27	0,33	0,22	0,17	0,07	0,39
8	0,21	0,08	0,34	0,33	0,25	0,26	0,10	0,44

Tabela 29 - Dados de ΔC_p - modelos com pilotis e vento a 135°.

ΔC_p								
PONTOS	M02_S/E_SE_R1_PI	M04_S/E_SE_R2_PI	M06_S/E_SE_R3_PI	M08_S/E_SE_R4_PI	M10_S/E_SE_R5_PI	M12_S/E_SE_R6_PI	M14_S/E_SE_R7_PI	M16_S/E_SE_R8_PI
1	0,04	0,01	0,22	0,22	0,15	0,13	-0,01	0,24
2	0,01	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,03	0,03	0,01
3	0,23	0,27	-0,07	0,31	0,28	0,35	0,37	0,21
4	-0,30	-0,01	0,37	0,43	0,33	0,31	0,16	0,38
5	0,28	0,28	0,44	0,57	0,45	0,48	0,48	0,43
6	0,43	0,39	0,67	0,89	0,74	0,74	0,63	0,78
7	-0,06	-0,05	0,30	0,40	0,25	0,23	0,05	0,35
8	0,02	0,04	0,34	0,49	0,27	0,27	0,13	0,45

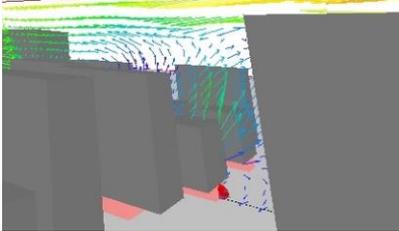
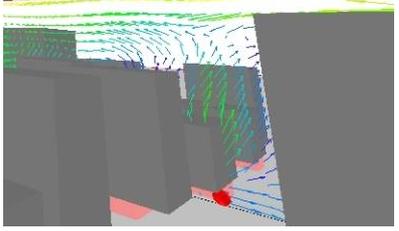
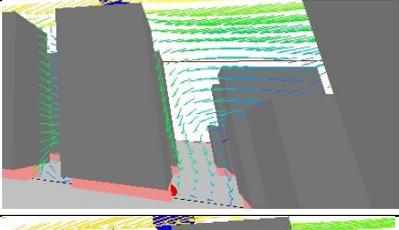
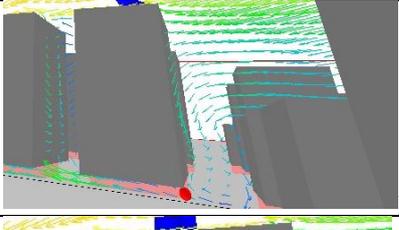
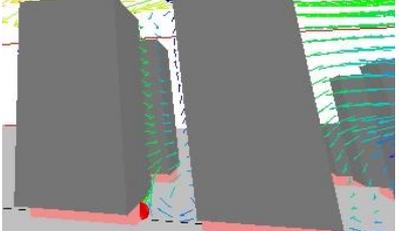
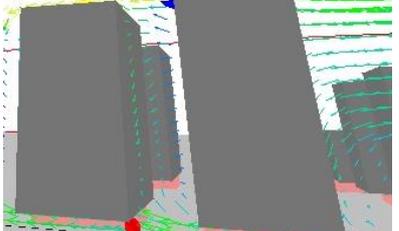
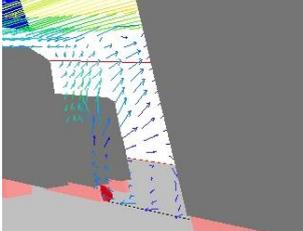
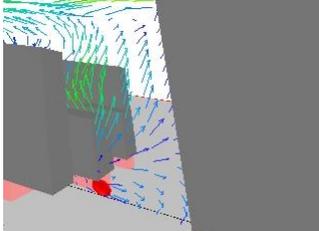
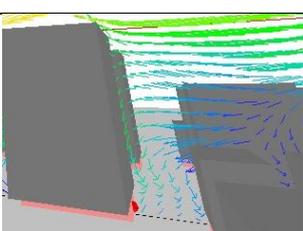
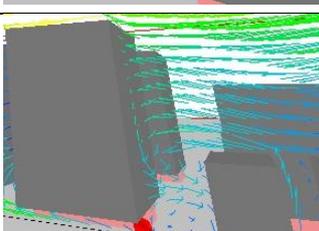
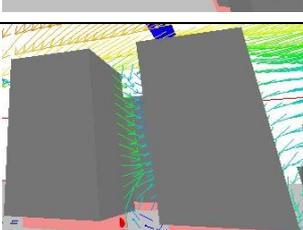
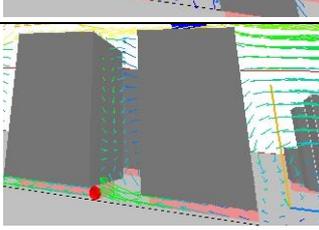
Tabela 30 - Dados de ΔC_p - modelos sem pilotis e vento a 90° .

ΔC_p								
PONTOS	M18_S/E_LE_R1_SPI	M20_S/E_LE_R2_SPI	M22_S/E_LE_R3_SPI	M24_S/E_LE_R4_SPI	M26_S/E_LE_R5_SPI	M28_S/E_LE_R6_SPI	M30_S/E_LE_R7_SPI	M32_S/E_LE_R8_SPI
1	0,21	0,24	0,28	0,32	0,03	0,10	0,27	0,39
2	0,04	0,12	0,18	0,12	-0,11	-0,10	0,16	0,07
3	0,25	0,28	0,28	0,27	0,33	0,36	0,40	0,27
4	-0,05	0,00	0,01	0,03	0,01	-0,01	0,00	0,04
5	0,11	0,12	0,26	0,27	0,23	0,25	0,31	0,27
6	0,38	0,41	0,64	0,64	0,59	0,60	0,64	0,62
7	0,01	0,02	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,03
8	0,24	0,14	0,31	0,20	0,28	0,28	0,24	0,33

Tabela 31 - Dados de ΔC_p - modelos com pilotis e vento a 90° .

ΔC_p								
PONTOS	M19_S/E_LE_R1_PI	M21_S/E_LE_R2_PI	M23_S/E_LE_R3_PI	M25_S/E_LE_R4_PI	M27_S/E_LE_R5_PI	M29_S/E_LE_R6_PI	M31_S/E_LE_R7_PI	M33_S/E_LE_R8_PI
1	0,43	0,55	0,42	0,43	0,22	0,23	0,34	0,47
2	0,13	0,08	0,13	0,14	0,04	-0,02	0,07	0,13
3	0,18	0,19	0,04	0,25	0,30	0,32	0,37	0,23
4	-0,02	-0,01	0,01	0,05	0,03	0,01	0,01	0,06
5	0,16	0,23	0,28	0,32	0,21	0,20	0,27	0,30
6	0,33	0,33	0,64	0,70	0,62	0,60	0,59	0,66
7	0,01	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03
8	0,07	0,12	0,25	0,29	0,23	0,22	0,23	0,27

APÊNDICE C - Comportamento do vento nos pontos localizados nas áreas obstruídas e desobstruídas dos pilotis.

MODELOS SEM ENCOSTA, COM PILOTIS E COM INCIDÊNCIA A 135° (SUDESTE)	
M02_S/E_SE_R1_PI – PONTOS 1 e 9 / 3 e 10 / 4 e 11	
 p01: 0,63m/s	 p09: 0,84m/s
 p03: 1,36m/s	 p10: 1,06m/s
 p04: 1,84m/s	 p11: 1,50m/s
M04_S/E_SE_R2_PI – PONTOS 1 e 9 / 3 e 10 / 4 e 11	
 p01: 0,76m/s	 p09: 0,45m/s
 p03: 1,28m/s	 p10: 0,87m/s
 p04: 1,64m/s	 p11: 1,44m/s

