RENAN CID VARELA LEITE

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 apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientadora: Dra. Anésia Barros Frota

SÃO PAULO

2010

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

E-MAIL: renancid@bol.com.br

Leite, Renan Cid Varela
L533f Fortaleza: terra do vento: a influência da mudança nos padrões
de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de
clima tropical úmido / Renan Cid Varela Leite. --São Paulo, 2010.
296 p. : il.

Dissertação (Mestrado - Área de Concentração: Tecnologia da
Arquitetura) - FAUUSP.
Orientadora: Anésia Barros Frota

1.Conforto ambiental – Fortaleza (CE) 2.Ventilação (Simulação
computacional) – Fortaleza (CE) 3.Morfologia urbana – Fortaleza (CE)
4.Legislação urbana – Fortaleza (CE) I.Título

CDU 504.055(813.11)

FOLHA DE APROVAÇÃO

LEITE, Renan Cid Varela. **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 apresentada à comissão de pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre.

Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura

Aprovado em __/__/__

Banca Examinadora

1. Prof^a. Dr^a. **Anésia Barros Frota**

Titulação: **Professora Doutora – Orientadora**

Instituição: **FAUUSP**

Assinatura: _____

2. _____

Titulação: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

3. _____

Titulação: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

À Ramone e Valéria

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Anésia Barros Frota, pela orientação sempre atenta, confiança e compreensão tão necessárias aos diversos momentos desta caminhada.

À pesquisadora Dra. Alessandra Prata Shimomura, pelo valiosíssimo apoio durante todas as etapas desta pesquisa, sempre cuidando carinhosamente dos frutos que semeou através do vento.

À Professora Dra. Eleonora Sad de Assis, pelo interesse nesta investigação e pelas considerações bastante pertinentes durante o exame de qualificação.

Aos sempre disponíveis Rafael Brandão, Leonardo Monteiro e Vanessa Guilhon, com quem tenho dívidas intelectuais incalculáveis.

Aos meus amados Ramone e José, por compreenderem a ausência deste marido e pai quando as tantas atribuições de pesquisador me subtraíram um pouco dos nossos preciosos momentos.

Ao meu pai, eterno herói, por me ensinar o valor da integridade e pelo estímulo constante pela busca do conhecimento.

À minha mãe, pelo inigualável exemplo de vida – foi uma honra!

Ao René, meu irmão, que com a generosidade de sempre me estendeu sua mão quando precisei.

À minha família, cujo amor incondicional me permitiu continuar nesta caminhada.

Ao amigo Marcondes Araújo Lima, pelo acompanhamento constante desde os primeiros passos deste pesquisador, sempre me encorajando no rumo do conforto ambiental.

Ao amigo Adeildo Cabral Silva, pelas tantas oportunidades criadas me fazendo crescer no ambiente acadêmico e fora dele também.

Ao mestre Roberto Martins Castelo, a quem devo grande parte da paixão que nutro pela arquitetura.

Aos meus amigos, pelo carinho de suas amizades e por nossas ricas discussões.

Ao Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia pelo empréstimo dos equipamentos utilizados nas medidas de campo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro a pesquisa.

“Sendo as cidades fortificadas, o próximo passo é a distribuição dos lotes das casas dentro dos muros e o desenho de ruas e vielas que leve em consideração as condições climáticas. Estas serão dispostas com propriedade se houver a precaução de se excluírem os ventos das vielas. Os ventos frios são desagradáveis, os ventos quentes irritante, os ventos úmidos insalubres. Devemos, por conseguinte, evitar erros nesse assunto e tomar consciência das experiências comuns de muitas cidades. Por exemplo, Militene, na ilha de Lesbos, é uma cidade construída com magnificência e bom gosto, mas sua posição demonstra falta de visão. Nessa comunidade, quando o vento sopra do Sul, as pessoas adoecem; quando vem de Noroeste, ficam com tosse; com o vento Norte, elas realmente se recuperam, mas não podem permanecer nas vielas e ruas, devido ao frio rigoroso. Se as ruas correm na direção dos ventos, suas constantes rajadas vindas do campo, e então canalizadas pelas vielas estreitas, irão atingi-las com grande violência. As fileiras de casas precisam, portanto, ser direcionadas em oposição aos quadrantes de onde o vento sopra, para que, quando entrarem, possam bater nos ângulos dos blocos, de modo que sua força seja diminuída e dispersada.”

Vitrúvio

The ten books on architecture

RESUMO

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**. 2010. 296 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

A pesquisa propõe estudar a influência da alteração nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural, com estudo de caso em parte dos bairros Parque Iracema e Cambé, na cidade de Fortaleza, Ceará. O vento é elemento chave à qualidade do ar no ambiente urbano e conforto térmico em localidades de clima quente úmido. Entretanto, este elemento do clima urbano é estruturalmente modificado pelo processo de urbanização. A morfologia urbana é resultado de prescrições edilícias tais como gabarito, taxa de ocupação do lote e recuos, modificando a permeabilidade do vento no espaço urbano. O estudo da alteração no escoamento do ar sobre o tecido urbano aborda, especificamente, o setor sudeste da capital cearense, que experimenta um processo de expansão urbana vinculado ao mercado imobiliário, intensificando a sua ocupação e alterando os padrões de uso do solo através da verticalização e do adensamento construtivo permitidos pela legislação urbana. O estudo reproduziu modelos virtuais representando a situação atual, a ocupação máxima permitida e uma proposta intermediária como crítica à permissividade prevista em lei. Os cenários foram simulados em ambiente de mecânica dos fluidos computadorizada. Os resultados indicaram o comprometimento das condições de ventilação na região posterior do cenário de máxima ocupação permitida pela elevação no gradiente de vento. No nível local a maioria dos pontos de comparação inseridos no modelo de máxima ocupação indicou melhores condições de ventilação na altura das edificações em relação ao modelo intermediário, resultado da diminuição da taxa de ocupação.

Palavras-chave: Conforto ambiental, Ventilação, Simulação Computacional, Morfologia urbana, Fortaleza.

ABSTRACT

LEITE, R. C. V. **Fortaleza, Land of the Wind: the influence of changing patterns of land occupation on natural ventilation in a tropical humid climate**. 296 p. Master's Thesis. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

The research aims to study the influence of changing patterns of land use on natural ventilation, with a case study in a part of Parque Iracema and Cambeba neighborhood, in the city of Fortaleza, Ceará. The wind is a key element to air quality in the urban environment and thermal comfort in hot, humid climate locations. However, this urban climate element is structurally modified by the urbanization process. The urban morphology is the result of urban standards such building height, occupancy rate and space between buildings, changing the permeability of the wind in the urban space. The study of air flow changing over the urban area covers, specifically, the southeast sector of Fortaleza, which is experiencing an urban expansion process caused by the housing market, intensifying its occupation and changing patterns of land use through tall buildings and constructive densification allowed by law. The study reproduced virtual models representing the present situation, the maximum occupancy allowed and an intermediate proposal as a criticism of the permissiveness provided by law. These scenarios were simulated using fluid dynamics software. The results indicated that the natural ventilation was prejudiced in the posterior region of the scenario of maximum occupancy. At the local level most of the points of comparison within the maximum occupancy model indicated better ventilation conditions about building's height comparing to the intermediate model, attesting the influence of a lower occupancy rate.

Keywords: Environmental comfort, Ventilation, Computational simulation, Urban morphology, Fortaleza.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rotação da terra e a Força de Coriolis.....	70
Figura 2 – Caracterização dos ventos alísios	71
Figura 3 – Movimento das brisas mar-terra e terra-mar	72
Figura 4 – Espectro do Vento Atmosférico	73
Figura 5 – Gradientes de vento	76
Figura 6 – Esquema de camadas atmosféricas segundo Oke	79
Figura 7 – Esquema da camada limite urbana segundo Oke	81
Figura 8 – Visualização do escoamento em modelo sobre mesa d'água.....	89
Figura 9 – Túnel de vento do IPT.....	90
Figura 10 – Aplicação de camada de areia sobre modelo submetido ao túnel de vento.....	90
Figura 11 – Edificações em duas dimensões.....	94
Figura 12 – Resultado do agrupamento e modelagem tridimensional das edificações.....	94
Figura 13 – Base para confecção do modelo	94
Figura 14 – Malha gerada para a ocupação máxima e detalhe da adequação dos parâmetros junto aos espaços menores.....	96
Figura 15 – Aspecto geral das condições de contorno para o domínio leste	102
Figura 16 – Aspecto geral das condições de contorno para o domínio sudeste.....	102
Figura 17 – Exemplo de convergência para massa e momento com destaque para o nível satisfatório de resíduos a ser alcançado	103
Figura 18 – Brasil	107
Figura 19 – Ceará.....	107
Figura 20 – Fortaleza	107
Figura 21 – Planta Padre Manuel do Rego de Medeiros, em 1856.....	108
Figura 22– Planta Adolfo Herbster em 1859	108
Figura 23 – Zoneamento proposto pelo PDPFor, com destaque para os bairros Cambé e Jardim Iracema, onde localiza-se a área de estudo.....	113
Figura 24 – Zoneamento Ambiental de Fortaleza com destaque para os bairros Cambé e Jardim Iracema, onde localiza-se a área de estudo.....	114
Figura 25 – Delimitação do trecho de estudo nos bairros Cambé e Parque Iracema e demarcação do Parágrafo único com base no PDPFor (2009).....	117

Figura 26 - Delimitação da área de estudo	118
Figura 27 – Verticalização a cerca de 500 m antes da área de estudo.....	119
Figura 28 – Verticalização a cerca de 750 m antes da área de estudo.....	119
Figura 29 - Mapa levantamento gabarito das edificações do trecho de estudo	120
Figura 30 - Mapa levantamento de uso do solo do trecho de estudo.....	120
Figura 31 – Padrão de uso do solo comum ao setor: o condomínio residencial horizontal.....	121
Figura 32 - Tipologia de verticalização característica da área	121
Figura 33 – Padrão de verticalização típico da área	121
Figura 34 – Condomínio vertical em construção	121
Figura 35 – Verticalização a nordeste do trecho de estudo (índice de aproveitamento igual a 2,0 e gabarito máximo de 72 m).....	122
Figura 36 – Vista geral da verticalização do trecho com índice de aproveitamento igual a 2,0 e gabarito máximo de 72 m.	122
Figura 37 – Verticalização a sudeste do trecho de estudo (índice de aproveitamento igual a 2,0 e gabarito máximo de 72 m).....	122
Figura 38 – Exemplo de projeto imobiliário para parte da área de estudo com índice de aproveitamento 1,5.	122
Figura 39 – Conjunto de edificações de baixo valor e suscetíveis à compra para posterior verticalização dos seus terrenos.....	122
Figura 40 – Padrão típico das residências de maior valor de compra mantidas nos cenários de ocupação do solo.	122
Figura 41 – Visualização tridimensional do cenário de ocupação atual	123
Figura 42 – Visualização tridimensional do cenário de ocupação máxima permitida.....	125
Figura 43 – Visualização tridimensional do cenário de ocupação intermediária	126
Figura 44 – Variação da temperatura do ar de Fortaleza ao longo do dia durante o ano	128
Figura 45 – Variação da temperatura máxima do ar ao longo do ano	128
Figura 46 – Distribuição da precipitação mensal ao longo do ano.....	128
Figura 47 – Variação da umidade relativa do ar em Fortaleza no mês mais quente e no mais frio.	129
Figura 48 – Distribuição das horas de sol em Fortaleza ao longo do ano.....	129
Figura 49 – Distribuição da radiação solar por orientação durante o mês mais quente.....	129
Figura 50 – Distribuição da radiação solar por orientação durante o mês mais frio.....	129
Figura 51 – Gráfico da distribuição da frequência de ocorrência das direções do vento entre 2002 – 2009.	134

Figura 52 - Rosa dos ventos para Fortaleza durante o período entre 2002 e 2009.....	135
Figura 53 – Distribuição das classes de velocidade para os dados de vento entre 2002 e 2009..	135
Figura 54 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para o período da madrugada	137
Figura 55 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para o período da manhã.....	137
Figura 56 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para o período da tarde	138
Figura 57 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para o período da noite	138
Figura 58 – Verificação do comportamento da velocidade média do ar ao longo do dia	140
Figura 59 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para temperaturas até 27 °C.	141
Figura 60 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para temperaturas acima de 27 °C	142
Figura 61 – Variação da velocidade média do ar ao longo do ano	142
Figura 62 – Distribuição das direções de incidência do vento durante o primeiro semestre	143
Figura 63 - Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para temperaturas acima de 27 °C	144
Figura 64 – Distribuição das direções de incidência do vento durante o segundo semestre.....	145
Figura 65 - Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para temperaturas acima de 27 °C	145
Figura 66 - Anemômetro de concha.....	147
Figura 67 – Máquina Fotográfica digital.....	148
Figura 68 – Estação HOBO H21-001	148
Figura 69 - Bússola e GPS	148
Figura 70 – Vista superior e demarcação do terreno.....	149
Figura 71 – Distância entre terreno utilizado e o Aeroporto Pinto Martins.	149
Figura 72 – Montagem da estação no poste.....	149
Figura 73 – Anéis de ferro para alinhamento vertical da estação	149
Figura 74 – Caminhão tipo <i>munck</i> erguendo o poste e estação.	150
Figura 75 - Instalação da estação em ponto central do terreno.....	150
Figura 76 – Estação fixada.....	150
Figura 77 – Ajustagem dos sensores.	150
Figura 78 – Distribuição da frequência de direções do vento durante as medições <i>in loco</i>	153

Figura 79 – Comparação da temperatura do ar registrada pela Estação HOBO H21-001 e Aeroporto durante o período de medições.....	154
Figura 80 – Visualização das características naturais do terreno usado para as medições	155
Figura 81 – Comparação da velocidade do ar registrada pela Estação HOBO H21-001 durante o período de medições	155
Figura 82 – Distribuição das classes de velocidade do ar medidos na área de estudo).	156
Figura 83 – Distribuição das classes de velocidade do ar medidos no Aeroporto.	156
Figura 84– Rosa dos ventos para os dados coletados na área de estudo	157
Figura 85– Rosa dos ventos para os dados coletados no aeroporto	157
Figura 86 – Comparação entre a distribuição das direções do vento <i>in loco</i> e na estação do aeroporto.....	158
Figura 87 – Projeção horizontal da área ocupada pelo cenário da situação atual.	164
Figura 88 – Convergência da simulação da situação atual orientação leste.	164
Figura 89 – Projeção horizontal da área ocupada pelo cenário da máxima ocupação.	165
Figura 90 – Definição dos parâmetros aplicados à simulação da ocupação máxima orientação leste e a convergência resultante.	165
Figura 91 - Projeção horizontal da área ocupada pelo cenário de ocupação intermediária.....	166
Figura 92 – Convergência da simulação da ocupação intermediária com orientação leste.	167
Figura 93 – Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.	167
Figura 94 – Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o primeiro semestre.	168
Figura 95 – Detalhe dos efeitos de canalização após o grande edifício institucional a partir da Rua Aduardo Batista no modelo de ocupação máxima.	169
Figura 96 – Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste.....	170
Figura 97 – Detalhe dos contornos e vetores a sul do modelo de ocupação intermediária.	171
Figura 98 - Detalhe dos contornos e vetores a sul do modelo de ocupação máxima a 1,5 m.	171
Figura 99 – Detalhe dos contornos e vetores a norte do modelo de ocupação intermediária....	171
Figura 100 – Detalhe dos contornos e vetores a norte do modelo de ocupação máxima.....	171
Figura 101 – Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.....	172
Figura 102 – Detalhe dos vetores a 1,5 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do modelo da situação atual.....	172

Figura 103 – Detalhe dos vetores a 1,5 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao sul do modelo da situação atual.	172
Figura 104 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.	173
Figura 105 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste durante o primeiro semestre.	174
Figura 106 - Detalhe dos vetores de velocidade do ar junto aos primeiros edifícios próximos a borda leste do cenário de ocupação intermediária indicando a aceleração pelo efeito de canalização.	174
Figura 107 – Detalhe dos vetores de velocidade do ar junto aos primeiros edifícios próximos a borda leste do cenário de ocupação máxima indicando aceleração pelo efeito de canalização.	174
Figura 108 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.	175
Figura 109 – Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.	176
Figura 110 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste.	176
Figura 111– Detalhe do trecho mais acelerado após o conjunto edificado no cenário de ocupação máxima.	177
Figura 112 – Detalhe do trecho menos acelerado após o conjunto edificado no cenário de ocupação intermediária.	177
Figura 113 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.	178
Figura 114 – Detalhe dos vetores a 10 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do modelo.	178
Figura 115 – Detalhe dos vetores a 10 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao sul do modelo.	178
Figura 116 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o primeiro semestre.	179
Figura 117 – Detalhe do efeito de canalização junto às vias de sentido paralelo ao fluxo de vento no cenário de ocupação máxima a 10 m do solo.	179
Figura 118 – Detalhe do efeito de canalização nas primeiras edificações a leste do cenário de ocupação máxima a 10 m do solo.	179
Figura 119 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste.	180
Figura 120 – Detalhe do efeito de canalização junto às vias de sentido paralelo ao fluxo de vento no cenário de ocupação intermediária a 10 m do solo.	180
Figura 121 – Detalhe do efeito de canalização nas primeiras edificações a leste do cenário de ocupação máxima a 10 m do solo.	180

Figura 122 – Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.	181
Figura 123 – Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.....	182
Figura 124 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste.....	183
Figura 125 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.....	183
Figura 126 – Detalhe dos vetores a 36 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do modelo	184
Figura 127 – Detalhe dos vetores a 36 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao sul do modelo	184
Figura 128 – Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.....	184
Figura 129 - Detalhe dos vetores nas primeiras edificações a leste do cenário de ocupação máxima a 36 m do solo.	185
Figura 130 - Detalhe dos vetores junto aos primeiros edifícios próximos à borda leste do cenário de ocupação máxima indicando efeitos de canalização.....	185
Figura 131 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.....	185
Figura 132 – Detalhe dos vetores nas primeiras edificações a leste do cenário de ocupação intermediária a 36 m do solo.	186
Figura 133– Detalhe dos vetores junto aos primeiros edifícios próximos à borda leste do cenário de ocupação intermediária indicando efeitos de canalização.....	186
Figura 134 - Visualização do escoamento do vento a leste sobre o cenário atual através de <i>streamlines</i>	187
Figura 135 - Visualização do escoamento do vento a leste sobre o cenário de ocupação máxima através de <i>streamlines</i>	188
Figura 136 - Visualização do escoamento do vento a leste sobre o cenário de ocupação intermediária através de <i>streamlines</i>	189
Figura 137 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário da condição atual com vento a leste.	189
Figura 138 – Vista lateral do plano vertical com o contorno de velocidades após o principal conjunto verticalizado da situação atual com vento a leste.....	190
Figura 139 – Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo ao encontrar as principais torres no modelo da situação atual.	190
Figura 140 – Detalhe do vórtice gerado a sotavento do principal conjunto verticalizado na situação atual.....	190

Figura 141 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao sul do cenário da condição atual com vento a leste.	191
Figura 142- Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo ao encontrar as edificações baixas ao sul do modelo da situação atual.....	191
Figura 143 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário de máxima ocupação com vento a leste.....	192
Figura 144 - Vista lateral do plano vertical com o contorno de velocidades ao centro do modelo de máxima ocupação com vento a leste.....	192
Figura 145 – Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo na parte central do cenário de máxima ocupação e os vórtices nos espaços entre os prédios.	193
Figura 146 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao sul do cenário de máxima ocupação com vento a leste.....	193
Figura 147 - Vista lateral do plano vertical com o contorno de velocidades ao sul do modelo de máxima ocupação com vento a leste.....	194
Figura 148 - Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo na parte central do cenário de máxima ocupação e os vórtices nos espaços entre os prédios.	194
Figura 149 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário de ocupação intermediária com vento a leste.....	195
Figura 150 - Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo na parte central do cenário de ocupação intermediária.....	195
Figura 151 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao sul do cenário de ocupação intermediária com vento a leste.....	196
Figura 152 - Vista lateral do plano vertical com o contorno de velocidades ao sul do modelo de máxima ocupação com vento a leste.....	196
Figura 153 – Pontos de verificação dos perfis de velocidade no trecho mais verticalizado do cenário de ocupação atual com vento a leste.....	197
Figura 154 – Perfis de velocidade segundo a altura nos pontos 1 a 5 com vento a leste no cenário atual (250 m e 100 m de altura).....	198
Figura 155 - Pontos de verificação dos perfis de velocidade no trecho a norte do cenário de ocupação máxima permitida com vento a leste	198
Figura 156 - Perfis de velocidade segundo a altura nos pontos 1 a 5 para o vento a leste no cenário de ocupação máxima	199
Figura 157 - Pontos de verificação dos perfis de velocidade no trecho a norte do cenário de ocupação intermediária com vento a leste.....	200
Figura 158 - Perfis de velocidade segundo a altura para o vento a leste no cenário de ocupação intermediária.....	201
Figura 159 - Gráfico dos perfis de velocidades nos pontos 1 a 5 até 100 m do solo no cenário de ocupação máxima.	201

Figura 160 - Gráfico dos perfis de velocidades nos pontos 1 a 5 até 100 m do solo no cenário de ocupação intermediária.....	201
Figura 161 – Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 1.....	202
Figura 162 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 2.....	202
Figura 163 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 3.....	203
Figura 164 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 4.....	203
Figura 165 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 5.....	203
Figura 166 – Pontos de verificação dos perfis de velocidade no trecho mais horizontal do cenário de ocupação atual com vento a leste.	204
Figura 167 – Perfis de velocidade segundo a altura para o vento a leste no cenário de ocupação atual.	205
Figura 168 - Pontos de verificação dos perfis de velocidade no cenário de ocupação máxima com vento a leste.....	205
Figura 169 – Perfis de velocidade segundo a altura para o vento a leste no cenário de ocupação máxima.....	206
Figura 170 - Pontos de verificação dos perfis de velocidade no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.....	207
Figura 171 - Perfis de velocidade segundo a altura para o vento a leste no cenário de ocupação intermediária.	208
Figura 172 - Gráfico dos perfis de velocidades nos pontos 6 a 10 até 100 m do solo no cenário de ocupação máxima.	208
Figura 173 - Gráfico dos perfis de velocidades nos pontos 6 a 10 até 100 m do solo no cenário de ocupação intermediária.....	208
Figura 174 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 6.....	209
Figura 175 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 7.....	209
Figura 176 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 8.....	210
Figura 177 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 9.....	210
Figura 178 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 10.....	211

Figura 179 - Perfis de velocidades nos Pontos de Comparação para o cenário da ocupação atual.	212
Figura 180 – Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos de comparação 1 a 10 do cenário da situação atual.	212
Figura 181 - Perfis de velocidades nos Pontos de Comparação para o cenário de ocupação máxima.	213
Figura 182 - Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos de comparação 1 a 10 do cenário de ocupação máxima.	214
Figura 183 - Perfis de velocidades nos Pontos de Comparação para o cenário de ocupação intermediária.	214
Figura 184 - Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos de comparação 1 a 10 do cenário de ocupação intermediária.	215
Figura 185 – Comparação dos perfis de velocidade calculados no Ponto de Comparação 1 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	216
Figura 186 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 2 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	216
Figura 187 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 3 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	217
Figura 188 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 4 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	217
Figura 189 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 5 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	217
Figura 190 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 6 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	218
Figura 191 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 7 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	218
Figura 192 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 8 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	219
Figura 193 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 8 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	219
Figura 194 - Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos localizados nos centros de quadra do modelo de ocupação máxima.	220
Figura 195 - Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos localizados nos centros de quadra do modelo de ocupação intermediária.	220
Figura 196 - Comparação dos perfis de velocidade calculados no Centro da Quadra 9 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	220
Figura 197 - Comparação dos perfis de velocidade calculados no Centro da Quadra 17 entre os cenários atual, máximo e intermediário.	221

Figura 198 - Comparação dos perfis de velocidade calculados no Centro da Quadra 19 entre os cenários atual, máximo e intermediário.....	221
Figura 199 - Convergência da simulação da situação atual com orientação sudeste.	222
Figura 200 - Convergência da simulação da ocupação máxima com orientação sudeste.....	222
Figura 201 - Convergência da simulação da ocupação intermediária com orientação sudeste. .	223
Figura 202 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste durante o primeiro semestre.	224
Figura 203 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da ocupação máxima com vento a sudeste durante o primeiro semestre.	225
Figura 204 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da ocupação máxima com vento a sudeste durante o primeiro semestre.	225
Figura 205 – Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste.	226
Figura 206 - Detalhe dos vetores a 1,5 m do solo próximos ao conjunto verticalizado a sudoeste do modelo	226
Figura 207 - Detalhe dos vetores a 1,5 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do modelo	226
Figura 208 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.....	227
Figura 209 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.....	227
Figura 210 - Permeabilidade ao vento a partir das vias e espaços entre edificações na ocupação intermediária.	228
Figura 211 – Permeabilidade ao vento a partir das vias e espaços entre edificações na ocupação máxima.....	228
Figura 212 – Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste.....	228
Figura 213 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da ocupação máxima com vento a sudeste.....	229
Figura 214 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da ocupação intermediária com vento a sudeste.	230
Figura 215 - Caracterização do fluxo junto às primeiras edificações no cenário de ocupação intermediária.	230
Figura 216 - Caracterização do fluxo junto às primeiras edificações no cenário de ocupação máxima.....	230
Figura 217 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste.	231

Figura 218 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.	232
Figura 219 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.	232
Figura 220 – Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste.	233
Figura 221 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de máxima ocupação com vento a sudeste.	234
Figura 222- Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.	234
Figura 223 – Caracterização do fluxo junto às primeiras edificações no cenário de ocupação máxima a 36 m do solo.	235
Figura 224 – Caracterização do fluxo junto às primeiras edificações no cenário de ocupação intermediária a 36 m do solo.	235
Figura 225 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste.	235
Figura 226 – Detalhe dos vetores a 32 m do solo próximos ao conjunto verticalizado a sudoeste do modelo.	236
Figura 227 – Detalhe dos vetores a 32 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do modelo.	236
Figura 228 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.	236
Figura 229 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.	237
Figura 230 - Permeabilidade ao vento a partir das vias e espaços entre edificações na ocupação intermediária a 36 m do solo.	237
Figura 231 - Permeabilidade ao vento a partir das vias e espaços entre edificações na ocupação máxima a 36 m do solo.	237
Figura 232 - Visualização do escoamento do vento a sudeste sobre o cenário atual através de <i>streamlines</i>	238
Figura 233 - Visualização do escoamento do vento a sudeste sobre o cenário de ocupação máxima através de <i>streamlines</i>	238
Figura 234 - Visualização do escoamento do vento a sudeste sobre o cenário de ocupação intermediária através de <i>streamlines</i>	239
Figura 235 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário da condição atual com vento a sudeste.	240
Figura 236 - Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo na parte central do cenário da situação atual e os vórtices nos espaços entre os prédios com vento a sudeste.	240

Figura 237 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical a sudoeste do cenário da condição atual com vento a sudeste.	241
Figura 238 - Detalhe dos desvios menos intensos sofridos pelo fluxo a sudoeste do cenário de ocupação atual.....	241
Figura 239 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical a sudoeste do cenário de máxima ocupação permitida com vento a sudeste.	242
Figura 240 – Vista lateral do plano vertical para o trecho central do cenário de máxima ocupação caracterizando o vórtice após o conjunto de edifícios altos.	242
Figura 241 – Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo de vento a sudeste ao encontrar os primeiros edifícios ao centro do modelo de máxima ocupação.....	243
Figura 242 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical a sudoeste do cenário de máxima ocupação permitida com vento a sudeste.	243
Figura 243 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.....	244
Figura 244 - Vista lateral do plano vertical para o trecho ao centro do cenário de ocupação intermediária caracterizando o vórtice após o conjunto de edifícios.	244
Figura 245 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical a sudoeste do cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.....	245
Figura 246 - Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo de vento a sudeste ao encontrar os primeiros edifícios a sudoeste do modelo. de máxima ocupação.	245
Figura 247 - Pontos de comparação dos perfis de velocidade no cenário de ocupação atual com vento a sudeste.....	246
Figura 248 – Perfis de velocidade segundo a altura no cenário atual para o vento a sudeste. ...	247
Figura 249 - Pontos de comparação dos perfis de velocidade no cenário de máxima ocupação com vento a sudeste.....	248
Figura 250 - Perfis de velocidade segundo a altura nos pontos de comparação para o cenário de máxima ocupação para o vento a sudeste.	248
Figura 251 - Pontos de comparação dos perfis de velocidade no cenário de máxima ocupação com vento a sudeste.....	249
Figura 252 - Perfis de velocidade segundo a altura nos pontos de comparação para o cenário de máxima ocupação para o vento a sudeste.	250
Figura 253 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 12.....	250
Figura 254 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 13.....	251
Figura 255 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 14.....	251

Figura 256 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 16.....	252
Figura 257 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 17.....	252
Figura 258- Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 18.....	252
Figura 259 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 19.....	252
Figura 260 – Pontos nos centros de quadra para avaliação do vento a sudeste.....	253
Figura 261 – Perfis de velocidades nos centros de quadra do cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste	253
Figura 262 - Perfis de velocidades nos centros de quadra do cenário de máxima ocupação com vento a sudeste	253
Figura 263 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 2.....	254
Figura 264 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 9.....	254
Figura 265 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 17.....	254
Figura 266 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 21.....	255
Figura 267 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 19.....	255
Figura 268 - Anomalia de precipitação	281
Figura 269 – Anomalia de Temperatura Máxima.....	282
Figura 270 – Anomalia de Temperatura Mínima	282
Figura 271 - Linha de corrente e anomalia durante janeiro 2009	282
Figura 272 – Linha de corrente e anomalia entre os dias 16 e 31 de janeiro 2009	282
Figura 273 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário atual com vento a leste durante o segundo semestre.	283
Figura 274 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o segundo semestre.....	283
Figura 275 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste durante o segundo semestre.....	284
Figura 276 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de atual com vento a leste durante o segundo semestre.	284

Figura 277 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o segundo semestre.	285
Figura 278 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste durante o segundo semestre.	285
Figura 279 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário atual com vento a leste durante o segundo semestre.	286
Figura 280 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o segundo semestre.	286
Figura 281 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste durante o segundo semestre.	287
Figura 282 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste durante o segundo semestre.	287
Figura 283 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste durante o segundo semestre.	288
Figura 284 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste durante o segundo semestre.....	288
Figura 285 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste durante o segundo semestre.	289
Figura 286 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste durante o segundo semestre.	289
Figura 287 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste durante o segundo semestre.....	290
Figura 288 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste durante o segundo semestre.	290
Figura 289 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste durante o segundo semestre.	291
Figura 290 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste durante o segundo semestre.	291

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de Beaufort	74
Tabela 2 – Coeficientes de acordo com as características do terreno.....	77
Tabela 3 – Comprimento de rugosidade segundo o meio	78
Tabela 4 - principais efeitos das edificações sobre o comportamento do vento	87
Tabela 5 – Quantidade de elementos em cada malha gerada para as simulações	97
Tabela 6 – Parâmetros iniciais das simulações determinados no módulo CFX - Pre	99
Tabela 7 – Características atribuídas as <i>parts</i> no domínio de orientação leste.....	100
Tabela 8 – Características atribuídas as <i>parts</i> no domínio de orientação sudeste.....	101
Tabela 9 - Indicadores urbanos de ocupação da macrozona adensável com destaque para os bairros Parque Iracema e Cambéba.....	116
Tabela 10 - Tabela Normais climatológicas para Fortaleza.....	127
Tabela 11 - Estações meteorológicas presentes na cidade de Fortaleza.....	131
Tabela 12 – Distribuição dos dados por hora do dia.....	133
Tabela 13 - Distribuição dos dados de vento por mês	133
Tabela 14 – Distribuição das direções entre os anos de 2002 e 2009	134
Tabela 15 – Distribuição dos dados de vento entre 2002 e 2009 por período do dia.....	136
Tabela 16– Distribuição dos dados de velocidade do ar entre 2002 e 2009 ao longo do dia	139
Tabela 17 – Distribuição da frequência de distribuição do vento durante o primeiro semestre .	143
Tabela 18 - Distribuição da frequência de distribuição do vento durante o primeiro semestre..	144
Tabela 19 - Apresentação sensores utilizados pela estação HOBO H21-001 para coleta dos dados <i>in loco</i>	152
Tabela 20 - Distribuição da frequência de direções do vento durante as medições <i>in loco</i>	153
Tabela 21 – Distribuição da frequência de velocidades do ar durante as medições <i>in loco</i>	153
Tabela 22 - Comparação da distribuição das frequências de direção do vento entre a área de estudo e Aeroporto	157
Tabela 23 – Velocidades médias do ar em Fortaleza para as orientações leste e sudeste durante os dois semestres.....	159

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIVC	<i>Air Infiltration and Ventilation Center</i>
BRE	<i>Building Research Establishment, Reino Unido</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
*.ccl	<i>CFX Command Language</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CIAM	Congressos Internacionais de Arquitetura Moderna
CLA	Camada Limite Atmosférica
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DoE	<i>Department of Energy</i>
ENCAC	Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
ELACAC	Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FUNCAP	Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GPAU	Grupo de Peritos sobre Ambiente Urbano
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INEMET-UFC	Estação Agroclimatológica da Universidade Federal do Ceará
LABAUT	Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo
PDDU-FOR	Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Fortaleza
PDPFor	Plano Diretor Participativo de Fortaleza
PLEA	<i>Passive and Low Energy Architecture</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RMS	<i>Residual Mean Square</i>
UBL	Urban Boundary Layer

UCL	Urban Canopy Layer
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZOM	Zona de Ocupação Moderada

LISTA DE REDUÇÕES

°	Ângulo em graus
%	Por cento, percentual
°C	Graus celsius
Av	Avenida
E	Leste
Gb	Gigabyte
hpa	Hectopascal
K	Graus Kelvin
km ²	Quilômetros quadrados
m/s	Metros por segundo
m	Metros
mm	Milímetros
m ²	Metros quadrados
N	Norte
NE	Nordeste
NW	Noroeste
P	Ponto
Pa	Pascal
PC	Ponto de Comparação
Rad	Graus radiano
S	Sul
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
W	Oeste
W/m ²	Watts por metro quadrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	39
1.1 Objetivo geral	41
1.2 Objetivos específicos.....	41
1.3 Metodologia da pesquisa	41
1.4 Justificativa da escolha do tema	42
1.5 Estrutura da dissertação.....	44
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	49
2.1 O Ambiente Urbano e a Sustentabilidade	49
2.2 Clima e Planejamento Urbano	53
2.3 Espaço, Forma e Paisagem Urbana	61
2.4 Índices Urbanísticos e Condições Ambientais.....	64
2.4.1 Índice de aproveitamento	65
2.4.2 Gabarito.....	66
2.4.3 Recuos	67
2.4.4 Taxa de ocupação	68
2.5 A Ventilação Natural em Ambiente Urbano.....	69
2.5.1. O Vento	69
2.5.1.1 Velocidade e direção do vento.....	74
2.5.1.2 Rugosidade aerodinâmica e gradiente de vento	76
2.5.1.3 Turbulência.....	78
2.5.2 Camada limite atmosférica	79
2.5.2.1 Camada limite urbana	80
2.5.3 A ventilação natural urbana	81
2.5.3.1 O comportamento do vento no entorno dos edifícios	85
2.5.4 Ferramentas para visualização da ventilação natural.....	88
2.5.4.1 A mesa d'água	88
2.5.4.2 O túnel de vento.....	89
2.5.4.3 Modelos de dinâmica dos fluidos computacional.....	91
2.5.4.3.1 O ANSYS CFX.....	93
2.5.4.3.1.1 A confecção do modelo.....	93
2.5.4.3.1.2 A malha.....	95
2.5.4.3.1.2 CFX-Pre	97
2.5.4.3.1.2.1 Condições iniciais	97
2.5.4.3.1.2.2 Condições de contorno	99
2.5.4.3.1.2 CFX-Solver	102
2.5.4.3.1.3 CFX-Post	103

3. ESTUDO DE CASO.....	107
3.1 A Cidade de Fortaleza	107
3.1.1 Expansão Urbana de Fortaleza	109
3.1.2 Legislação Urbana Aplicada à Cidade de Fortaleza	110
3.2 A área de estudo	118
3.3 Os cenários de ocupação do solo para simulação	123
3.3.1 A situação atual.....	123
3.3.2 A ocupação máxima permitida	124
3.3.3 A ocupação intermediária.....	125
3.4 Caracterização Climática da Cidade de Fortaleza	126
3.4.1 Regime de ventos.....	131
3.5 Medições in loco.....	146
3.5.1 Medição dos dados de vento	146
3.5.2 Preparação para as medições	148
3.5.3 Resultados das medições in loco	153
3.6 Conclusões acerca do comportamento do vento em Fortaleza	158
4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	163
4.1 Simulações com vento a leste	167
4.1.1 Visualização a 1,5 m do solo	167
4.1.2 Visualização a 10 m do solo	175
4.1.3 Visualização a 36 m do solo	181
4.1.4 Streamlines	187
4.1.5 Planos Verticais	189
4.1.6 Pontos de Verificação e Comparação	197
4.2 Simulações com vento a sudeste	222
4.2.1 Visualização a 1,5 m do solo	223
4.2.2 Visualização a 10 m do solo	228
4.2.3 Visualização a 32 m do solo	233
4.2.4 Streamlines	238
4.2.5 Planos verticais	239
4.2.6 Pontos de verificação e comparação	246
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	259
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	267
APÊNDICE	281
A1. Condições climáticas durante o período de medições in loco	281
A2. Resultados das simulações para o segundo semestre	283
ANEXOS.....	295

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

As preocupações acerca dos impactos ambientais e consumo energético resultantes do processo de urbanização da humanidade vêm ganhando posição de destaque nos últimos anos.

A modificação de ecossistemas naturais com o aumento do consumo de recursos e energia acontece continuamente à expansão urbana em todo o mundo. Situação bastante diferente do século passado¹, o aumento exponencial da população vem intensificando o crescimento das cidades em previsões alarmantes².

Diante da taxa de urbanização mundial, torna-se fundamental à sustentabilidade ambiental urbana compatibilizar o progresso das cidades em equilíbrio com o meio natural. O desenvolvimento de novas propostas e diretrizes de planejamento adequadas às condições locais é, portanto, essencial à criação de cidades que proporcionem qualidade de vida e conservação energética.

Planos de gestão do crescimento urbano elaborados por entidades como a Organização das Nações Unidas³ (ONU) envolvem a sociedade, o governo e administração local em benefício da coletividade. As diretrizes apresentadas pela *World Meteorological Organization (WMO)*⁴ objetivam, sobretudo, o desenvolvimento sustentado das cidades como alternativa à condição avançada de degradação ambiental vivenciada pelas principais metrópoles do planeta.

No caso do Brasil, a rápida e recente expansão urbana chama atenção para os problemas gerados pelas atividades antrópicas que, somadas à falta de controle efetivo, resultam em impactos negativos sobre o meio ambiente. De acordo com Moreno (2002), acompanhando o processo de urbanização que praticamente triplicou a quantidade de habitantes das metrópoles mundiais em cerca de meio século, a população brasileira é majoritariamente urbana, residindo em cidades que apresentam avançado estado de degradação das condições de vida e do ambiente citadino.

¹ Em 1950, os centros urbanos registravam 750 milhões de habitantes, correspondendo apenas a 29,7% da população mundial. Em 1975, mais de 1,5 bilhões de pessoas passaram a viver em cidades, 38% dos habitantes do planeta. O aumento verificado desde então alcançou a marca de 2,85 bilhões de pessoas residindo em aglomerações urbanas ao final do século XX, 47% da humanidade (UNFPA, 1999).

² Segundo a Divisão de População da Organização das Nações Unidas, em documento aberto à consulta na *internet* intitulado *State of world population 2007: unleashing the potential of urban growth*, de acordo com as atuais taxas de urbanização, em 2030 as cidades dos países em desenvolvimento deverão abrigar 80% da população urbana do planeta (UNFPA, 2007).

³ <http://www.unhabitat.org/>

⁴ As diretrizes apresentadas pelo boletim n° 844 de 1996 da WMO - *Climate and Urban Development*, visam à melhoria do conforto ambiental dos habitantes, no exterior e interior das edificações; redução da demanda de energia para condicionamento artificial dos edifícios; melhoria no escoamento superficial das águas; preservação dos corredores ocais de ventilação urbana, variação da altura dos edifícios para melhorar as condições locais de ventilação; adequada orientação solar e arranjo dos edifícios (WMO, 1996).

A cidade de Fortaleza vem apresentando um intenso crescimento nos últimos anos, não fugindo ao quadro dos centros urbanos de médio e grande porte que, segundo Macedo (1988), passam por um processo de expansão urbana e, portanto, alteração na configuração de suas paisagens, descaracterizando e degradando seus componentes naturais.

Na capital cearense, problemas ambientais verificados em centros urbanos maiores já são fatos de características próprias e merecedores de estudos mais aprofundados. Entre estes, ressalta-se a detecção de possíveis ilhas de calor, a crescente verticalização, diminuição da arborização no interior da malha urbana, altas taxas de impermeabilização do solo e poluição de mananciais. Tais fatores, de ordem mais abrangente, têm influência direta sobre aspectos mais específicos do conforto térmico no âmbito do espaço construído, agravados, sobretudo, pela condição subequatorial da cidade.

Diversos trabalhos científicos apontam a urbanização como responsável pela mudança no comportamento dos parâmetros climáticos locais e, conseqüentemente, das condições de conforto térmico nas cidades, mantendo, portanto, estreita ligação com a atividade de planejamento urbanístico (CHANDLER, 1976; OKE, 1987; BITAN, 1992; KATZSCHNER, 1997). Por outro lado, Romero (2001) salienta que dentre todos os componentes do clima, as condições de ventilação sofrem as maiores alterações durante o processo de urbanização.

Villas Boas (1983) observa que a massa construída da cidade modifica sobremaneira a forma de deslocamento do ar. A composição do cenário urbano incrementa a rugosidade do solo, alterando o movimento e velocidade dos ventos, determinando-lhes características próprias.

A forma do tecido urbano pode, ainda, obstruir canais de ventilação, levando a um aumento da temperatura e podendo gerar fenômenos tais como ilhas de calor e inversão térmica. Tais adversidades conduzem a uma elevação no consumo energético das edificações, gerando impactos ambientais e sócio-econômicos à população (MENDONÇA; ASSIS, 2001).

O objeto deste trabalho é a relação entre a morfologia urbana e a promoção da ventilação natural no ambiente urbano de Fortaleza, Ceará.

A investigação busca estabelecer instrumentos necessários à construção de um ambiente urbano sustentável através de um planejamento consciente, aproveitando o potencial dos ventos como forma de melhoria das condições ambientais na cidade e conforto térmico em edificações.

1.1 Objetivo geral

Estudar a influência da alteração nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural, como foco em trecho sudeste da malha urbana de Fortaleza.

1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Identificar o impacto da verticalização e do adensamento construtivo sobre a ventilação natural nesta parte específica da cidade de Fortaleza, corredor natural à entrada de brisas de origem leste-sudeste;
- Analisar, através de modelagem computacional, a interação entre prescrições urbanísticas - gabarito, recuos e taxas de ocupação - e as consequências das modificações nestes parâmetros sobre o comportamento do vento no local;
- Avançar no uso do *software* contribuindo à solução de dificuldades encontradas em pesquisas anteriores de simulação do comportamento da ventilação natural.

1.3 Metodologia da pesquisa

A metodologia para realização da pesquisa compõe-se das seguintes fases:

1. Pesquisa bibliográfica;
2. Pesquisa de campo;
3. Pesquisa experimental;
4. Análise dos resultados das simulações;
5. Conclusões da pesquisa

Empreendeu-se, inicialmente, pesquisa em referencial bibliográfico sobre os aspectos abordados neste estudo objetivando a aproximação do tema da ventilação natural no ambiente urbano. O levantamento primou pela variedade da base documental, buscando em diversas fontes as informações necessárias ao esclarecimento da questão ambiental e a sustentabilidade, a compreensão do fenômeno da urbanização e a formação do clima urbano, o papel desempenhado pelo planejamento dos atributos da paisagem urbana sobre as condições ambientais, o entendimento dos conceitos envolvidos na mecânica dos fluidos e o comportamento do vento.

Durante a pesquisa de campo foram levantados dados sobre a cidade de Fortaleza. Analisou-se a expansão urbana vivenciada pela metrópole e os seus reflexos sobre o setor sudeste do município, a legislação urbana vigente na capital cearense, além do levantamento de

mapas, imagens aéreas e informações sobre a área de estudo. Foi realizada, também, a caracterização climática de Fortaleza com foco no comportamento do vento, comparando-se, em seguida, aos dados medidos *in loco* como forma de determinar as predominâncias na velocidade e direção do vento (dados de entrada das simulações).

A pesquisa experimental partiu do aprendizado e operacionalização do programa ANSYS CFX 11.0 em seus módulos (*icem*, *cfx-pre*, *cfx-solver* e *cfx-post*). Em seguida foram elaborados os cenários tridimensionais de ocupação do solo tomando como base as determinações constantes na legislação urbanística e projeções de expansão para a área. Estes cenários foram, então, submetidos ao ambiente virtual de mecânica dos fluidos, permitindo visualizar o comportamento da ventilação natural para cada configuração da morfologia urbana no trecho analisado.

A etapa de análise dos resultados das simulações (dados de saída) foi feita comparando-se os diferentes cenários de ocupação do solo, visando identificar as diferenças no comportamento do vento entre cada situação simulada. Os resultados são visualizados através de vetores e linhas de contorno de velocidades do ar, apontando áreas de estagnação, pontos de aceleração dos fluxos e a criação de vórtices, entre outros aspectos.

As conclusões da pesquisa reúnem a interpretação dos resultados sobre a permeabilidade do vento em cada configuração de ocupação do solo proposta, permitindo avaliar os impactos dos contornos da forma urbana neste trecho da cidade sobre a ventilação natural.

1.4 Justificativa da escolha do tema

De acordo com Givoni (1994), a ventilação constitui a mais simples estratégia para obtenção de conforto quando a temperatura interna é elevada.

Em localidades de baixa latitude e clima quente e úmido, em que há pouca variação diária da temperatura do ar e elevados níveis de umidade relativa, torna-se imperioso o controle do ganho de energia solar e incremento da ventilação no espaço urbano e interior das edificações.

Nesses ambientes, as edificações devem evitar ganhos de calor do meio externo, dissipando aqueles produzidos em seu interior (KOENIGSBERGER et al, 1974). A zona de conforto em tais localidades relaciona-se fundamentalmente à velocidade do ar (FANGER, 1987).

Bittencourt (1993) acrescenta que, em conjunto com os protetores solares, o resfriamento por ventilação constitui a solução de melhor relação entre custo e benefício para o contexto das regiões quentes e úmidas. Como forma de adequar-se ao clima, o desenho urbano deve levar em consideração as perdas de calor por evaporação, a permeabilidade do vento no ambiente citadino e minimização das superfícies expostas à radiação solar incidente.

Costa (2001) observa que o aproveitamento da potencialidade do vento ainda não é um exercício aplicado ao projeto urbano, inexistindo prescrições edilícias em planos diretores resultantes de um planejamento integrado entre o sistema de ventilação e as diversas organizações urbanas.

As leis que regem a forma de ocupação e uso do solo urbano apresentam instrumentos que, hipoteticamente, se baseiam em princípios de conforto ambiental. A exigência de recuos fundamenta-se na necessidade de ventilação e iluminação natural imprescindíveis à salubridade e conforto dos usuários das edificações. Todavia, para a determinação ou alteração de tais índices não são desenvolvidos estudos científicos para observação de seus efeitos. O resultado são leis que não correspondem à realidade climática local.

Peregrino e Silva (2007) observam que, no Brasil, o desenvolvimento de trabalhos e o conhecimento das questões relacionadas ao vento e planejamento urbano podem ser considerados relativamente recentes. As consequências de tal deficiência no embasamento científico quando da tomada de decisões por parte das gestões públicas tem consequências diretas sobre as cidades e sua população.

Souza (2006) concorda que recursos relativamente altos são investidos para viabilizar a realização de planos de ordenação urbanística das principais cidades brasileiras sem, no entanto, se verificar os efeitos daquilo que é traçado sobre o meio ambiente e o clima. O estudo acerca do desenvolvimento urbano considerando os atributos climáticos exploraria racionalmente tais recursos e viabilizaria a economia de energia.

Na presente pesquisa, a opção pela cidade de Fortaleza como caso de estudo deve-se ao fato do município ocupar lugar de destaque entre as capitais brasileiras⁵. A metrópole apresenta problemas ambientais comuns às grandes cidades, revelando impactos resultantes de um desenvolvimento acelerado e recente, extrapolando os limites da sustentabilidade. A problemática urbana atual necessita de estudos mais apropriados também segundo o enfoque da adequação de seus espaços à melhoria da qualidade de vida de seus cidadãos, incluindo a análise de microclimas em ambientes internos e externos.

Recentemente, a cidade de Fortaleza passou pelo processo de discussão e revisão de seu plano de desenvolvimento urbano. O Plano Diretor Participativo de Fortaleza (PDPFor)⁶ baseou-se na construção da cidadania local através do envolvimento de diversos atores e entidades responsáveis pela dinâmica urbana. Entretanto, ressalta-se a ausência de uma avaliação mais precisa dos impactos das prescrições edilícias sobre o comportamento de elementos climáticos,

⁵ A cidade de Fortaleza registra, atualmente, 2.431.415 habitantes, ocupando o posto de quarta maior capital do país, segundo dados do IBGE (2007).

⁶ <http://www.fortaleza.ce.gov.br/pdpfor/>

sobretudo em áreas em processo de expansão urbana, o caso da parte sudeste da capital cearense.

A permissividade da atual legislação urbana de Fortaleza referente a um trecho específico inserido no setor sudeste despertou o interesse em se avaliar os impactos do aumento do índice de aproveitamento e elevação do gabarito das edificações, responsáveis pela modificação nos padrões de ocupação da área através da verticalização e adensamento construtivo, sobre as condições de ventilação natural.

Registra-se, ainda, a contribuição da pesquisa à lacuna de conhecimentos relativa à área de ventilação natural tanto na escala do edifício quanto da cidade. O levantamento das principais questões da área de conforto ambiental tratadas nos programas de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo realizado por Vianna (2001) aponta à rarefeita produção técnica sobre o tema em dissertações e teses.

Cóstola (2006) atualizou o levantamento realizado, construindo um panorama da pesquisa em ventilação natural posterior ao trabalho mencionado. Buscando referencial bibliográfico contendo a palavra ventilação em algumas instituições de ensino dotadas de programas de pós-graduação em arquitetura, engenharia, agronomia e meteorologia o autor reforça a ainda contida investigação sobre o fenômeno. Em eventos da área, mais especificamente o ENCAC e o PLEA, o autor verifica que na maioria das pesquisas brasileiras, a abordagem dos aspectos da ventilação natural é feita de maneira superficial.

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação divide-se em 6 capítulos.

O **capítulo 1** apresenta a introdução ao tema, objetivos a serem alcançados, justificativa da sua escolha e a estruturação do trabalho.

A pesquisa parte, no **capítulo 2**, da revisão do panorama da questão ambiental, sua relação com a sustentabilidade urbana e o papel desempenhado pelo planejamento urbano face às alterações provocadas pela urbanização sobre o clima local.

Como parte necessária à compreensão da conformação urbana da área objeto de estudo, examina-se, também, a relação entre as prescrições edilícias (Estado) e os interesses da especulação imobiliária (Mercado) que redundam na forma do espaço urbano tal como é percebido pela sociedade.

Em seqüência realiza-se o estudo pormenorizado do vento, a origem do fenômeno, suas características e seu comportamento sobre o meio urbano, os principais métodos de avaliação da ventilação natural e a descrição dos fundamentos da simulação computacional do comportamento do vento.

O **capítulo 3** trata do objeto de estudo: a cidade de Fortaleza. Apresenta-se a evolução da metrópole, examinando os contornos da expansão urbana vivenciada no setor sudeste da capital cearense e a legislação urbanística aplicada (Lei de uso e ocupação e Plano Diretor), servindo de base para a formulação dos cenários de ocupação do solo a serem simulados no programa de Mecânica dos Fluidos Computadorizada para visualização do comportamento do vento na área de estudo. É apresentada, ainda, a caracterização climática do município com foco no regime de ventos, comparando-a as medidas realizadas na área de estudo.

O **capítulo 4** reúne os resultados das simulações da ventilação natural nos modelos de ocupação do solo propostos.

O **capítulo 5** discorre sobre as conclusões relativas às simulações computacionais.

Por último, o **capítulo 6** encerra o referencial bibliográfico consultado.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O Ambiente Urbano e a Sustentabilidade

O progresso industrial vivenciado pelos países mais desenvolvidos no início do século XX provocou a exploração excessiva dos recursos naturais e conseqüente degradação ambiental.

Muito embora as preocupações ambientais remontem o século XIX, o movimento ambiental surge somente mais tarde, em meados da década de 1960, nos Estados Unidos (VIOLA, 1991). Trata-se, entretanto, de uma contida mobilização de interessados reunidos em grupos e associações. Evolui, posteriormente, para um movimento multissetorial, espalhando-se por outros países e continentes.

No início dos anos de 1970 percebe-se que a quantidade de recursos constituiria um fator limitador do crescimento econômico. Compreende-se, portanto, que sociedades e economias estáveis não poderiam coexistir com o contínuo aumento da pobreza e da degradação do meio ambiente (ALIROL, 2004).

Diante da ainda recente questão ambiental surgem dois eixos centralizadores. É proposta, de um lado, a suspensão do crescimento econômico e populacional pelo Clube de Roma em seu relatório “Os Limites do Crescimento” e, de outro, o alinhamento da proteção ambiental com os problemas causados pelo modelo de desenvolvimento econômico adotado até então, de forma a estabilizar a população mundial em médio prazo, objetivo expresso pela Conferência de Estocolmo, realizada em 1972 (VIOLA, 1991). A Conferência sobre o Meio Ambiente Humano, como ficou conhecida, introduziu o termo “ecodesenvolvimento” no cerne das discussões ambientais.

A preocupação pública com relação à degradação ambiental se espalha progressivamente, transformando o ambientalismo em um movimento complexo a partir da segunda metade da década de 1980 (VIOLA, 1991).

No âmbito dos edifícios, surgem as primeiras normas visando à conservação de energia, as quais enfatizavam somente a redução do consumo energético, mormente utilizado para condicionamento de ambientes internos. O panorama mundial após a crise mundial do petróleo, em 1973, apresenta a conservação energética enquanto tendência mundial.

Viola (1991) destaca que, ao final da década de 1980, ocorreu uma significativa abertura nas organizações ambientalistas para a discussão sobre outras formas de desenvolvimento, surgindo três posicionamentos. O *Earth First* propõe a redução do crescimento populacional e retirada da população assentada em diversos ecossistemas; o Partido Verde Alemão, por sua vez, revoluciona ao proclamar a necessidade em disseminar uma nova ética ecológica e estagnação do produto bruto mundial; e, por último, a maioria reunida na Comissão Brundtland, em 1983,

redige o relatório “Nosso Futuro Comum”, publicado em 1987, considerando necessário adotar um modelo desenvolvimentista que incorpore a sustentabilidade nos níveis social e ambiental através do planejamento familiar e mudança dos sistemas de produção predatórios para sustentáveis – o chamado desenvolvimento sustentável⁷.

Moreira (1997) afirma que os diferentes tratamentos da questão ambiental por estas entidades apresentam, entretanto, um vínculo comum ao abordar as relações entre os homens e a natureza para a preservação dos recursos naturais.

Em 1991 a Comissão Européia institui o Grupo de Peritos sobre Ambiente Urbano (GPAU), que levou à criação da campanha “Cidades Sustentáveis”, lançada mais tarde, durante a Conferência de Aalborg, em 1994. O projeto pretendia contribuir para os debates políticos sobre o meio ambiente em busca do desenvolvimento urbano sustentável, apoiando as cidades para alcançar resultados praticáveis, disseminar ações e promover a capacitação de agentes (GPAU, 1996).

No Brasil, após a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro e popularmente conhecida como Eco 92, o conceito de desenvolvimento sustentável torna-se, então, familiar aos que atuam nesta área do conhecimento, apontando à necessidade de refletir sobre a relação entre desenvolvimento econômico e proteção ao meio ambiente (ALIROL, 2004). A gerência do crescimento constitui, então, uma abordagem adequada em relação ao ambiente.

Como principal produto da Conferência, a Agenda 21 evidencia as bases para promover, desde a instância municipal, desenvolvimento compatível com os limites e capacidades do meio natural, reconhecendo que grande parte dos problemas globais tem sua origem na escala local. A maioria dos aspectos anunciados possui relação direta com as cidades e o setor da construção civil.

Acselrad (1999) afirma, entretanto, que o conceito de sustentabilidade aplicado ao espaço urbano tem tomado diversos rumos e dimensões visando à gestão das cidades, estendendo-se desde a coordenação dos riscos e incertezas até a capacidade de adaptação das estruturas urbanas. O autor enfatiza, ainda, que persiste a imprecisão no conceito de desenvolvimento sustentável, o que implica na ausência de hegemonia entre os diferentes discursos: a representação técnico-material da cidade, a cidade como espaço da “qualidade de vida” e a reconstituição da legitimidade das políticas urbanas.

⁷ A expressão desenvolvimento sustentável aparece pela primeira vez no relatório Brundtland. Ver: **Nosso futuro comum** – Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1988.

Para Costa (2000), a inquietação diante da questão ambiental associada ao ambiente urbano surge em paralelo à solidificação do capitalismo ocidental e a apropriação do espaço citadino pela indústria. A preocupação ambiental aparece como reação à forma predatória de produção capitalista, questionando o modelo de organização espacial do projeto de modernidade então colocado. Em relação ao espaço urbano, a noção de sustentabilidade foi desconsiderada por cerca de 30 anos. Diante da incapacidade para abordar a aglomeração populacional nas cidades, os ambientalistas passaram a negar a sua existência, encarando-a tão somente pelo viés negativista ante o meio ambiente e excluindo o tratamento de um importante processo social para a compreensão do problema.

Modelos de planejamento urbanístico constituem ferramentas necessárias à incorporação e organização espacial das alterações provocadas no ambiente da cidade, variando segundo a sua flexibilidade de adaptação/aceitação dessa demanda. Na Europa, explica Costa (2000), a visão de planejamento urbano é caracterizada pela intervenção do Estado através de políticas sócio-espaciais e ambientais. No Brasil, as experiências recentes vêm atualizando a discussão sobre planejamento e intervenção urbana, ressaltando a sua complementaridade através da atenção dada à questão ambiental.

Costa (2000) afirma ainda que, mundialmente, ocorreu uma mudança no enfoque ambiental nos últimos anos, passando de uma visão puramente conservacionista à associação entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental, o que reforçou o ideal de sustentabilidade. Como prova, a autora aponta as intenções de avanço em relação às estratégias, base político-social e associação entre desenvolvimento e pobreza entre outras medidas provocadas pelos debates incitados por organismos internacionais com o objetivo de avaliar propostas de intervenção.

Nesse sentido, destacam-se as discussões iniciadas em 1997 com a assinatura do Protocolo de Kyoto, no qual seus signatários, preocupados com o aumento progressivo das temperaturas em escala global, comprometem-se a reduzir as emissões de gases geradores do efeito estufa.

A efetiva evolução tem início, então, sob o signo da eficiência energética, tornando claro que a conservação de energia deve associar-se à qualidade de ambientes internos e externos. O conceito geral de projeto de ambientes construídos energeticamente eficientes surge, então, da observação de todos os aspectos ambientais, não somente do ponto de vista do desempenho, mas tomando como base diversos outros critérios qualitativos (ALLARD, 1998). Diante do quadro apontado por estudiosos, instituições reguladoras e projetistas, muitos países desenvolveram códigos e princípios visando à redução das necessidades energéticas dos edifícios.

A união dos países europeus tem sido um dos organismos internacionais mais comprometidos com as políticas de desenvolvimento sustentado (HIGUERAS, 2006). O ambiente urbano é uma das prioridades da Comissão Européia. Através de programas cujo objetivo global é a melhoria do desempenho ambiental e qualidade das zonas urbanas aliada às oportunidades e desenvolvimento no âmbito socioeconômico, a entidade objetiva garantir um ambiente saudável à vida dos habitantes de grandes cidades.

No Brasil, como reflexo das preocupações acerca da questão, o PROCEL⁸ foi criado com o intuito de coordenar alternativas para alcançar a eficiência energética desejada. Como avanços ao programa, o Procel Edifica estimula a aplicação de princípios de eficiência energética em edifícios desde a fase de concepção projetual, uma vez que parte considerável do potencial energético é consumido pela construção e operação das edificações. (PROCEL, 2007). Duarte (2000) acrescenta que o programa condena o desperdício e incita à conscientização e participação das pessoas no planejamento urbano, projeto e construção de edificações eficientes.

No campo da arquitetura e do urbanismo, o atendimento às questões de eficiência energética a partir do aproveitamento dos elementos do clima e características locais para seu condicionamento traduz-se no bioclimatismo⁹.

Através da adaptação dos traçados e morfologia urbana às condições singulares do clima e do território, respondendo a critérios de insolação e ventilação locais, a abordagem bioclimática aplicada ao desenho da cidade compreende que para cada situação geográfica é necessário uma ordenação urbana específica. Higuera (2006) explica que os métodos do urbanismo bioclimático incorporam condicionantes ambientais e urbanos locais na definição de diretrizes de planejamento urbano que levem em consideração a capacidade de suporte de adensamento, a presença de vegetação, o impacto sobre o entorno, a geração de ruído, a demanda do sistema de transportes, as relações com o sítio natural e as próprias implicações dos domínios morfoclimáticos.

O clima constitui elemento fundamental do ambiente urbano. A qualidade do clima, no entanto, não é considerada na agenda de planejamento visando à promoção da sustentabilidade urbana, inexistindo legislação específica (ALCOFORADO et al, 2005).

Ao mesmo tempo, as cidades abrigam, atualmente, a maior parte das atividades econômico-financeiras, sociais e culturais associadas a grandes contingentes populacionais,

⁸ O governo brasileiro criou, através da Eletrobrás, em dezembro de 1985, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). Desde então, o projeto vem incentivando e desenvolvendo pesquisas no sentido da conservação energética como forma de retardar a necessidade de novos investimentos em hidrelétricas, evitando os impactos ambientais, econômicos e sociais resultantes desta matriz.

⁹ O termo foi criado pelos irmãos Victor e Aladar Olgyay em seus estudos para o MIT (OLGYAY; OLGAY, 1957).

constituindo áreas de elevada demanda e consumo de energia, água e matérias primas (ASSIS, 2005). Diante desse quadro, o planejamento urbano tem papel fundamental, uma vez que o meio citadino interfere diretamente no potencial de aproveitamento dos recursos do clima para condicionamento natural das edificações, com conseqüências sobre o consumo energético e qualidade ambiental destas.

2.2 Clima e Planejamento Urbano

O homem estabelece uma relação dualística com a natureza: o mesmo meio agressivo do qual deve se proteger das variações severas lhe fornece recursos essenciais à vida. Na busca de elementos do entorno que sirvam para completar as capacidades de seu próprio corpo, a utilização de quaisquer instrumentos, ainda que primitivos, constitui o passo inicial à ação de domínio do ambiente por meio de componentes artificiais.

Rivero (1988) afirma que a adequação física e química ao ambiente é fundamental à estruturação orgânica dos seres vivos, pois cada organismo exige do meio condições ambientais precisas. O clima, um dos principais elementos constituintes do meio natural, reúne fenômenos ambientais capazes de atuar sobre a percepção e bem-estar dos ocupantes de uma edificação. Assim, compreende-se a arquitetura como um complemento da ação de adaptação do corpo humano ao ambiente natural (SERRA, 1999).

As aglomerações urbanas, por sua vez, nascem das necessidades sociais do homem e multiplicam tanto os seus costumes como seus meios de expressão (MUMFORD, 1961). A cidade constitui a expressão máxima do processo de produção da humanidade, constituindo o próprio meio à circulação da produção e base para as relações sociais (CARLOS, 2007). O fenômeno da urbanização representa uma realidade cada vez mais generalizada¹⁰.

À medida que o processo de crescimento das cidades avança sobre o meio ambiente, as áreas urbanas e metropolitanas são as mais afetadas devido ao fato de corresponderem às parcelas do espaço terrestre mais profundamente modificadas. Torna-se essencial, portanto, o estudo do fato urbano no sentido de orientar o seu crescimento, ordenando o espaço¹¹ resultante das relações entre o homem e o meio.

A análise da cidade como disciplina profissional, com embasamento e rigor científico, remonta o início do século XX. A *“era das metrópoles”*, segundo Choay (1979), indicava a

¹⁰ No caso do Brasil, a população residente em centros urbanos em 1950 correspondia a 36% do total de brasileiros, contrastando com os 64% que viviam em áreas rurais. A década de 1970 constitui o marco desta transição, registrando 56% dos brasileiros morando em cidades, enquanto 44% ainda habitavam a zona rural. A população urbana brasileira atingiu o percentual de 81% em 2000, de acordo com o IBGE (BRASIL, 2007).

¹¹ Utiliza-se aqui a conceituação de espaço do professor Milton Santos, retirada de sua obra *Por uma Geografia nova, que o define enquanto “um conjunto de formas representativas de relações sociais do passado e do presente e por uma estrutura representada por relações sociais que estão acontecendo diante dos nossos olhos e que se manifestam através de processos e funções”* (SANTOS, 1978).

necessidade do planejamento urbano e regional face ao aumento da população residente em centros urbanos que seguiu à Revolução Industrial. O crescimento desenfreado das cidades vivenciado pelo período foi impulsionado pelo desenvolvimento da indústria e do automóvel, lançando a base e dinamismo necessários à expansão horizontal da urbe (ECKARDT, 1975).

Ainda no século XIX, as intervenções sanitaristas abordavam a questão das aglomerações enquanto locais de formação e difusão de epidemias. Segundo Toledo (1999), com as novas tecnologias construtivas e hábitos de vida do século XIX, muitas modificações foram incorporadas às cidades e às construções. Os códigos sanitários e de posturas municipais, desenvolvidos sob a ótica higienista e inspirados na legislação européia, foram implantados objetivando proporcionar um ambiente sadio à comunidade.

Mais tarde, as tentativas de ordenação e contenção do crescimento caótico dos principais centros urbanos europeus, degradados pela presença massiva da indústria e excessiva aglomeração populacional em críticas situações de higiene, impulsionam o desenvolvimento do planejamento regional preconizado por Patrick Geddes. O biólogo e filósofo escocês baseia-se nas premissas utópicas de Robert Owen, Charles Fourier e, sobretudo, Ebenezer Howard, na tentativa de concretizar a vida na cidade associada à natureza, conceito concretizado pela cidade-jardim. De acordo com Jacobs (2000), o conjunto seria gerido por uma administração local, responsável pela manutenção dos seus índices de densidade construtiva, evitando o seu aumento além dos limites fixados.

Como uma fuga da condição tipicamente urbana, espalhando-se para cada vez mais longe, as cidades-jardim planejadas seriam interligadas através de sistemas de transporte, articulando-se em um vasto conglomerado policêntrico (ECKARDT, 1975; HALL, 2007). A valorização do ideal da qualidade de vida expressa nos moldes de cidade-jardim, garantindo critérios de aeração, insolação e iluminação natural a partir da orientação das edificações e espaçamento entre estas, resultou na sua adaptação a propostas urbanísticas em diversos países europeus e cidades norte-americanas.

Entretanto, reflete Higuera (2006), o alto consumo de solo e elevado dispêndio energético para manutenção das infra-estruturas horizontais e deslocamentos compromete a sustentabilidade do modelo.

Posteriormente, os Congressos Internacionais de Arquitetura Moderna (CIAM) disseminaram um ideário urbano universal em oposição aos padrões orgânicos e à cidade-jardim. A cidade funcional, setorizada segundo suas funções, pretendia seguir a orientação solar na disposição das fachadas de edificações de grande altura sobre pilotis, libertando o solo à circulação pública e promovendo o adensamento urbano.

Para Jacobs (2000), as propostas de Le Corbusier no campo urbanístico provinham de padrões já vistos. A autora relata que o arquiteto franco-suíço “*assimilou a imagem fundamental da cidade-jardim, ao menos superficialmente, e empenhou-se em torná-la prática em locais densamente povoados. Definiu sua criação como uma cidade-jardim factível*”. Ademais, Brandão (2009) reflete que Le Corbusier apropriou-se de aspectos urbanos já tratados por Howard, sobretudo em relação à qualidade ambiental, e tencionou aplicá-los à sociedade industrial em benefício da cidade. Sua proposta, sintetizada na Carta de Atenas, em 1943, indicava um zoneamento rígido e um resultado formal consistente: edificações isoladas pelo afastamento com vistas a garantir ventilação e insolação adequadas, entremeadas por espaços verdes livres do movimento de veículos.

Higueras (2006) considera contraproducente a adoção desvirtuada das premissas modernistas na escala do edifício e da cidade. Não obstante às intenções de orientação solar resultantes dos estudos de Walter Gropius e de alguns postulados de Le Corbusier interessantes ao condicionamento natural das edificações, de maneira geral, a reprodução do projeto moderno em outras localidades desconsiderava o papel do clima no desenho de edificações e cidades.

Apesar das preocupações quanto à insolação nos edifícios e condições ambientais do meio urbano, o projeto de cidade modernista apresentava problemas sociais resultantes do padrão de urbe massificado, o qual destituiu seus espaços de significado e identidade, esvaziando-os, por conseguinte. Além da forte segregação espacial, nesse modelo, o pedestre foi subjugado, uma vez que o planejamento em grande escala da cidade moderna, com suas dimensões monumentais e vias expressas, subordinava-se ao automóvel.

Em contraposição ao alastramento da cidade e os impactos ambientais conseqüentes, o movimento *new urbanism*¹², iniciado na década de 1990, indica a flexibilidade e variabilidade de usos e funções como forma de gerar a vitalidade necessária aos espaços urbanos, aliando o adensamento populacional em detrimento do uso indiscriminado do automóvel, diminuindo a necessidade de grandes deslocamentos para economia e preservação ambiental. O movimento retoma princípios de sustentabilidade urbana tais como a redução do consumo de recursos naturais baseado no ordenamento urbano criterioso e eficiência energética de edificações.

Analisando os modelos de cidade-jardim, o projeto urbano modernista e os preceitos difundidos pelo movimento *new urbanism*, é possível inferir acerca da valorização do viés da qualidade ambiental urbana nas tentativas de ordenar a cidade. Mais especificamente, apreende-se que preocupar-se com o clima do lugar na tentativa de retomá-lo à prática projetual

¹² <http://www.cnu.org/>

urbanística e arquitetônica constitui aspecto fundamental ao equacionamento do espaço construído mais adequado às necessidades humanas.

Na concepção urbana ao longo da história, o clima constituía elemento fundamental na localização dos assentamentos humanos, como expresso pelos tratadistas Marcus Vitruvius Pollio¹³ e Leon Battista Alberti¹⁴. Em contrapartida, os atuais centros urbanos concentram a maior parte da população mundial, representando as mais impactantes alterações sobre a paisagem natural, desconsiderando, na maioria dos casos, o clima local para a organização destes espaços.

Rogers (1997) identifica o avanço nos recursos tecnológicos relativos ao ambiente construído como responsáveis pelo distanciamento entre homem e natureza. Assim, contrapõe-se o edifício ao espaço natural que o rodeia, fechando-o em si ao invés de conciliá-lo na proposta arquitetônica como forma de solucionar os problemas advindos do desequilíbrio que se apresenta em grandes metrópoles.

Nesses termos, declara Hough (1998), a vida urbana foi convertida em uma série de experiências condicionadas artificialmente, isolando cada vez mais do exterior insalubre as atividades de moradia, trabalho ou transporte. Entretanto, preocupar-se restritamente com o microclima interior é subestimar o papel climático do ambiente externo, aspecto gerado pela maior segurança em microclimas internos controlados.

Por outro lado, Sant'anna (2007) prevê que o encantamento com os sistemas de condicionamento de ar cederá lugar ao debate acerca do consumo energético resultante da adoção deste, além das negativas implicações sobre o organismo humano¹⁵. A autora enfatiza, ainda, que após uma negação total do clima em sua relação com ambientes internos, associado às pressões das ciências ecológicas e o crescente esgotamento dos recursos naturais, estabelece-se um novo perfil de arquiteto, consciente de tais questões e considerando a validade das tecnologias passivas. O surgimento da Engenharia Ambiental como ciência de suporte ao desenvolvimento de projetos que adotam tecnologias consideradas limpas, integra-se à tentativa de amenizar os impactos da existência humana sobre a natureza, mais especificamente as concentrações urbanas.

¹³ A primeira parte da obra *De Architectura Libri Decem* apresenta indicações direcionadas aos arquitetos para assentamento de cidades em relação às características do clima e do sítio.

¹⁴ *De re aedificatoria*, escrito em 1452, é o primeiro livro de arquitetura a ser publicado, em 1485. A segunda parte do tratado discorre sobre a tríade clima, homem e construções.

¹⁵ Fumaça de cigarro, partículas encontradas em tapetes, tecidos ou mesmo paredes recentemente pintadas liberam substâncias nocivas, que circulam devido o sistema de ar condicionado instalado, sendo aspiradas pelos que utilizam estes ambientes. A umidade do ar retirada pelo sistema pode ressecar as mucosas, causando irritação nos olhos, nariz e garganta, além de dores de cabeça.

Hough (1995) acrescenta que, atualmente, a cidade tem apresentado maior impacto ambiental, nas condições de vida e atitudes do que em qualquer outra época. Segundo o autor, os centros urbanos modificaram microclimas para atender necessidades particulares diante das condições locais. O conforto humano, e em alguns casos a sobrevivência, dependeram da habilidade com a qual as edificações e a forma de construir o lugar adaptaram-se ao ambiente climático.

Parte-se do fato aceito pela comunidade científica, que concorda que as alterações nos parâmetros climáticos, em escalas local e mesoclimática, guardam relação direta com a urbanização. Tais mudanças são percebidas através da constante modificação da morfologia urbana, retirada da vegetação original, movimentos de terra, canalização de cursos d'água e impermeabilização do solo entre outras ações de transformação do sítio natural para o atendimento das necessidades da sociedade instalada.

O processo de urbanização produz alterações radicais na natureza da superfície e propriedades atmosféricas da região. As transformações envolvem a modificação das características radiativas, térmicas, de umidade e aerodinâmicas associadas ao entorno imediato, alterando os balanços naturais térmico e hidrológico (OKE, 1987). Os efeitos colaterais da urbanização sobre o clima são muitos e variados, constituindo o resultado da interferência na operação dos sistemas naturais, alterações estruturais nas características meteorológicas do ar no interior e imediatamente acima das cidades, gerando um comportamento específico denominado clima urbano (CHANDLER, 1976).

Para Monteiro (1976), os impactos deste clima próprio são manifestações ligadas ao conforto térmico, à qualidade do ar, aos impactos pluviais e a outras manifestações capazes de desorganizar o cotidiano nos centros urbanos e prejudicar a qualidade de vida de seus habitantes. É nesses aglomerados urbanos e de acúmulo de calor que se produz *stress* térmico, conformando o que se convencionou denominar ilha de calor, considerada a mais clara manifestação climática da urbanização (LANDSBERG, 1981).

Brandão (1996) assinala que as mudanças produzidas pelas atividades humanas sobre o clima são reconhecidas desde as civilizações grega e romana. No entanto, os estudos sobre o tema só foram surgir efetivamente no século XIX, em Londres e Paris, realizados por Luke Howard e Emilien Renou, respectivamente. Estas pesquisas utilizavam dados de estações meteorológicas para apontar os impactos da urbanização sobre o clima.

Nos últimos anos, os estudos do clima urbano vêm ganhando importância devido às modificações significativas que são introduzidas no ambiente pelo processo de urbanização e seus reflexos sobre a qualidade de vida. O impacto dos assentamentos humanos sobre o clima é

objeto de diversas investigações, uma vez que os conhecimentos para quantificação da alteração nas variáveis envolvidas, a legislação e o avanço tecnológico possibilitam auxiliar tais questões.

No Brasil, os estudos geográficos relativos ao ambiente climático das cidades têm se desenvolvido a partir da teoria clima urbano (MONTEIRO, 1976). A teoria integra a abordagem dos fatos climáticos a outros elementos da geografia para compreensão dos problemas no ambiente urbano e entende a organização climática peculiar da cidade enquanto um sistema singular, aberto, evolutivo, dinâmico, adaptativo e auto-regulável, que abrange o clima de um dado espaço terrestre e a sua urbanização.

Conforme Mendonça (1995), o clima compõe uma das dimensões do ambiente urbano, tendo o seu estudo fornecido importantes contribuições visando o equacionamento da questão ambiental nas cidades.

Gomes e Lamberts (2009) reforçam que o estudo do clima urbano fornece subsídios para que aspectos relativos à qualidade ambiental sejam incorporados adequadamente na legislação urbana. Tal abordagem permite associações tanto com o planejamento das áreas livres, do qual são derivadas questões como o zoneamento, a preservação ambiental e a expansão urbana, entre outros, quanto das áreas construídas, que se relacionam ao uso e ocupação do solo e ao código de edificações, podendo contribuir para a criação de índices urbanísticos mais apropriados em termos de insolação, iluminação e ventilação naturais.

Especificamente voltadas ao planejamento urbano e sua relação com o clima, destacam-se os trabalhos de Oliveira (1988), Katzschner (1997), Duarte (2000) e Assis (2000) desenvolvidos no âmbito da arquitetura e do urbanismo. O avanço nas pesquisas sobre os aspectos envolvidos na dinâmica espacial urbana e sua relação com o clima é fundamental para a compreensão da qualidade térmica dos espaços construídos, contribuindo no processo de planejamento local.

Baseado nos atributos da morfologia da cidade que condicionam o clima, tais como a rugosidade, a porosidade, a densidade ocupacional, o gabarito, a permeabilidade do solo e as características térmicas dos materiais associados à geomorfologia do sítio, Oliveira (1988) elaborou uma série de recomendações para o planejamento urbanístico direcionado aos climas quente-úmido, quente-seco e frio visando critérios gerais de conforto e salubridade.

A metodologia desenvolvida por Katzschner (1997) sugere uma análise físico-ambiental do clima urbano levando em consideração o conforto térmico e a qualidade do ar através do levantamento de hipóteses do comportamento das variáveis climáticas utilizando modelos físicos e medidas de campo. Os resultados permitem identificar áreas que bioclimaticamente apresentam respostas significativas através de mapas de topografia, altura das edificações, uso

do solo e áreas verdes, com vista à elaboração de mapeamento climático importante para o planejamento urbano.

Katzschner (2007)¹⁶ acrescenta que os fatores envolvidos na dinâmica do clima urbano, sobretudo o aumento populacional, o adensamento construtivo, a verticalização das edificações, a supressão da vegetação urbana e a ampliação do tráfego têm chamado a atenção de projetistas, devendo ser incorporados ao processo de planejamento urbano. No entanto, há que se considerar tanto os princípios físicos do clima urbano como as características climáticas locais e o desenvolvimento específico vivenciado por cada cidade.

Duarte (2000) conduziu estudo empírico de forma a comprovar que as variáveis urbanísticas de uso e ocupação do solo e a proporção de áreas verdes e massas d'água dão origem aos microclimas urbanos associados a estas. Através de regressão linear simples foi elaborado um índice para verificar as condições térmicas do ambiente urbano.

Assis (2000) empreendeu um método de simulação do desempenho e trocas térmicas de áreas urbanas em sua relação com o fenômeno de ilha de calor. Os resultados indicam a possibilidade de aplicação do método ao planejamento urbano no controle da densidade construída e volumetria das edificações. A autora propõe, ainda, que a abordagem do clima segundo o referencial humano, ou seja, sob a perspectiva dos aspectos do clima suscetíveis de atuar sobre a sua percepção, seu organismo e suas atividades, parece mais adequada para a atividade de organizar a paisagem natural segundo as necessidades sociais e econômicas que resultam no espaço.

Ainda, de acordo com Assis (2005), a integração de distintas áreas do conhecimento, tais como a geografia física e climatologia urbana, aliadas ao desenvolvimento de ferramentas computacionais cada vez mais acessíveis, contribui para um maior entendimento do comportamento das variáveis envolvidas no ambiente atmosférico urbano. Ainda, as contribuições das pesquisas realizadas aos campos da arquitetura e urbanismo, residem na abordagem do clima urbano enquanto sistema a partir dos canais da percepção humana, dentro das quais se inserem o conforto térmico, qualidade do ar e impacto meteórico.

As sociedades urbanas contemporâneas estão se desenvolvendo em cidades cujas dimensões nunca foram tão expressivas. A maior parte desta população está em países em desenvolvimento, onde os impactos no ambiente natural e construído adquirem contornos preocupantes devido à especulação do solo urbano. Do ponto de vista do clima, as mudanças geradas pela urbanização sobre cidades tropicais são consideradas mais severas, gerando situação de *stress* bioclimático pelo aumento da temperatura do ar, diminuição da umidade

¹⁶ Conteúdo apresentado durante a palestra **New Developments in Applied Urban Climatology**, proferida pelo Prof. Dr. Lutz Katzschner durante o IX ENCAC e V ELACAC, em Ouro Preto, 2007.

relativa e decréscimo da ventilação natural, elevando o consumo energético para condicionamento ambiental dos edifícios.

Mascaró (1996) compreende a cidade enquanto um pólo de concentração energética. A necessidade de consumo de energia para obtenção de níveis de conforto ambiental adequados não tem origem apenas nas condições climáticas, mas, sobretudo, deve-se ao desconforto resultante de uma ordenação espacial urbana e arquitetônica que desconsidera o entorno. Em grandes centros urbanos, o modo de vida da comunidade conduz a um consumo mais intenso, fato que se deve aos acentuados deslocamentos, verticalização e adensamento populacional¹⁷, investimentos em infra-estrutura e conforto ambiental apropriados à escala e estilo de vida da população.

Para Romero (2001), os problemas ambientais frutos da urbanização excessiva, que relegam a um segundo plano as características do local e geram impactos negativos aos quais a população é exposta, podem ser contornados com um desenho mais apropriado.

Muito embora tenha se avançado na compreensão dos fenômenos do clima urbano, esclarece Duarte (2003), o desafio consiste em converter os dados acumulados em critérios de ocupação que possam ser incorporados à legislação urbana. Assis (2005) observa que, mesmo diante do reconhecimento do papel da climatologia urbana para o desenvolvimento de cidades com qualidade ambiental, sua aplicação à atividade de planejamento urbano permanece limitada, fato que se deve à abordagem fragmentada entre os campos do conhecimento envolvidos e ao caráter descritivo e restrito dos estudos realizados.

Freitas (2008) manifesta que a relação entre o clima urbano e a forma da cidade estabelece um tema relevante nos dias atuais, não havendo, no entanto, um consenso quanto aos limites e possibilidades para o adensamento construtivo. As pesquisas a respeito do tema justificam-se diante do quadro de agravamento dos problemas ambientais nas cidades, tornando-se fundamental discutir o quanto a forma urbana influencia a qualidade de vida, a sustentabilidade e o consumo energético.

A dificuldade em estabelecer critérios de ocupação do solo mais adequados ao ambiente urbano reside no fato de que as cidades compõem estruturas espaciais muito diversificadas, constituídas por diversas unidades de uso do solo. Estas unidades são caracterizadas por diferentes funções (habitacionais, industriais, serviços, lazer, etc.) e morfologias (forma e disposição dos elementos que constituem o espaço urbano) (ALCOFORADO et al, 2005). Os centros urbanos apresentam um aglomerado de variadas formas de ocupação do espaço, com

¹⁷ Grifos nossos

configurações morfológicas que variam ao longo do tempo, negando ou incorporando em maior ou menor grau o ambiente natural preexistente.

Espalhados pela cidade, observa Spirn (1995), estão os mesmos fenômenos que caracterizam o mesoclima urbano, em menores dimensões, no entanto. São pequenas ilhas de calor, bolsões de poluição atmosférica e diferenças locais no fluxo dos ventos resultantes da forma e características da ocupação do espaço na cidade.

As diferenças morfológicas do espaço urbano resultam dos interesses, processos e práticas econômicas e sociais que determinam seu valor e, conseqüentemente, sua localização. Tais práticas são mediadas pela ação estatal de controle e ordenação do solo urbano através das normas relativas à altura, recuos e densidade construtiva permitida àquela fração da cidade. A adoção desse conjunto de instrumentos legais no processo de planejamento urbano tem reflexos diretos nas condições térmicas do ambiente urbano.

Como parte fundamental à compreensão da influência das características morfológicas da cidade sobre parâmetros do clima, mais especificamente a ventilação natural, faz-se fundamental o entendimento da gênese da forma citadina responsável pela constituição da paisagem urbana.

2.3 Espaço, Forma e Paisagem Urbana

A reflexão da problemática-tema objeto da dissertação: a relação entre a morfologia urbana e a ventilação natural reconhece a insuficiência de um tratamento restrito a aspectos da tecnologia da arquitetura e do urbanismo ante a complexidade do estudo.

A análise da alteração no escoamento de ventos sobre o tecido urbano de Fortaleza aborda, especificamente, o setor sudeste da capital cearense como objeto de estudo. Trata-se de uma área que, nos últimos anos, segundo Fuck Júnior (2003), experimenta um processo de expansão urbana intimamente vinculada ao mercado imobiliário, do qual é, dialeticamente, resultante, meio e condicionante. Tal processo vem intensificando a ocupação da região e alterando os padrões de assentamento através da verticalização e adensamento construtivo.

A tendência atual de expansão no sentido sudeste da cidade se deve, além dos incentivos à industrialização e fomento ao turismo no Estado do Ceará, a processos intra-urbano específicos. Estes são gerados pela urbanização nos moldes capitalistas que, pela decisão de implantação de empreendimentos imobiliários, equipamentos públicos, comerciais e institucionais em áreas afastadas, trazem consigo a possibilidade de valorização futura de áreas próximas e intermediárias (FUCK JÚNIOR, 2003). A formação da paisagem nesta porção da cidade submete-se, de um lado, ao jogo dos interesses do mercado imobiliário, perceptível em termos de valorização de determinada área, e, de outro, ao direcionamento do crescimento proposto

pelo poder público, expresso pelas determinações constantes nos planos de desenvolvimento urbano.

Portanto, na análise da construção da paisagem citadina e da morfologia urbana desse setor há que examinar-se, necessariamente, as relações entre os agentes envolvidos na apropriação, (re)produção e consumo do espaço urbano, inseparável das estratégias de acumulação do capital e transformações sociais (HARVEY, 2000). Com base no referencial teórico consultado (GOTTDIENER, 1993; LEFEBVRE, 2001; CARLOS, 1994, 2007), apreende-se por agentes da produção do espaço urbano contemporâneo o Estado, por meio das prescrições normativas relativas ao controle do uso e ocupação do espaço citadino; o Mercado, representado pelos interesses dos agentes privados capitalistas, através da dinâmica da especulação e localização sobre o valor do solo urbano; e as intervenções das classes sociais, apropriando-se e reproduzindo-o segundo suas possibilidades de uso e ocupação do espaço.

Apreende-se que na (re)produção do espaço urbano, os interesses do mercado são mediados pelo Estado, presente em maior ou menor grau através da definição, regulação e atuação em suas dimensões administrativa e jurídico-política, traduzidas, sobretudo, pelas prescrições urbanísticas.

No modo de ver de Macedo (1987), as práticas de apropriação, produção e consumo do espaço urbano pelos agentes sociais formadores da cidade têm como produto direto os processos de alteração e, portanto, recriação da paisagem e do ambiente urbano. Essa paisagem é a manifestação formal do processo de produção do espaço urbano (CARLOS, 1994).

A intervenção do Estado, por sua vez, é fundamental à mediação dos conflitos corporificados no panorama urbano pela especulação imobiliária e seus resultados: valorização e desvalorização de determinados trechos do solo da cidade segundo a sua localização, cuja origem reside na produção geral do espaço, variável no tempo uma vez que se desenvolve segundo as forças produtivas subjugadas à condição social vigente. Deák (1985) entende a intervenção estatal como um complemento necessário, ainda que contraditório, à regulação realizada pelo mercado. No processo de produção do espaço urbano, este é tributado e a forma de assentamento ao nível da própria localização individual é controlada através do conjunto de leis de zoneamento e de prescrições que garantem a compatibilidade com um padrão global de ocupação. Fugindo ao domínio do Estado, o que ocorre é a determinação da localização aberta ao processo individual de produção dependente da estrutura do espaço citadino como um todo.

A contribuição da regulação urbana feita pelo mercado para com a organização espacial consiste em determinar disparidades no interior da cidade segundo os preços das localizações (DEÁK, 1985). E, nesse caso, Braga (2001) explica que a decisão sobre os rumos da expansão

urbana consiste em um foco de conflitos e disputas porque influi na valorização e desvalorização de ambientes construídos naturais e urbanos, determinando lucros e sobre-lucros na dinâmica do mercado imobiliário.

A formação da paisagem urbana segundo os interesses do mercado já foi investigada por Haddad et al (2005). Com base nas informações sobre os lançamentos imobiliários e pesquisas de origem e destino em São Paulo, o estudo concluiu que, através da localização dos lançamentos, o mercado imobiliário é responsável por moldar as mudanças socioeconômicas na cidade.

Constituindo, portanto, um bem finito, dotado de valor e impossível de ser criado por meio do trabalho, a reprodução do espaço na cidade possui, então, um novo sentido, não acontecendo somente através da adição de terras ociosas ou antes pertencentes ao meio rural, mas, também, a partir do adensamento e verticalização (CARLOS, 2007).

A verticalização pode ser considerada como a ruptura mais radical na morfologia de uma cidade. Representa um adensamento através da construção de um número maior de unidades no mesmo local, necessitando, por outro lado, de maiores áreas segundo o prescrito em legislação urbana. Ademais, adverte Brandão (2009), a regulação urbanística tem um papel fundamental em relação aos edifícios verticalizados, uma vez que estes representam impactos na estrutura espacial, social e ambiental da cidade devido o seu potencial de adensamento construtivo.

Macedo (1987) entende que o processo de verticalização também se submete, em seu desenvolvimento e sua localização, ao jogo dos agentes do mercado imobiliário, que, em função dos custos e restituição do capital investido, edifica em determinada área em função de uma contingência qualquer do seu desempenho que lhes permita uma instalação mais proveitosa dos seus produtos.

Nos processos de expansão urbana, explica Macedo (1987), a produção do solo na cidade através da verticalização é, certamente, um dos grandes responsáveis pela criação de novas morfologias urbanas e na destruição concomitante de uma série de importantes formas de organização do tecido citadino. O que ocorre, segundo o autor, é que o mercado imobiliário elabora e difunde padrões de ocupação do solo verticalizado que são aceitos, consumidos e pouco discutidos pela sociedade, quer no tocante a sua formalização espacial, quer no tocante a qualidade do ambiente, dos espaços produzidos, quer no processo de substituição de tecidos urbanos que este processo está gerando, desvalorizando antigas estruturas ou sobrevalorizando novas situações.

A morfologia resultante da verticalização predial que vem ocorrendo na área sudeste de Fortaleza, responsável pela formação de parte da paisagem urbana desta metrópole ocorre, em parte, devido ao maior valor do solo urbano. Freitas (2008) observa que, contraditoriamente, as áreas mais valorizadas pelo mercado estão entre as que mais sofrem os impactos decorrentes dos processos de alteração na configuração urbana, dentre os quais se destacam a verticalização, supressão da vegetação, aumento na demanda por infra-estrutura, poluição do ar e formação de ilhas de calor.

Enfatiza-se, por outro lado, que tal processo é condicionado, também, pela legislação urbanística, cabendo conhecer a forma como os índices urbanísticos influenciam as condições de ventilação natural.

2.4 Índices Urbanísticos e Condições Ambientais

A produção do espaço físico na cidade passa, fundamentalmente, pela arquitetura que o constitui. Assim, a idéia de forma urbana corresponde à cidade enquanto arquitetura: um conjunto de objetos arquitetônicos unidos por relações espaciais (ROSSI, 1995; LAMAS, 2007).

Para a disciplina do uso e ocupação do solo urbano, as metrópoles brasileiras têm adotado uma série de instrumentos de intervenção no projeto arquitetônico. São mecanismos tais como afastamentos (recuos), limite de altura (gabarito), índice de aproveitamento, taxa de ocupação e de permeabilidade (HISSA 2005).

O conjunto de medidas que compõe a legislação urbanística visa normatizar a forma de uso e ocupação do lote. A morfologia urbana, segundo Macedo (1988), é o resultado da articulação desse conjunto de limitações construtivas direcionadas aos volumes e espaços contidos em cada unidade-lote, entre si e com os demais espaços livres de edificação.

Especificamente em relação aos municípios, o Estatuto da Cidade regulamenta os dispositivos da política urbana, desenvolvendo avanços relativos à regulação urbanística ao implementar políticas públicas que visam a qualidade de vida e o desenvolvimento sustentado. O advento do Estatuto da Cidade determinou, também, posição capital ao Plano Diretor ao transformá-lo no principal instrumento para a gestão do território, responsável pela regulação do uso e ocupação do solo (BUENO; CYMBALISTA, 2007).

No processo de planejamento das cidades, o conjunto de instrumentos normativos presentes em tais planos são fundamentais à ordenação da expansão urbana. Por outro lado, Brandão (2009) explica que, muito embora os gestores públicos e urbanistas utilizem-se amplamente de tais mecanismos, estes se tornam instrumentos de pouca reflexão crítica, uma vez que são comumente determinados segundo seu impacto e não a partir de metodologias generalizáveis.

Teoricamente, as configurações do espaço urbano determinadas pela legislação de ocupação do solo têm como objetivo proporcionar condições ambientais mínimas, protegendo as relações de vizinhança e a qualidade de vida local. Mascaró (2001) esclarece, entretanto que a legislação urbanística constante em planos diretores, códigos de obra e posturas conserva uma abordagem tradicional, não incorporando aspectos atualmente fundamentais em relação às atuais solicitações energéticas e ambientais. A maioria dos instrumentos da legislação urbana não garante condições mínimas de salubridade e conforto ambiental, atendo-se, meramente, a aspectos relativos à densidade máxima permitida, índice de aproveitamento do solo, taxa de ocupação, afastamentos mínimos das divisas e alturas máximas.

Freitas (2008) explica que estes parâmetros atuam diretamente sobre a quantidade de área construída, a população e atividades contidas neste espaço. O índice de aproveitamento, a taxa de ocupação e impermeabilização e os recuos determinam os limites de adensamento para uma área específica da cidade, contribuindo, paralelamente, à preservação das condições ambientais. O autor alerta, ainda, que tais ferramentas de planejamento não podem ser encaradas como universais, pois dependem de inúmeros condicionantes, dentre os quais se destacam as características climáticas.

Mascaró (2003) pondera que o debate acerca dos limites à densidade urbana permanece polêmico, uma vez que a idéia de qualidade de vida, garantia de insolação, ventilação natural e privacidade associam-se, ainda que equivocadamente, a baixas densidades populacionais. Contrariamente a essa visão, o autor explica que estudos mais precisos apontam como impróprias densidades inadequadas aos tipos de edificações implantadas.

Torna-se necessário, portanto, determinar mecanismos adequados de ocupação do solo e proteção do ambiente natural, incorporando a verticalização e adensamento populacional de maneira possível, sem comprometer a qualidade de vida e a performance energética de edificações e do meio urbano.

2.4.1 Índice de aproveitamento

O parâmetro relaciona-se à densidade construtiva permitida a uma determinada zona da cidade, apesar de não delinear a sua configuração urbana. Brandão (2009) lembra que coeficientes restritivos podem inibir construções de múltiplos andares. No entanto, pode-se verticalizar reduzindo-se a ocupação do terreno.

Como explica Duarte (2000) ao utilizar o coeficiente de aproveitamento de forma isolada há tendência em ocupar todo o solo e manter uma alta densidade horizontal, ocupação que compromete a circulação do ar devido à ocupação de edifícios baixos por justaposição. O que ocorre, nesses casos, é que a redução dos recuos diminui a porosidade do espaço urbano,

elevando o nível do gradiente de ventilação e reduzindo a velocidade dos ventos nos níveis mais baixos das edificações.

No caso da cidade de Fortaleza, Hissa (2005) esclarece que a incorporação do índice de aproveitamento para controle da densidade demográfica deu-se em função da ampliação do gabarito definida pelo Plano Diretor de 1979¹⁸. Atualmente, com a verticalização de algumas áreas da cidade, constata-se a inviabilidade do controle da densidade demográfica através da área edificada, uma vez que o aumento na densidade ocupacional ocorreu nas áreas onde os índices de aproveitamento eram mais elevados.

Com base em tal disparidade, o plano diretor de 1992¹⁹ adota o mecanismo Fração do Lote, que estipula o número máximo de famílias por unidade de área de terreno. O instrumento passa, efetivamente, a controlar a densidade ocupacional (HISSA, 2005).

2.4.2 Gabarito

A regulação urbanística atual tem utilizado o controle de gabarito como um dos mecanismos de manutenção da qualidade ambiental, condicionando-o ao zoneamento da cidade. No entanto, observa Brandão (2009), o parâmetro limita-se à altura do edifício, embora a combinação entre a taxa de ocupação e o coeficiente de aproveitamento indique uma tendência de altura máxima.

Analisando o índice sob o viés da ventilação natural, Bittencourt, Cruz e Lôbo (1997) investigaram que a limitação ao gabarito imposta na orla de Maceió conduzia ao aumento nas taxas de ocupação, o que, por seu turno, gerava maiores barreiras construtivas à ventilação natural, uma vez que para compensar os custos o mercado imobiliário construía um maior número de unidades por andar. Em contrapartida, os autores sugerem que se a legislação incentivar a construção em altura em determinados locais com taxas de ocupação mais baixas e mantendo os recuos mínimos obrigatórios, aumentar-se-ia a porosidade do espaço construído e a quantidade de áreas livres, melhorando a permeabilidade ao vento.

No caso da restrição imposta à altura das edificações na orla de João Pessoa, Moreira (2007) observa que a lei não define parâmetros de densidade. A adoção isolada do mecanismo de gabarito máximo para a região deixa de lado outros índices urbanísticos e leva a uma contradição entre a densidade estabelecida pelo Plano Diretor e o índice de aproveitamento permitido. Ainda, com a liberação do gabarito em trechos da orla fora da faixa de atuação desta lei, o resultado é escalonamento do trecho urbano como um todo, representa problemas relacionados à ventilação para outras partes da cidade.

¹⁸ Lei N° 5.122-A, aprovada em 13 de março de 1979.

¹⁹ Lei N° 7.061, aprovada em 16 de janeiro de 1992.

Do ponto de vista da ventilação natural, Givoni (1998) ressalta que é interessante a variabilidade nas alturas das edificações como forma de facilitar o desvio de parte do fluxo do vento que atinge os edifícios para baixo, melhorando a circulação do ar no nível dos pedestres. Em áreas urbanas densamente ocupadas, a manutenção de uma mesma altura para os edifícios, o nível das coberturas passa a funcionar como se fosse o nível do solo, e os fluxos de ar tomando essa altura como uma nova superfície.

Ainda, com o ordenamento criterioso de edificações verticais é possível criar diversas alterações nos fluxos, proporcionando a recirculação do ar em zonas onde ocorria uma estagnação nos fluxos a partir da utilização (PRATA, 2005). Como manifestam Duarte e Serra (2003, p. 8), atualmente se *“investiga a compatibilidade entre verticalização, alta densidade ocupacional e manutenção da ventilação em áreas urbanas e, sob determinadas condições, é possível criar microclimas urbanos que nunca existiram nas condições naturais, verdadeiros oásis urbanos”*.

2.4.3 Recuos

O parâmetro de afastamento tem influência direta na porosidade do tecido urbano à ventilação natural. Araújo e Vidal (1998) esclarecem que alguns planos diretores têm utilizado o conceito de "envelope solar" como parâmetro de referência para adoção dos recuos como forma de garantir a incidência do sol no interior da edificação, visando o ganho térmico quando a condição climática indicar a necessidade de aquecimento, a higienização e a iluminação natural dos ambientes, reduzindo o consumo energético.

Em regiões de clima quente e úmido, entretanto, o vento constitui elemento climático para melhoria das condições de conforto e salubridade dos ambientes, sendo necessária a definição de recuos para assegurar o mínimo de ventilação no espaço urbano e interior das edificações, dissipando o calor produzido através da convecção (ARAÚJO; VIDAL, 1998).

Bittencourt, Cruz e Lôbo (1997) lembram que a aplicação de recuos maiores melhora a circulação do vento em áreas urbanas e aumenta a possibilidade de utilização da luz natural em edificações, contribuindo para a redução da carga energética devido a iluminação artificial.

Comumente, a determinação dos afastamentos na legislação urbana é feita em valores absolutos, sendo definidos de acordo com o uso pretendido para cada lote, a classificação das vias onde os mesmos se localizam e distância das edificações à rede elétrica. Como as áreas construídas são definidas de acordo com o terreno, Hissa (2005) sugere que os afastamentos deveriam ser determinados segundo as características de cada lote. Assim, seriam evitadas alterações no cumprimento das exigências legais ao se adotar os mesmos recuos para terrenos de diferentes dimensões.

2.4.4 Taxa de ocupação

A articulação da taxa de ocupação em conjunto com o índice de aproveitamento do solo configura um instrumento de controle do crescimento urbano encontrado na maior parte das leis de zoneamento e de edificações, caracterizando a forma que o tecido urbano naquela zona da cidade assumirá em seu desenvolvimento.

No entanto, a taxa de ocupação é válida somente para o plano horizontal do lote, não importando a altura da construção ou seu número de pavimentos. O parâmetro visa garantir parcelas de solo livre no interior dos terrenos, tornando-se necessário somente em virtude da utilização de valores absolutos na aplicação dos recuos, como conclui Hissa (2005). Ao desconsiderar a dimensão vertical da edificação, a taxa de ocupação analisada de forma isolada pode gerar impactos negativos sobre a ventilação natural ao criar uma rugosidade elevada, diminuindo a sua intensidade sobre o ambiente urbano.

A aplicação de recuos proporcionais ao tamanho do lote, ou seja, percentuais de área livre, tornaria dispensável a utilização da taxa de ocupação, preservando as condições de permeabilidade ao vento ao mesmo tempo em que se processa o adensamento urbano (HISSA, 2005).

Freitas (2008) explica que a *“densidade de ocupação do solo urbano é um dos principais fatores para a determinação do (des)conforto ambiental e da (in)capacidade de atendimento da infra-estrutura urbana, sobretudo quanto ao atendimento das necessidades dos cidadãos”*. O valor apropriado de densidade para uma área urbana específica é uma expressão relativa. Densidades muito altas ou muito baixas podem por em risco o meio, a qualidade de vida e a sustentabilidade ambiental.

Em localidades de baixa latitude a altura do sol é maior e o sombreamento interessante ao conforto na escala urbana, o que indica a possibilidade de elevação dos índices urbanísticos, aumentando a densidade urbana desde que se garanta a ventilação e iluminação naturais. No caso específico de climas tropicais quentes e úmidos, a densidade encontra como limite a necessidade de afastamento entre edificações à permeabilidade aos ventos, aspecto fundamental ao conforto térmico.

Brandão (2009) comenta, ainda, que nas atuais práticas de disciplinamento do uso e ocupação do solo em algumas cidades foi adotada a flexibilidade de usos, controlando apenas a densidade da região e buscando garantir a qualidade ambiental por meio de análises direcionadas, como relatórios de impacto de vizinhança. O objetivo é atingir uma uniformidade de densidade ocupacional aproveitando-se a infra-estrutura instalada como forma de evitar os vazios urbanos.

Moreno (2001) adverte que diante do fenômeno de verticalização de trechos da cidade são necessários estudos detalhados sobre o impacto destes edifícios sobre a malha urbana e o comportamento do vento.

2.5 A Ventilação Natural em Ambiente Urbano

O estudo do comportamento do vento sobre áreas urbanas implica, necessariamente, na compreensão dos fenômenos físicos que dão origem ao vento, aspectos da ventilação natural, a dinâmica dos fluxos, a visualização e quantificação da alteração em seu escoamento resultante do contato com obstáculos.

2.5.1. O Vento

A distribuição da radiação solar varia segundo a latitude e características de absorção da superfície terrestre, aquecendo-a de forma diferente. Desta forma, são originadas variações na temperatura do ar. Uma vez que a pressão do ar é função direta da sua temperatura, as alterações geram zonas de baixa pressão, chamadas depressões ou ciclones, e zonas de alta pressão, chamadas anticiclones.

O ar, por encontrar-se em estado gasoso, segue a dinâmica dos fluidos. Assim, em áreas com pressões diferentes, o ar mais denso fluirá em direção à área de menor pressão até que ocorra um equilíbrio barométrico entre estas. Esse movimento de massas de ar na camada mais baixa da troposfera é denominado advecção, produzindo o vento.

O vento constitui, portanto, o movimento de massas de ar devido à desigual distribuição da energia solar sobre a Terra.

As direções e características dos ventos, segundo Frota e Schiffer (2003), são determinadas pela distribuição sazonal das pressões atmosféricas. Sobre cada hemisfério há cinturões de alta e baixa pressão, sendo estes permanentes ou cíclicos. O cinturão equatorial é a principal região de baixa pressão, sendo mantido durante todo o ano.

Isto ocorre porque a quantidade de calor que chega à região equatorial é maior do que a que atinge os pólos. Desta forma, o ar mais aquecido sobre zona equatorial se expande, tornando-se menos denso e sobe, criando zonas de baixa pressão por meio deste movimento vertical. O ar nas regiões subtropicais imediatamente próximas converge para estas zonas, configurando a circulação horizontal. O ar aquecido eleva-se até certa altura, resfriando-se novamente e retornando à área subtropical (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005).

Este sistema de fluxos é diretamente influenciado pelo movimento de rotação da Terra. Segundo Frota e Schiffer (2003), ao girar sobre si mesma, a Terra desvia a massa de ar que se

move dos pólos para o equador no sentido oposto à rotação da Terra. Isto se deve ao princípio de conservação de momento angular, que gera o fenômeno conhecido como força de Coriolis.

De acordo com Mendonça e Danni-Oliveira (2007) o chamado efeito Coriolis manifesta-se em grande escala, agindo sobre o vetor de deslocamento do vento, defletindo-o à esquerda no hemisfério Sul e à direita no hemisfério Norte. Sua ação máxima ocorre nos pólos e diminui em direção à linha do Equador, onde se anula (figura 1).

Figura 1 – Rotação da terra e a Força de Coriolis

Fonte: http://www.uwsp.edu/geO/faculty/ritter/geog101/textbook/images/atmosphere/circulation/coriolis-force_NASA_JPL.jpg

A distribuição desigual de continentes e oceanos também causa distorções na série de cinturões de pressão atmosférica, causando variações nos deslocamentos das massas de ar em escala global. Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o grupo de movimentos atmosféricos que, em escala planetária, define as zonas climáticas e, em escala local, determina os tipos de tempo, estabelece a circulação geral da atmosfera.

Esquemáticamente, segundo Frota e Schiffer (2003), é possível distinguir três principais grupos de ventos em cada hemisfério:

- Os ventos alísios, que têm sua origem nas regiões subtropicais de alta pressão situadas a baixas latitudes nos dois hemisférios (30° N e 30° S).
- Os ventos de oeste, também procedentes das áreas subtropicais, em latitudes mais altas (entre 30° e 60°, em cada hemisfério) atravessam as áreas subárticas de baixa pressão;
- Os ventos polares, constituídos pelas massas de ar originárias das regiões dos pólos terrestres, áreas de alta pressão situadas junto a latitudes mais altas (acima dos 60° nos dois hemisférios).

No Brasil, o regime de ventos segue o dinamismo das grandes escalas atmosféricas do planeta (sinóptica e geral), que controlam os padrões anuais e sazonais. Neste perfil, variações

na mesoescala (escala regional) e na microescala (âmbito local) ocorrem devido às características do terreno, tais como a geometria e altitude, presença de obstáculos, cobertura vegetal e presença significativa de massas de água. Tais fatores atuantes em escalas menores podem gerar regimes locais de vento bastante diferenciados. No intervalo de horas ou dias, os ventos podem apresentar muita variabilidade, porém mantendo um regime diurno predominante determinado segundo características locais e regionais (ELETROBRÁS, 2001).

Carvalho (2003) explica que, no Brasil, predominam os ventos alísios. Estes são constituídos por movimentos de massas de ar provenientes dos dois hemisférios deslocando-se em direção à zona equatorial de baixa pressão, onde se localiza a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), e sendo defletidos no sentido oposto ao movimento de rotação da Terra devido à força de Coriolis. No hemisfério Sul, os ventos alísios sobre o mar são de direção sudeste. Registros anemométricos apontam que estes ventos têm sua direção alterada na porção litorânea e continental do Nordeste do Brasil pela ação de gradientes térmicos mar-continente e interiores à região continental e influências orográficas (SEINFRA, 2001).

Figura 2 – Caracterização dos ventos alísios
Fonte: SEINFRA (2001).

Características geográficas e locais, por sua vez, determinam particularidades aos ventos predominantes ao criar diferenças na temperatura do solo e, conseqüentemente, na temperatura do ar como, por exemplo, as diferenças na atmosfera, como presença de nuvens, níveis de poluição e umidade e as diferenças na superfície terrestre, traduzidas em valores de albedo e calor específico (CÓSTOLA, 2006).

Em regiões litorâneas, o aquecimento mais rápido do solo em relação à água gera, durante o dia, uma célula convectiva a partir da diferença barométrica entre a zona de alta pressão, localizada sobre a massa d'água, e a zona de baixa pressão sobre a costa. O resultado é o movimento de ar no sentido do mar para a terra, configurando a chamada brisa oceânica. No período noturno, como a água leva mais tempo para perder o calor acumulado durante o dia, o

gradiente de pressão é invertido, determinando uma alta pressão sobre a terra e uma baixa pressão sobre a água. O ar flui, então, da costa em direção ao mar (FROTA; SCHIFFER, 2003).

Figura 3 – Movimento das brisas mar-terra e terra-mar

Fonte: http://www.niteroiaparapentes.com.br/apostila_meteorologia_mx.html

Segundo Oke (1987) a atmosfera caracteriza-se enquanto um fenômeno cujas escalas temporal e espacial abrangem amplos limites e variações. As escalas espaciais da atmosfera são determinadas pelo comprimento e tamanho típico de onda, e a escala temporal segundo o período e duração destas.

O grupo de movimentos atmosféricos que, em escala planetária, define as zonas climáticas e, em escala local, determina os tipos de tempo, estabelece a circulação geral da atmosfera (OKE, 1987).

Monteiro (1999) por sua vez, considera três níveis escalares. O nível macroclimático trata da interação entre a radiação solar, a curvatura da Terra e seus respectivos movimentos, gerando os aspectos climáticos referentes ao planeta como um todo, como os movimentos atmosféricos de grande escala, tais como a circulação geral da atmosfera. Já o nível mesoclimático preocupa-se com a interação entre a energia disponível (para o processo de evaporação e geração dos campos de pressão atmosférica) e as feições da superfície, constituindo-se objeto de estudo, nesse nível, os climas locais. Com relação ao nível microclimático, existe muita controvérsia acerca de seus limites, entretanto, os autores que estudam o microclima são unânimes em reconhecer a existência de um nível escalar mais próximo dos indivíduos.

Tratando especificamente dos aspectos relativos ao vento, Saraiva; Silva; Silva (2005) explicam que este é decorrente da sobreposição de movimentos relativamente independentes. Sua caracterização é feita a partir de escalas de comprimento inseridas em intervalos que variam desde milhares de quilômetros, como grandes ciclones e anticiclones, passando por valores

intermediários, como é o caso das brisas marinhas e terrestres ou os escoamentos de vale e de montanha, até poucos milímetros, no caso dos fenômenos de turbulência local.

As escalas de comprimentos associam-se às escalas de tempo, acrescenta Saraiva (1983). Com base na teoria estatística da turbulência, o espectro constitui a representação da variação do vento atmosférico segundo o período ou sua frequência. De maneira mais simples, o espectro, ou função de densidade espectral, é definido através da descrição de sinal, que constitui a sua velocidade, sobre o domínio das frequências. Estabelecem-se, assim, três escalas de movimento distintas:

- Macro-meteorológica ou sinótica: acima de 500 km ou intervalos de tempo superiores a dois dias, que resultam da circulação atmosférica global.
- Micro-meteorológica ou local: englobando os movimentos de características inferiores a 20 km ou escalas de tempo menores do que uma hora. As alterações antrópicas podem desempenhar papel determinante;
- Meso-meteorológica: situada entre as duas e separada das micro-escalas pelo chamado vazio espectral, compreendido pelo período de 1 a 8 horas, e que correspondem às circulações locais (brisas), quer sejam induzidas pelas diferentes características da superfície (água e terra) quer sejam associadas à topografia (vales e montanhas).

A análise do espectro do vento atmosférico, representado pela figura 4, permite inferir tanto acerca de fenômenos associados a períodos maiores como acontecimentos em intervalos mais curtos. Como fatos de períodos mais longos, destacam-se o movimento de translação da Terra, que compreende um ano, e a variação da inclinação do eixo terrestre, cujo ciclo de revolução leva seis meses. Dentre os fenômenos mais breves, observa-se o ciclo diário e a variação dos dias e noites, com 24 e 12 horas, respectivamente. Assim, conclui-se que os movimentos da atmosfera manifestam rapidamente a redistribuição da energia solar captada pela Terra em associação ao seu movimento rotacional e a força de Coriolis (SARAIVA, 1983).

Figura 4 – Espectro do Vento Atmosférico
Fonte: Saraiva (1983).

2.5.1.1 Velocidade e direção do vento

Segundo Melagrano (1982), o vento constitui uma grandeza vetorial que inclui velocidade e direção.

Comumente, o vento é representado pela sua intensidade, em m/s, e por sua direção a partir da origem, formando um ângulo medido em graus no sentido horário em relação ao norte (COSTÓLA, 2006).

A velocidade do vento é controlada pelo gradiente de pressão estabelecido entre áreas de diferentes pressões barométricas, resultado da diferença de pressão do ar entre duas superfícies adjacentes. Quanto maior for o gradiente, mais veloz será o deslocamento do ar (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Número de Beaufort	Descrição do Vento	Velocidade (m/s)	Velocidade (km/h)	Descrição dos efeitos do Vento
0	Calmaria	Menos 0,4	Menos 1,4	Calmo; fumaça eleva-se verticalmente
1	Aragem leve	0,4 a 1,5	1,4 a 5,4	Direção do vento mostrada por inclinação de fumaça, mas não por cata-vento
2	Brisa leve	1,6 a 3,3	5,5 a 12	Vento sentido no rosto; folhas das árvores agitadas
3	Brisa suave	3,4 a 5,4	12 a 19	Cabelos desarrumados; vento desfralda bandeira leve
4	Vento moderado	5,5 a 7,9	19 a 26	Vento levanta poeira; papéis soltos; pequenos galhos não movidos
5	Vento fresco	7,9 a 10,7	26 a 35	Força dos ventos sentida no corpo; pequenas árvores são sacudidas; formam-se pequenas ondas nos lagos
6	Vento forte	10,7 a 12,2	35 a 44	Uso de sombrinhas com dificuldade; cabelos golpeados imediatamente; dificuldade de caminhar com firmeza; vento assobia nos fios; desagradável no ouvido
7	Tempestade moderada	12,2 a 15,2	44 a 55	Grandes árvores sacudidas; inconveniência sentida quando se caminha contra o vento
8	Tempestade	15,2 a 18,5	55 a 66	Ramos de árvores quebrados; geralmente impede de caminhar na rua
9	Tempestade forte	18,5 a 21,6	66 a 78	Leves danos estruturais; telhas arrancadas
10	Tempestade total	Acima 21,6	Acima 78	Árvores arrancadas; consideráveis danos estruturais

Tabela 1 – Tabela de Beaufort

Fonte: Forsdyke (1975).

O fluxo de ar, assim como o movimento de outros gases e líquidos, é descrito matematicamente através de uma série de equações de conservação de massa, momento e de energia baseadas na solução da equação de transporte (Equação 1) (ALLARD; GHIAUS, 2006):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \Phi) + \text{div}(\rho V \Phi) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad}(\Phi)) + S_{\Phi} \quad (\text{Equação 1})$$

Segundo Brandão (2009) as equações podem ser reorganizadas entre as diferentes formas, de acordo com o calculo específico necessário. As equações para fluidos viscosos são conhecidas como as equações de Navier-Stokes, apresentadas a seguir em sua forma conservativa.

A equação de continuidade configura-se (Equação 2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot V) = 0 \quad (\text{Equação 2})$$

A equação de momento para cada componente:

Em x:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial t} + \nabla \cdot (V \cdot f \cdot u) = \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho \cdot f_x \quad (\text{Equação 3})$$

Em y:

$$\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial t} + \nabla \cdot (V \cdot \rho \cdot u) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho \cdot f_y \quad (\text{Equação 4})$$

Em z:

$$\frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial t} + \nabla \cdot (V \cdot \rho \cdot w) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho \cdot f_z \quad (\text{Equação 5})$$

A equação de energia:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot V \right] \\ &= \rho \cdot q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial \tau}{\partial z} \right) - \frac{\partial (u \cdot p)}{\partial x} \\ & - \frac{\partial (v \cdot p)}{\partial y} - \frac{\partial (w \cdot p)}{\partial z} + \frac{\partial (u \cdot \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (v \cdot \tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial (w \cdot \tau_{xz})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial (u \cdot \tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial (v \cdot \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (w \cdot \tau_{yz})}{\partial z} + \frac{\partial (u \cdot \tau_{zx})}{\partial x} + \frac{\partial (v \cdot \tau_{zy})}{\partial y} \\ & + \frac{\partial (w \cdot \tau_{zz})}{\partial z} + \rho \cdot F \cdot V \end{aligned} \quad (\text{Equação 6})$$

2.5.1.2 Rugosidade aerodinâmica e gradiente de vento

O vento, em contato com uma superfície, tem seu fluxo influenciado pela fricção. As características desta superfície definem o nível de atrito imposto ao ar em movimento.

Raupach et al (1991)²⁰ explicam que a rugosidade aerodinâmica é aplicada na caracterização da influência de uma superfície sobre um escoamento, sendo que os resultados desta análise somente são válidos acima da dimensão vertical dos elementos do meio que geram esta rugosidade.

A heterogeneidade da cobertura da superfície, associada aos seus aspectos geomorfológicos, tendem à frenagem do ar em movimento. Com base nesse fenômeno, Cândido e Bittencourt (2005) explicam que o aumento da velocidade do vento ao longo de um eixo vertical varia: seu valor é nulo junto à superfície e atinge intensidade máxima igual ao seu fluxo em uma área livre de obstruções, gerando o que se convencionou chamar de gradiente da velocidade do vento (figura 5).

Figura 5 – Gradientes de vento
Fonte: Melagrano (1982).

Próximo à superfície, o fluxo de vento apresenta elevada turbulência. Com o aumento da altitude, a tendência é a diminuição da perturbação da distribuição até que o vento atinja uma zona livre da influência do atrito com a superfície, chamada de altura do gradiente. Este nível é função da rugosidade do meio.

Gandemer e Guyot (1981)²¹ apresentam a rugosidade em cinco classes, a saber:

- Classe I: Oceano, grande lago;
- Classe II: Campo raso;
- Classe III: Arredores, subúrbios;
- Classe IV: Zona urbana;
- Classe V: Centro de grandes cidades.

²⁰ RAUPACH, M.R.; ANTONIA A.; RAJAGOPALAN, S. **Rough-wall turbulent boundary layer**. Appl Mech Rev, v. 44, n. 1, p. 1-25, janeiro, 1991 apud Cóstola (2006).

²¹ GANDEMER, J., GUYOT, A. **La protection contre le vent – aérodynamique des brise-vent et conseil pratiques**. CSTB – Centre Scientifique et conseils pratiques. Paris, 1981 apud Peregrino & Silva (2007).

Diante da variação da rugosidade segundo os diversos tipos de terrenos, para determinar a velocidade do ar a determinada altura a partir da transposição das medidas tomadas em estações meteorológicas pode-se aplicar uma equação do perfil do vento (Equação 7) definida por BRE (1978)²²:

$$V = V_m \cdot k \cdot z^a \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

V = velocidade média do vento à determinada altura (m/s);

V_m = velocidade média do vento na estação meteorológica registrada a 10 m (m/s);

z = altura determinada (m);

k, a = coeficientes segundo a rugosidade da superfície do terreno (figura 12)

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

Tabela 2 – Coeficientes de acordo com as características do terreno
Fonte: BRE (1978)²²

Gasch (1996)²³ propõe que a velocidade do vento (v) em uma altura (h) qualquer pode ser dada a partir da seguinte relação:

$$V(h) = V_{\text{ref}} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{\text{ref}}}{z_0}\right)} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

h_{ref} = altura de referência de medição da velocidade do vento (10 ou 30 m, em geral)

v_{ref} = velocidade do vento medida nesta altura de referência (m/s)

z₀ = comprimento de rugosidade ou simplesmente rugosidade (tabela 3). Esta variável, em metros, informa a altura em que a velocidade do vento é zero.

²² BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **Principles of natural ventilation**. BRE Digest n. 210. BRE, Garston, 1978 citado apud Bittencourt e Cândido (2005).

²³ GASCH, R. **Windkraftanlagen: Grundlagen und Entwurf**. B. G. Teubner, 1996 apud Carvalho (2003).

Tipo de terreno	z_0 (metros)
Lagos, mar aberto	0,0001
Superfície com areia (lisa)	0,0003
Superfície com neve (lisa)	0,001
Pradaria, campo	0,01
Vegetação rasteira	0,1
Muitas árvores e/ou arbustos	0,2
Subúrbios	0,5
Cidade, floresta	1,0

Tabela 3 – Comprimento de rugosidade segundo o meio
Fonte: Carvalho (2003).

Analisando a relação entre as classes de rugosidade segundo as características das superfícies é possível concluir que o adensamento dos centros urbanos tem como consequência direta a redução da velocidade do vento nas camadas mais baixas, tendendo à frenagem dos fluxos incidentes. Conjuntos edificados configuram um nível que constitui o limite mais baixo do gradiente de vento.

2.5.1.3 Turbulência

Uma corrente de ar pode apresentar um fluxo laminar ou turbulento. O escoamento turbulento compreende a reunião de vórtices de diversos tamanhos imbricados uns aos outros, manifestando-se como flutuações quase aleatórias na velocidade do ar (STULL, 1988).

De acordo com Allard e Ghiaus (2006), o fluxo turbulento é um dos problemas insolúveis da física clássica. Mesmo diante do desenvolvimento de pesquisas sobre a questão, inexistente um completo entendimento do seu comportamento. A turbulência deforma o fluxo, determinando-lhe grande complexidade. O campo de velocidade de um fluxo turbulento pode ser explicado como a superposição de uma grande quantidade de correntes de vários tamanhos, no qual o tamanho da maior é limitado pela dimensão transversal do fluxo.

O conjunto de turbilhões de variadas dimensões que compõe o escoamento provoca variações na velocidade do vento. Os turbilhões caracterizam-se enquanto grandes e pequenos e são responsáveis pelas oscilações, mas não pelo vento médio. Turbilhões de maior dimensão são responsáveis pelos picos de velocidade percebidos em um dado ponto, ao passo que turbilhões menores provocam pequenas alterações na velocidade, mais freqüentes, entretanto.

A maior turbulência do vento é verificada no nível do solo, onde são intensos os processos mecânicos e térmicos.

Nos aplicativos que utilizam a mecânica dos fluidos computadorizada, a representação da turbulência nas três direções é semelhante (isotrópica).

2.5.2 Camada limite atmosférica

O fluxo de ar imediatamente acima de uma superfície é influenciado pelas características do fluido (viscosidade) e pelo acabamento superficial desta (rugosidade), tendendo à frenagem do escoamento pela resistência contrária ao seu sentido e direção (SILVA, 1999).

A fricção retarda o movimento do ar próximo ao chão e potencializa um rápido decréscimo da velocidade média ao se aproximar da superfície. Na ausência de significativos efeitos térmicos, a profundidade da influência do atrito depende da rugosidade da superfície (OKE, 1987).

A Camada Limite Atmosférica (CLA) compreende a faixa entre a superfície terrestre e uma determinada cota z do escoamento alterado (SILVA, 1999). De acordo Peregrino e Silva (2005), os fluxos e velocidades estão condicionados até a fronteira da camada limite atmosférica pelas características tridimensionais e turbulentas do terreno, condições atmosféricas e intensidade do vento. Estas características fazem com que a espessura da camada varie desde algumas poucas centenas de metros até alguns quilômetros de altura.

O campo de vento na camada limite é controlado pela fricção imposta ao fluxo pela superfície rígida na base deste. De acordo com Lopes (2003), existe uma relação entre a rugosidade e a altura da camada limite determinada por z_g na atmosfera.

A uma determinada altura, no entanto, o escoamento desenvolve um comportamento não perturbado que independe das condições locais. Este fluxo inalterado é também chamado de vento geostrófico. A sua intensidade é proporcional ao gradiente de pressão local e a direção é tangente às isóbaras, apresentando características de uniformidade, regularidade e pouca turbulência (PEREGRINO; SILVA, 2005).

Figura 6 – Esquema de camadas atmosféricas segundo Oke
Fonte: Adaptado de Oke (1987)

Melagrano (1982) define a altura de gradiente z_g como distância acima da qual a fricção com a superfície não influencia a velocidade do vento.

Oke (1987) observa que a altura da camada limite não é constante ao longo do tempo, dependendo da intensidade da alteração gerada pela superfície. Durante o dia, quando a superfície terrestre é aquecida pelo sol, ocorre uma transferência ascendente de calor para a atmosfera, que se encontra mais fria. A vigorosa movimentação térmica provocada por convecção possibilita a extensão da camada limite de um a dois quilômetros. À noite, quando a superfície da terra resfria-se mais rapidamente que a atmosfera, ocorre uma transferência descendente de calor

Como assinalado por Chandler (1976), o processo de urbanização altera o escoamento do vento, elevando a camada limite atmosférica e reduzindo a velocidade próxima da superfície.

Landsberg (1981) reitera que as mudanças causadas pela urbanização na camada limite da atmosfera local têm um notável efeito no vento em camadas mais baixas. Isto se deve à mudança na rugosidade da superfície e à influência do fenômeno da ilha de calor.

2.5.2.1 Camada limite urbana

Em seus estudos sobre a atmosfera da cidade, Oke (1987) realizou a sua divisão vertical, amplamente utilizada até hoje. O autor explica que atmosfera da cidade é resultado dos processos na microescala em operação nas ruas entre edifícios, chamados de cânions urbanos.

Quando o ar flui das áreas adjacentes para o ambiente urbano, este se ajusta às novas condições definidas pela cidade. As peculiaridades devidas à rugosidade do meio urbano tem como resultado o surgimento de duas camadas ou estruturas verticais: uma subcamada obstruída, ou camada dossel urbana e um nível livre de superfícies, também chamada de camada limite urbana (GEORGAKIS; SANTAMOURIS, 2005).

Para Alcoforado (1992)²⁴, o volume de ar entre as edificações corresponde à *urban canopy layer* (UCL; atmosfera urbana inferior) e estende-se da superfície até o topo dos edifícios. O fluxo de ar na subcamada obstruída é resultado das interações entre o fluxo acima da superfície, influenciado pelos efeitos locais de topografia, geometria e dimensões dos edifícios, ruas, tráfego e outras características. Comumente, a velocidade do ar na camada do dossel é significativamente mais baixa em relação ao vento inalterado (figura 7).

²⁴ ALCOFORADO, M. J. **O clima da região de Lisboa, contrastes e ritmos térmicos**. Memórias do Centro de Estudos de Estudos Geográficos, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa, 1992 apud Andrade, (2005).

Figura 7 – Esquema da camada limite urbana segundo Oke
Fonte: Adaptado de Oke (1987).

Acima da superfície ativa está a *urban boundary layer* (UBL; atmosfera urbana superior), que está associada à influência térmica da cidade, podendo avançar a sotavento desta, formando a chamada pluma urbana.

A camada limite urbana, por sua vez, constitui fenômeno entre as escalas local e mesoclimática (OKE, 1987). As características deste estrato são ditadas pela natureza geral da superfície urbana.

2.5.3 A ventilação natural urbana

O padrão e as características do vento em ambiente urbano diferem substancialmente das suas propriedades verificadas em condições mais estáveis.

Para Saraiva; Silva; Silva (1997), não é mais possível desconsiderar os efeitos dos aspectos ambientais sobre as estruturas das cidades, uma única edificação ou conjunto destas. Estes são determinados pela situação geográfica de sua implantação, o que gera diferentes fatores com reflexos sobre o desenho proposto, tornando imprescindível o conhecimento acerca das condições climáticas existentes como forma de tirar partido destas convenientemente, bem como os impactos do desenvolvimento da paisagem sobre a ventilação natural dos edifícios e seu entorno.

Em relação ao comportamento do vento sobre o meio urbano, Oke (1987) aponta estudos que remontam o início do século passado. No ano de 1909, pesquisas realizadas com base nos registros de um anemômetro situado no topo de um edifício escolar nos subúrbios de Berlim, 32 metros acima da superfície, registraram a diminuição da intensidade do vento em 24%. O terreno, anteriormente desprovido de construções, passou a abrigar edifícios de

apartamentos. Após a edificação do conjunto, foi verificada a redução na velocidade do ar de 5,1 m/s para 3,9 m/s após a edificação do conjunto.

No modo de ver de Hough (1995), de todas as influências da cidade sobre o clima, a presença ou ausência do vento constitui o maior impacto no conforto e clima local. O autor explica que o vento influencia a sensação térmica, evaporação, taxa de perda de umidade e transpiração da vegetação, aspectos particularmente importantes às condições microclimáticas.

Seja do ponto de vista do aproveitamento do vento à geração ou economia de energia, através da ventilação natural, seja do ponto de vista do conforto e integridade física das pessoas que se utilizem de espaços construídos, abertos ou abrigados, torna-se cada vez mais necessária a sua consideração diante da integração entre o vento e a realização de tarefas.

Para Givoni (1998) o aumento da velocidade de circulação de ventos na escala da cidade diminui a tendência da temperatura nela verificada ser maior do que em seus arredores, aspecto importante para ambientes urbanos quanto ao estresse térmico. De acordo com Santamouris (2005), a ventilação natural é um instrumento efetivo para obtenção de qualidade do ar no interior de edificações em ambientes urbanos, proteção da saúde, conforto térmico e redução do consumo de energia, uma vez que a extrema urbanização ao longo dos últimos anos resultou em importantes problemas econômicos, sociais, ambientais e de consumo energético.

No âmbito internacional, o projeto URBVENT²⁵ estudou o potencial de diminuição do consumo energético pelo uso da ventilação natural e a alteração do regime de ventos sobre ambiente urbano. Mesmo considerando importantes as potenciais economias de energia quando a técnica passiva é utilizada ao invés do condicionamento do ar, esta é influenciada de maneira significativa pelas características físicas encontradas no meio urbano através da redução da velocidade, elevação na temperatura ambiente, resultando no fenômeno da ilha de calor, o ruído e a poluição do ar.

No Brasil, abordando a questão do consumo energético aliado ao potencial de utilização da ventilação natural, Corbella (1997) afirma que a preservação de condições para ventilar os edifícios em centros urbanos tem se convertido em um problema. Tal aspecto deve-se ao adensamento construtivo e verticalização, que prejudicam o acesso do vento à habitação. É necessário, portanto, introduzir, nas prescrições de uso e ocupação do solo urbano, normas que garantam a ventilação natural através de fachadas.

²⁵ O projeto intitulado URBVENT: *Natural Ventilation in the urban Environment* (2004), constitui o esforço comum entre pesquisadores e instituições reunidos no quinto Programa de Pesquisa e Desenvolvimento promovido pela Diretoria de Ciência, Pesquisa e Desenvolvimento da Comissão Européia. O projeto tinha como objetivo criar uma ferramenta acessível a arquitetos e projetistas a partir de uma metodologia para compreensão do potencial e aplicação eficiente da ventilação natural como estratégia de diminuição do consumo energético para resfriamento, melhoria das condições de conforto térmico e qualidade do ar no interior das edificações.

Analisando especificamente a cidade do Rio de Janeiro, Corbella (1997) discute a contribuição da ventilação para o conforto ambiental, utilizando-se de premissas da arquitetura bioclimática para minimizar o consumo de energia pelos sistemas de condicionamento de ar e ventilação mecânica.

Como forma de avaliar as condições de ventilação natural no ambiente urbano, tanto externamente às edificações como em seu interior, a metodologia empreendida por Silva (1999) tomou como base a cidade de João Pessoa e estabeleceu os regimes de vento como condição limite, na qual os dados colhidos durante períodos significativos são analisados de forma a constituir um atlas de vento. Simultaneamente aos registros feitos pelo aeroporto local foi realizada uma medição *in loco* com vistas à sua integração. A partir de ensaios em túnel de vento, as influências das mudanças nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural foram verificadas qualitativa e quantitativamente.

Aprofundando os estudos da relação entre a morfologia urbana e a ventilação natural sobre o ambiente citadino, ressalta-se o trabalho realizado por Costa (2001). O autor analisou os três últimos planos diretores do desenvolvimento urbano de Natal, avaliando os resultados das prescrições edilícias permitidas pelos códigos sobre o campo de vento em bairro situado no interior da cidade e suscetível à verticalização. Os diversos cenários confeccionados à luz da legislação urbana foram submetidos a um *software* de mecânica dos fluidos computadorizada para visualização dos resultados. A metodologia ainda foi revisitada pelo trabalho de Marques (2003), que avaliou os impactos de uma possível verticalização em trecho da orla da capital potiguar.

Prata (2005) combinou a realização de estudos em túnel de vento e *software* de mecânica dos fluidos para determinar os impactos da ocupação da orla da cidade de Santos, onde a especulação imobiliária verticalizou sobremaneira edifícios, sobre o conforto do pedestre e condições ambientais urbanas. Considerando que as condições de ventilação sofrem alteração segundo a altura e posição dos edifícios, a autora conclui que para a melhoria do clima urbano é imprescindível o aumento das distâncias entre edificações como forma de aumentar a permeabilidade do vento em meio urbano.

Tomando como base frações dos bairros de Cabo Branco e Tambaú, em João Pessoa, Peregrino e Silva (2007) avaliaram a relação entre o escoamento do vento e padrões de ocupação do solo determinados pela legislação urbanística vigente. Diante do estudo de modelos em escala reduzida submetidos a túnel aerodinâmico de camada limite atmosférica, os autores concluem que o escalonamento proposto pela normatização edilícia vigente compromete o aproveitamento da ventilação natural. Analisando a distribuição dos ventos em cenário proposto

para a área, com edificações verticalizadas e maior adensamento construtivo, é verificado que este apresenta resultados mais interessantes para este setor da cidade sob a ótica da qualidade do ar, conforto ambiental e economia de energia.

Analisando um conjunto expressivo de quadras inseridas nos mesmos bairros de João Pessoa, Carvalho; Corbella; Silva (2007) empreenderam uma nova metodologia para analisar as interações entre a forma urbana e o clima. Avaliando a influência do comportamento do vento sobre o planejamento do uso e ocupação do solo com base na teoria do sistema clima urbano, os autores realizaram medições de parâmetros climáticos durante o verão em quatro pares de pontos selecionados no interior da área. Posteriormente as informações foram sistematizadas para a realização de regressão linear múltipla. O estudo constatou que a correlação entre a morfologia urbana e a variação da temperatura do ar depende das condições de velocidade e direção do vento, determinadas, mais especificamente, pelas características da cidade (orientação, rugosidade e permeabilidade da malha urbana).

O trabalho desenvolvido por Souza (2006) abordou a modificação dos níveis de adensamento propostos para o bairro residencial Jardim Goiás, em Goiânia, indicando a necessidade de avaliação do impacto da significativa elevação do gabarito sobre a ventilação natural. No estudo, modelos tridimensionais de ocupação do solo foram submetidos à simulação computacional com o objetivo de visualizar o escoamento do vento sobre a área. Como resultados, foram determinadas as configurações que geravam baixas velocidades do ar, comprometendo o conforto térmico dos habitantes e o consumo energético das edificações inseridas naquela parte da cidade.

Também analisando o impacto da verticalização de trechos da orla sobre a ventilação natural no interior da malha urbana, Leite (2008) investigou a elevação do gabarito das edificações junto à avenida litorânea de São Luís, no Maranhão. Através da confecção de cenários de ocupação do solo permitidos pelas normas urbanísticas e submetidos a um *software* de mecânica dos fluidos computadorizada, a autora avaliou os padrões de velocidade e direção do vento e pressão no nível do pedestre, concluindo que os cenários de verticalização propostos para a avenida influenciam significativamente os padrões de vento predominante sobre as quadras estudadas.

Ferreira; Assis; Ferreira (2009) investigaram a influência da expansão urbana de Belo Horizonte sobre o regime de ventos através da análise de dois momentos da ocupação do solo daquela cidade, representados pelos anos de 1987 e 2006. Valendo-se dos princípios da climatologia dinâmica e simulação computacional, as autoras analisaram o comprimento de rugosidade através de um modelo digital de elevação da malha urbana e as condições climáticas

durante os episódios de inverno e verão para apontar a modificação da velocidade do ar em relação ao desenvolvimento da cidade. Os resultados indicaram a redução da intensidade do vento nos pontos selecionados para comparação durante os episódios descritos, uma vez que a elevação nos valores da rugosidade aerodinâmica do perfil urbano implicou na diminuição da velocidade dos fluxos de ar.

Os trabalhos apresentados constituem ferramentas para o planejamento urbano das cidades que abordam. A metodologia descrita por estes possibilita determinar, previamente, os impactos da inserção de conjuntos de edifícios no escoamento do vento sobre a malha urbana.

2.5.3.1 O comportamento do vento no entorno dos edifícios

O comportamento das correntes de ar ao redor de edifícios isolados tem suas características conhecidas. É caracterizado por vórtices de redemoinhos devido ao fluxo sobre a fachada a barlavento, enquanto a face posterior descreve redemoinhos na cavidade de baixa pressão devido à separação da corrente pelos cantos laterais e superior do edifício.

Analizando o comportamento do ar em movimento sobre o ambiente construído é possível inferir acerca da influência da geometria e orientação dos obstáculos. O edifício, dada a sua massa volumétrica, é capaz de alterar os fluxos de ar em seu entorno, possuindo uma área de influência mais expressiva do que tão somente o seu volume. A disposição dos edifícios altera os fluxos de ar, dividindo as correntes a cerca de dois terços ou três quartos da altura da fachada em que incidem e criando condições altamente turbulentas no solo, modificando sobremaneira os campos de pressão com zonas de sucção e aceleração do ar nas arestas e parte abertas embaixo da massa construída, como visto em diversos trabalhos (GIVONI, 1962; OLGAY, 1992; 1998; EVANS; SCHILLER, 1994).

Segundo Oke (1987), o conhecimento acerca da ação do vento sobre edificações é, ainda, útil para proteção contra os danos e economia em relação aos custos de manutenção de ambientes construídos, segurança e conforto dos ocupantes e pedestres e a dispersão de poluentes. Pesquisadores do *Building Research Establishment*, na Grã-Bretanha, desenvolveram estudos sobre modelos de movimentação do ar próximo a edifícios. Eles concluíram que o vento representa uma perturbação significativa ao atingir 5,0 m/s, movendo cabelos e roupas. A partir de 10 m/s é definitivamente desagradável, tendo poeira e lixo movidos e mesmo levantados e, para velocidades de cerca de 20 m/s torna-se perigoso. Em seus estudos, apontaram que velocidades de 5,0 m/s são atingidas em menos de 5% do tempo em áreas de construções de baixa altura. Em contrapartida, em áreas próximas de edifícios altos, tais valores excediam 20% do tempo.

Cânions urbanos, por sua vez, são caracterizados, sobretudo, por três parâmetros: a altura dos edifícios, largura e comprimento do cânion. Quando os prédios apresentam relativo afastamento, as correntes de ar não interagem. Em espaços mais confinados, entretanto, as correntes são alteradas.

Conclui-se, portanto, que a ventilação nas cidades pode ter melhores resultados se observadas condições de altura relativa, forma e distância entre edifícios segundo a permeabilidade à passagem do vento.

A disposição dos prédios levando em consideração suas medidas de comprimento, largura, altura e orientação, é fundamental à compreensão da ventilação no nível externo dos edifícios. A seguir, a tabela 4, confeccionada com base nos estudos desenvolvidos pelo *Texas Engineering experiment Station*, na universidade do Texas, Mascaró (1985), apresenta os principais efeitos da forma de edificações ou conjuntos edificados sobre o comportamento do vento.

Efeito	Características	Ilustração
Efeito de Barreira	Efeito relacionado a um edifício laminar, ou seja, massa construída de relativa espessura. Tal efeito tem impacto negativo para o entorno quando sua altura é menor que a superfície laminar ou quando nas proximidades se encontram exemplares do tipo.
Efeito de Pilotis	As aberturas sob a edificação unem a zona de alta pressão na fachada exposta ao vento e a zona de baixa pressão na fachada oposta. Quanto mais alto o pilotis, maior é o efeito. A entrada do ar é difusa, mas a saída é forte e direcionada, podendo ventilar áreas livres e comuns aos conjuntos de edificações.
Efeito de Canto ou Esquina	Resulta da união dos ângulos formados pelas fachadas do edifício em pressão positiva e em pressão negativa, aumentando com a altura e em casos de proximidade de outras edificações. Pode-se otimizar a relação entre forma e distância para aproveitar o efeito de canto para ventilação do entorno.
Efeito de Canalização	A conformação de um conjunto construído faz com que o vento percorra um corredor a céu aberto. Interessante em climas tropicais se a velocidade do vento for pronunciada, gerando conforto para o transeunte.
Efeito Venturi	Edifícios em eixos angulados próximos entre si dão origem ao efeito de coletor de ventos. A altura deve ser superior a 15 m e a soma do comprimento dos edifícios ao menos 200 m. Largura da garganta de 2 a 3 vezes a altura média. Pode-se aproveitar a velocidade do ar para ventilar outros espaços na cidade.
Efeito de Malha	Os espaços (pátios centrais, bolsões) entre edifícios em malha são protegidos da ventilação mais intensa, sendo prejudicados pela justaposição de prédios, aspecto negativo em climas quentes.
Efeito de Redemoinho ou "wise"	Em edifícios de mais de 15 m, o vento que incide diretamente sobre a fachada cria uma área turbulenta na base da mesma, sendo mais intenso quanto maior for a altura do prédio e se próximo se localizar uma outra edificação.
Efeito de Esteira	A circulação de ar em forma de redemoinhos na parte posterior da edificação. Resulta da velocidade, união de zonas de pressões diferentes e da ação turbulenta do ar mais distante do prédio, criando movimentos de ar tipo esteiras.
Efeito de união de zonas de pressão diferentes	A disposição ortogonal de alguns edifícios em relação à direção do vento faz com que massas de ar de diferentes pressões se interliguem transversalmente, surgindo fluxos no sentido das pressões decrescentes. A altura dos prédios é um elemento importante para o efeito.
Efeito pirâmide	A geometria de edifícios com forma piramidal dissipa a energia do vento. Grandes quantidades de redemoinhos ocorrem no solo destas edificações. Pode-se tomar partido da geometria de prédios deste tipo para variar as condições do vento no entorno.

Tabela 4 - principais efeitos das edificações sobre o comportamento do vento
Fonte: Mascaró (1985)

2.5.4 Ferramentas para visualização da ventilação natural

Ferramentas que permitem visualizar o escoamento do ar no exterior e interior dos edifícios tornam-se úteis aos projetistas, pois possibilitam compreender o processo de ventilação natural. A visualização de escoamentos serve para elucidar o comportamento de fenômenos físicos e permite a obtenção de dados qualitativos e quantitativos (TOLEDO; PEREIRA, 2004).

A visualização de escoamentos pode ser feita através de modelos físicos ou analógicos e modelagem matemática, por meio de simulações de dinâmica dos fluidos computacional.

Os modelos físicos mais comuns são o túnel de vento e a câmara de fumaça, em que são aplicados modelos em escala reduzida (TOLEDO; PEREIRA, 2003).

Os modelos analógicos hidráulicos mais conhecidos e utilizados são o tanque ou mesa de água e a caixa de vidro, onde também são utilizados modelos em escala reduzida. As técnicas de visualização mais usuais são a utilização de indicadores sólidos, tais como talco, serragem ou pó de alumínio ou a injeção de gases (TOLEDO; PEREIRA, 2003).

Dentre as ferramentas, apresentam-se a mesa d'água, o túnel de vento e os modelos de dinâmica dos fluidos computadorizada.

2.5.4.1 A mesa d'água

A mesa d'água consiste em um equipamento que permite o fluxo uniforme de água acrescida de um contraste através de uma placa homogênea, constituindo uma mesa para observação dos ensaios, em circuito aberto ou fechado. Em contato com os obstáculos dispostos sobre a mesa, é possível visualizar os efeitos sobre o escoamento a partir da formação de vórtices e esteiras (BLESMANN, 1990²⁶).

Inicialmente os reservatórios são alimentados com água, distribuindo-se para no reservatório a jusante e parte no reservatório montante, aos quais deve ser acrescido o indicador, para visualização das linhas de fluxo. Como indicador, pode-se utilizar um detergente comum. Em seguida aciona-se um sistema elétrico para gerar o turbilhonamento para misturar o detergente à água e elevar o nível do reservatório montante até a altura da mesa, quando passa a escoar em regime turbulento pelo campo de observação até o reservatório jusante. Para visualização de fluxo laminar são observadas as alterações nas linhas de fluxo sobre a lâmina d'água, como na figura 8.

²⁶ BLESMANN, J. *Aerodinâmica das construções*. Porto Alegre: Sagra, 1990 apud Toledo e Pereira (2003).

Como vantagens do equipamento, Toledo e Pereira (2003) destacam o baixo custo de execução e manutenção, a operacionalidade facilitada e a visualização continuada do escoamento, com registro fotográfico ou através de filmagem, elementos familiares aos arquitetos.

Figura 8 – Visualização do escoamento em modelo sobre mesa d'água
Fonte: Toledo e Pereira (2003)

2.5.4.2 O túnel de vento

Ensaio em túnel de vento são utilizados para verificar os efeitos do vento devido a alterações em espaços abertos, arranjos edificados, a dispersão de poluentes ou odores, a segurança e conforto dos pedestres, além da análise estrutural de edificações e a propagação de emissões veiculares em vias e/ou áreas específicas, tais como garagens, indústrias (PRATA, 2005).

De acordo com Lopes (2003), em ensaios em túnel aerodinâmico a escala do modelo ou maquete é determinada segundo a dimensão da seção do túnel, da área de estudo, do tipo de ensaio a ser realizado, se é estrutural, análise de edificações ou do meio urbano, e dos critérios de semelhança.

A vantagem do estudo do escoamento do ar através de túnel de vento em relação às medições feitas no local está no fato de que propostas futuras podem ser analisadas de maneira rápida, desde que seja confeccionado um modelo apropriado do objeto de estudo.

Para determinar as velocidades do fluxo de ar que simula a intensidade do vento sobre o modelo estudado em alturas específicas, utiliza-se o tubo de Pitot e a sonda de fio quente. O tubo de Pitot baseia-se nas diferenças de pressão total e estática para obter o valor de velocidade. A ferramenta é eficiente quando o fluxo incide diretamente sobre o tubo.

Figura 9 – Túnel de vento do IPT

Fonte: Arquivo do autor

A técnica mais comum para visualização dos efeitos do escoamento do ar sobre o modelo submetido ao túnel de vento é a de figuras de erosão de areia (figura 10). O método se baseia no espalhamento de uma camada uniforme de partículas sobre uma superfície plana e, quando submetida a uma velocidade de escoamento exterior suficientemente elevada, sofrerá, devido à distribuição de pressão sobre estas partículas, o fenômeno da saltação. Quando a superfície recoberta pelos grãos de areia é submetida a uma determinada velocidade de escoamento exterior, surgem áreas de erosão como resultado da saltação ou do arrasto. Mantendo-se a velocidade constante, em um determinado período, as figuras de erosão formadas apresentarão contornos definidos (PEREGRINO; SILVA, 2007).

O procedimento permite a avaliação qualitativa das condições de ventilação no trecho em estudo e a determinação das isolinhas de velocidades do ar em diferentes pontos da área.

Figura 10 – Aplicação de camada de areia sobre modelo submetido ao túnel de vento.

Fonte: Prata (2005)

Além da técnica de figuras de erosão, outros métodos utilizados na visualização da ação do vento sobre modelos submetidos ao túnel aerodinâmico são a geração de fumaça através de bastões ou equipamentos (fluido e/ou gelo seco); e o movimento de fios, tecidos e serpentinas.

2.5.4.3 Modelos de dinâmica dos fluidos computacional

A Dinâmica de Fluidos Computacional, mais conhecida pela sigla *CFD* (*Computacional Fluid Dynamics*), permite estudar o escoamento de fluidos, com transmissão de calor ou transporte de massa, mudança de fase, reações químicas, movimentos mecânicos e tensões entre outros. Os programas são baseados na modelação matemática para simulação do comportamento térmico e do escoamento dos fluidos

Aplicativos *CFD* têm variados usos, entretanto, ainda apresentam elevado custo de aquisição, exigem conhecimentos aprofundados de modelagem computacional e alta capacidade de processamento (ETHERIDGE; SANDBERG, 1996). Os programas vêm, progressivamente, sendo aplicados à simulação da ventilação natural em edifícios e em conjuntos urbanos, permitindo identificar a influência de diferentes formas de ocupação do solo sobre o escoamento do ar (COSTA, 2001; PRATA, 2005; SOUZA, 2006; LEITE, 2008).

Shaviv et al (2001)²⁷ afirmam que modelos *CFD* são muito poderosos e requerem cálculos intensos, mas apresentam resultados detalhados que permitem avaliar os defeitos em projetos sugeridos. Novas propostas alternativas de projeto podem, então, ser pensadas e reavaliadas até alcançar resultados satisfatórios.

A ferramenta produz resultados rápidos se comparada a experimentos realizados no ambiente real, uma vez que a evolução na capacidade de processamento dos computadores tornou a análise dos resultados mais simples, diminuindo o tempo para realização das simulações e o seu custo (CELINSKI; SANTOS; MENDES, 2003).

Fortuna (2000) reitera que a Dinâmica dos Fluidos Computadorizada tem como objetivo reduzir o número de experimentos, explorando fenômenos que não poderiam ser estudados em laboratório de forma prática.

Segundo Prata (2005), a compreensão do movimento dos fluidos é fundamental em diversas áreas, das engenharias à arquitetura. Até recentemente, aponta a autora, os estudos de fluidos em movimento eram restritos aos laboratórios, o que mudou com o desenvolvimento da capacidade de processamento dos computadores, tornando possível, ao usuário, a análise de soluções numéricas de problemas de fluxos.

²⁷ SHAVIV, E.; YEZIORO, A.; CAPELUTO, I. G. **Sun and winds in a new business district in Tel Aviv**. Building Simulation, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001 apud Prata (2005).

Cóstola e Alucci (2009) certificam que, em simulações computacionais, o uso de ferramentas de Dinâmica de Fluidos Computadorizada dentro de condições adequadas de parametrização da malha, controle das condições inicial e de contorno e com a organização de etapas anteriores e posteriores à simulação é possível produzir resultados próximos à realidade. Nesse sentido, vale ressaltar os estudos comparativos em Prata-Shimomura (2010) entre os ensaios realizados em túnel de vento e simulação em *cfD* para uma mesma área urbana de São Paulo. A investigação avaliou as curvas logarítmicas de velocidade do ar em determinados pontos do modelo confeccionado para a área. Os resultados indicaram a correspondência na razão entre a velocidade na altura z e a velocidade máxima no ponto.

Simulações utilizando *softwares CFD* proporcionam uma análise qualitativa e quantitativa do desempenho da ventilação natural ainda em etapas anteriores e posteriores ao projeto. No caso da aplicação de prescrições urbanísticas em relação a um conjunto de edifícios, permite verificar alterações ocasionadas na área de estudo em cenários futuros e seus impactos sobre a cidade (TOLEDO; PEREIRA, 2004; PRATA, 2005).

Os modelos CFD baseiam-se em equações *Navier-Stokes* solucionadas em todos os pontos de uma malha em duas ou três dimensões. Esta malha pode representar as edificações e suas áreas adjacentes. Nesses modelos, a pressão e velocidade do ar são determinadas nas condições limite e inicial (KOLOKOTRONI; SANTAMOURIS, 2007).

De acordo com Ferreira; Assis; Ferreira (2009), a definição do modelo computacional guarda relação com a escala de análise dos estudos e o desempenho dos programas. No nível microclimático, os programas do tipo *CFD* são amplamente utilizados. No âmbito mesoclimático, entretanto, modelos mais elaborados em termos dos métodos numéricos aplicados, da estrutura da malha que os compõem e dos métodos de tratamento da turbulência vêm se desenvolvendo, permitindo a análise do comportamento do ar nesta escala.

No mercado existem diversos aplicativos de *CFD*. No entanto, optou-se pela utilização do Ansys CFX Software versão 11.0 devido à disponibilidade de licença no Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) durante o período de novembro de 2007 a novembro de 2008, quando foram realizadas as simulações presentes nesta pesquisa. As experiências acumuladas na utilização deste aplicativo nos trabalhos de doutoramento de Prata (2006) e Brandão (2009), dissertações de mestrado de Cóstola (2006) e Leite (2008) também contribuíram para a escolha deste *software*.

2.5.4.3.1 O ANSYS CFX

O CFX é um exemplo de *CFD* produzido pela empresa ANSYS que permite simular qualquer situação envolvendo a mecânica dos fluidos em variadas escalas e condições de contorno, desde que exista a capacidade de processamento computacional (BRANDÃO, 2009).

O programa utiliza as equações fundamentais de conservação de massa (equação da continuidade), conservação de momento (equações *Navier-Stokes*), conservação de energia, para o caso de simulações que envolvam análises térmicas, dispersão de fumaça e poluentes (equação de conservação escalar) e equações para turbulência. O aplicativo permite, também, que o usuário insira equações específicas para diversas variáveis, sendo necessário, no entanto, um maior conhecimento do fenômeno para gerar um nível de detalhamento maior (MARCONDES; UMAKOSI, 2007).

O *software* compõe-se de três etapas nas quais podem ser executados desde a confecção do modelo até o tratamento dos resultados.

Inicialmente, no *pre-processing*, desenvolve-se o modelo a partir da construção da geometria (*geometry*) e determinação do domínio, dando origem ao modelo a ser adaptado no ANSYS *ICEM CFD* para a parametrização e elaboração da malha (*mesh*) que definirá os pontos a serem calculados. Em seguida, a definição do regime da simulação, equações a serem utilizadas para cálculo, as condições iniciais, as condições de contorno (*initial e boundary condition*) e o modelo de turbulência (*turbulence model*) são adotados no *CFX-Pre*. A simulação é então calculada no *CFX-Solver* e os resultados são visualizados através de imagens tridimensionais do modelo e gráficos no *CFX-Post*.

A seguir, são apresentados, detalhadamente, cada um dos passos à simulação da ventilação natural realizada no aplicativo ANSYS CFX 5.6.

2.5.4.3.1.1 A confecção do modelo

A preparação do modelo a ser simulado pode ser feita em qualquer ambiente do tipo CAD. Brandão (2009) recomenda, para o caso da utilização do *software* AUTOCAD, que sejam utilizados os comandos *extrude*, *union* e *subtract* para confeccionar o modelo tridimensional.

O modelo, acrescenta Brandão (2009), deve conter todos os elementos a serem simulados, ou seja, deve retratar tanto os objetos de interesse quanto o entorno, além de um volume para representar o domínio fluido. Este volume deve ser estanque, inexistindo aberturas, e o procedimento adotado deve ser o de subtrair as estruturas deste domínio, gerando um negativo volumétrico da área de estudo.

Para a construção do modelo, as edificações são simplificadas, o que diminui consideravelmente o tempo de processamento e a capacidade da máquina para os cálculos (PRATA, 2005; LEITE, 2008). Assim, com o objetivo de diminuir a possibilidade de problemas, ocasionando inclusive o travamento do CFX, as arestas e as faces diminutas devem ser desconsideradas, bem como distâncias insignificantes entre as edificações (menores do que 5 m), unificando-as em blocos para extrusão, como demonstrado pelas figuras 11 e 12.

Figura 11 – Edificações em duas dimensões.
Fonte: Arquivo do autor

Figura 12 – Resultado do agrupamento e modelagem tridimensional das edificações.
Fonte: Arquivo do autor

Relativamente ao formato do domínio, este pode ser retangular ou circular, sendo que nesta última forma é possível a simulação das oito direções do vento para uma mesma malha. Deve-se atentar, no entanto, para os parâmetros para confecção do modelo. De acordo com Harries (2005) estes devem ser de cinco vezes a altura do elemento a ser simulado para barlavento e laterais; dimensão de seis vezes a sua altura até o topo; e de quinze vezes o seu tamanho vertical a sotavento, como se observa na figura 13 a seguir.

Figura 13 – Base para confecção do modelo
Fonte: Adaptado de Brandão (2009).

Para a realização das simulações desta pesquisa optou-se por construir dois domínios retangulares, orientados para as direções de vento a serem simuladas: leste e sudeste. A opção por dois domínios com essas orientações de entrada do ar deveu-se à caracterização do comportamento do vento para Fortaleza, apresentada no capítulo 3.

Após a confecção do modelo em CAD, este é então exportado. A extensão de exportação mais indicada para o ICEM é *.sat* (ACIS), devendo-se dispensar quaisquer elementos que não influenciem a simulação. O modelo configura-se como um bloco unificado, uma vez que se subtraem os elementos extrudados do domínio. As superfícies podem ser separadas na fase seguinte com o intuito de determinar suas características na simulação (BRANDÃO, 2009).

2.5.4.3.1.2 A malha

O modelo criado é então importado no *software* ICEM CFD para que sua geometria seja adaptada ao *CFX-Pre* para geração da malha.

Na adaptação do modelo a ser simulado são definidas as *parts* a partir do agrupamento dos elementos criados durante a fase de modelagem. Com a definição de todas as *parts*, é possível criar a malha no volume contido na *part* BODY. Esta será a parte do domínio por onde o ar escoará.

A malha reúne os pequenos volumes discretizados no interior do domínio, determinando os pontos e volumes solucionáveis através das equações fundamentais. De acordo com Prata (2005), a malha pode possuir vários tamanhos conforme o nível de detalhamento a observar. Entretanto, ressalta a autora, de acordo com o grau de detalhes, torna-se necessário um computador compatível com a demanda por memória, capacidade de processamento e placa de vídeo.

Os elementos que compõem a malha podem ser tetraedros, hexaedros, pirâmides e prismas. Pode-se refinar a malha junto às superfícies ou em áreas de interesse especial utilizando-se prismas. O objetivo é analisar detalhadamente o comportamento do fluido em determinados trechos próximos às superfícies. A criação da malha é feita automaticamente pelo programa a partir da definição das características dos elementos máximos e mínimos.

No menu *mesh* é possível determinar os parâmetros da malha a ser criada. O parâmetro *maximum element size* corresponde ao tamanho do maior elemento permitido. Uma vez que este parâmetro indica o tamanho das células nas regiões do domínio onde não há informação por parte da geometria, ressalta-se a sua influência na geração do número total de células. Segundo Brandão (2009), o material informativo do *software* assinala que o seu valor deve ser sempre múltiplo de 2, no entanto, o programa permite utilizar qualquer número. Caso a malha

não seja muito refinada onde a geometria é mais complexa, este parâmetro torna-se ainda mais determinante na quantidade total de elementos.

O *Natural size* associa-se à dimensão do menor elemento permitido. Brandão (2009) recomenda que o seu valor seja uma ou duas ordens de grandeza inferior ao tamanho do menor elemento geométrico existente no interior do domínio. Este aspecto somente repercute, efetivamente, no refinamento da malha junto a elementos menores, influenciando pouco a quantidade de tetraedros da malha.

O parâmetro *Cells in gap* trata da quantidade de células entre dois elementos do domínio. Estes elementos correspondem tanto às superfícies ou podem representar o espaço entre estas. A sua influência varia, portanto, de acordo com a complexidade e o tamanho dos espaços entre as superfícies, alterando o número total de elementos. Brandão (2009) indica, ainda, que para gerar malhas de tamanho razoável, o valor deve ficar entre 3 e 8.

A combinação dos parâmetros *maximum element size*, *natural size* e *cells in gap* determina a quantidade de elementos de malha presentes no domínio. Brandão (2009) observa que esse valor indica, ainda, a capacidade computacional necessária à realização da simulação e o tempo reservado a cada interação. O autor concluiu, após realizar testes com o *software*, que são necessários cerca de 1GB de RAM para cada 1.000.000 de elementos.

O programa gera a malha automaticamente, adequando-a a forma e refinando nos detalhes (figura 14). Nos cantos dos obstáculos, uma borda de prismas pode ser produzida com o objetivo de descrever melhor as trocas superficiais. A malha pode ainda ser alterada a partir da inserção de parâmetros para “amaciamento” desta, eliminando tetraedros com razão de aspecto achatada que dificultariam a obtenção de convergência.

Figura 14 – Malha gerada para a ocupação máxima e detalhe da adequação dos parâmetros junto aos espaços menores.

Na conclusão desta fase, a malha que foi gerada é exportada para o *CFX-Pre* em um arquivo de extensão *.cfx5*.

A tabela 5 a seguir apresenta a quantidade total de elementos (nós, tetraedros e prismas) gerada em cada malha para os modelos de ocupação do solo a serem simulados.

Malha gerada para simulação	Elementos	Nós	Tetraedros	Prismas
Situação_atual_leste	4.056.075	736.285	3.019.106	300.684
Situação_atual_sudeste	3.856.635	710.655	2.830.506	315.474
Ocupação_máxima_leste	3.589.627	618.712	2.772.673	198.242
Ocupação_máxima_sudeste	3.552.418	611.504	2.746.550	194.364
Ocupação_intermediária_leste	3.701.532	723.075	2.451.675	526.782
Ocupação_intermediária_sudeste	3.693.629	723.587	2.440.527	529.515

Tabela 5 – Quantidade de elementos em cada malha gerada para as simulações

2.5.4.3.1.2 CFX-Pre

O CFX – Pre corresponde a uma fase de preparação para o processamento da simulação, onde são introduzidos os seus parâmetros iniciais, definindo os modelos físicos, as propriedades dos materiais e as condições de contorno (*boundary conditions*).

2.5.4.3.1.2.1 Condições iniciais

A definição das condições iniciais trata das características do fluido, as expressões, variáveis envolvidas, unidades de grandeza, regime adotado na simulação e as condições de contorno para cada uma das *parts*. Este conjunto de informações podem ser salvas em um arquivo de extensão *.ccl* que reúne tais dados. O arquivo pode ser gerado no próprio *CFX-Pre* ou tomado de uma outra simulação feita anteriormente.

Brandão (2009) ressalta que Cóstola (2006) realizou um estudo detalhado das condições de contorno necessárias para gerar resultados de simulação mais precisos. Inicialmente, aponta o autor, é feita a opção para o regime da simulação entre transiente ou permanente. Para o caso de simulações do campo de vento, indica Brandão (2009), utiliza-se o regime permanente, uma vez que *“as condições de contorno se mantêm constantes e a relação entre o campo de velocidades e a velocidade de entrada do ar no modelo se mantém constante para velocidades de vento médias ou altas”*.

A seleção dos demais parâmetros utilizados nas simulações foi feita com base nas informações geradas pelas pesquisas desenvolvidas por Prata (2005); Cóstola (2006); Brandão (2009), descritas na tabela 6, a seguir.

Parâmetros adotados nas simulações

Simulation type (Regime adotado para a simulação)	
<i>Option</i>	<i>Steady State (Regime Permanente)</i>
Domain (Características do domínio)	
<i>Location</i>	<i>Assembly</i>
<i>Domain type</i>	<i>Fluid Domain (Domínio fluido)</i>
<i>Fluids list</i>	<i>Air at 25 °C</i>
<i>Coord Frame</i>	<i>Coord 0</i>
<i>Reference Pressure</i>	<i>1 Atm</i>
<i>Buoyancy option</i>	<i>Non Buoyant</i>
<i>Domain motion option</i>	<i>Stationary</i>
<i>Heat transfer model – Option</i>	<i>None</i>
<i>Turbulence model – Option</i>	<i>K-epsilon</i>
Output control (Forma de apresentação dos resultados)	
<i>Result – option</i>	<i>Full</i>
<i>File compression level</i>	<i>Default</i>
Solver control (Determinação dos parâmetros para cálculo no módulo solver)	
<i>Advection scheme – option</i>	<i>High resolution</i>
<i>Convergence control – timescale control</i>	<i>Auto time-scale</i>
<i>Max number of iterations</i> (número de máximo de interações visando à convergência da simulação)	200
<i>Lengh scale option</i>	<i>Conservative</i>
<i>Convergence criteria – Residual type</i>	<i>RMS</i>
<i>Residual Target</i> (meta principal de convergência)	10^{-4}
Solution units (Unidades de grandeza aplicadas aos cálculos da simulação)	
<i>Mass units</i> (unidade de massa)	Kg
<i>Lengh units</i> (unidade de comprimento)	M
<i>Time units</i> (unidade de tempo)	S
<i>Temperature units</i> (unidade de temperatura)	K
<i>Angle units</i> (unidade de ângulo)	Rad
<i>Solid angle units</i> (unidade de ângulo sólido)	Sr
Expressions (Expressões aplicadas)	
$ak = 0.41 \text{ []}$ $cmu = 0.09 \text{ []}$ $cmuhalf = cmu^{0.5}$ $denref = pref_a / (rgas * t_{amb})$ $ed1 = (ustara^3) / (ak * (z_{mod} - z_{ref}))$ $epsinner = 0.4 * unitlen$ $epsouter = 1.5 * unitlen$ $gradh = 500 * unitlen$ $pamb = pref * (\exp(-g * z / (rgas * t_{amb})) - 1.0)$ $pref_a = 101325. \text{ [Pa]}$

```

rgas = 287.09601 [ J kg-1 K-1 ]
speed = ustar*log((zmod-zref)/z0)/ak
tamb = 288.15 [ K ]
te1 = (ustar2)/cmuhalf
unitlen = 1. [ m ]
unittime = 1. [ s ]
unitvel = 1. [ m1s-1 ]
uref = 3.85*unitvel
ustara = ak*uref/log((zuref-zref)/z0)
z0 = 0.5*unitlen
zmod = abs(z + 0.005*unitlen)
zref = 0.0*unitlen
zuref = 378*unitlen

```

Tabela 6 – Parâmetros iniciais das simulações determinados no módulo CFX - Pre

2.5.4.3.1.2 Condições de contorno

A definição das condições de contorno é realizada determinando características às faces (*parts*) que influenciarão o escoamento do fluido.

Brandão (2009) considera a especificação apropriada das condições de contorno essencial para o cálculo adequado do campo de velocidades e temperaturas no fluido. Estas correspondem a um conjunto de parâmetros restritivos aplicados às *parts* do domínio e que influem no escoamento do fluido (LEITE, 2008).

As *parts* podem ser classificadas em quatro diferentes categorias de condições de contorno, a saber:

- Entradas (*inlets*) – Face de entrada do fluido no domínio;
- Saídas (*outlets*) – Superfície de saída do fluido no domínio;
- Aberturas (*openings*) – Plano de passagem do fluido no domínio;
- Paredes (*walls*) – Fronteira sólida que não permite entrada ou saída do fluido.

Em relação às *parts* definidas como paredes, há que se determinar o comportamento aerodinâmico destas superfícies sólidas entre a condição *no slip*, em que não há deslizamento quando da passagem do fluido, e *free slip*, quando o fluido passa pela superfície mas há escorregamento.

Para a condição de não escorregamento (*no slip*), é possível determinar, ainda, que existe um coeficiente de atrito entre a superfície e o fluido, porém a rugosidade é bastante inferior à dimensão do elemento em si. Esta condição (*smooth wall*) é aplicada às faces de

edificações e piso do modelo como forma de representar as superfícies de materiais típicos do meio urbano, no qual a textura dos elementos torna-se secundário, uma vez que a escala da simulação é maior. Em contrapartida, pode-se determinar uma rugosidade à superfície, aumentando o seu atrito. Nesta condição (*rough wall*), é possível admitir uma rugosidade na parte inicial do modelo como forma de indicar alterações no fluxo de vento (BRANDÃO, 2009).

Para as simulações realizadas nesta pesquisa, utilizando-se os domínios com orientação leste e sudeste, os parâmetros determinados às *parts* criadas são apresentados nas tabelas 7 e 8, a seguir.

Domínio Leste

Boundary: DOM_E	
<i>Boudary type</i>	<i>Inlet (entrada)</i>
<i>Location</i>	DOM_E
<i>Flow regime – option</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass and momentum</i>	
<i>Turbulence – option</i>	<i>Medium intensity and eddy viscosity ratio</i>
<i>Profile vector components</i>	<i>Cartesian velocity components</i>
Boundary: DOM_W (Orientação Oeste)	
<i>Boudary type</i>	<i>Outlet (saída)</i>
<i>Location</i>	DOM_W
<i>Flow regime – option</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Relative Pressure</i>	<i>0 Pa</i>
<i>Turbulence – option</i>	<i>Medium intensity and eddy viscosity ratio</i>
Boundary: Predios (Edifícios do modelo)	
<i>Boudary type</i>	<i>Wall (parede)</i>
<i>Location</i>	PREDIOS
<i>Wall influence on flow – option</i>	<i>No slip (com atrito)</i>
<i>Wall roughness – option</i>	<i>Smooth wall (baixa rugosidade – parede lisa)</i>
Boundary: Torresestudo (Algumas torres existentes no modelo onde a malha foi refinada)	
<i>Boudary type</i>	<i>Wall (parede)</i>
<i>Location</i>	TORRESESTUDO
<i>Wall influence on flow – option</i>	<i>No slip (com atrito)</i>
<i>Wall roughness – option</i>	<i>Smooth wall (baixa rugosidade – parede lisa)</i>
Boundary: DOM_N	
<i>Boudary type</i>	<i>Wall (parede)</i>
<i>Location</i>	DOM_N
<i>Wall influence on flow – option</i>	<i>Free slip (sem atrito)</i>
Boundary: DOM_S	
<i>Boudary type</i>	<i>Wall (parede)</i>
<i>Location</i>	DOM_S
<i>Wall influence on flow – option</i>	<i>Free slip (sem atrito)</i>

Tabela 7 – Características atribuídas às *parts* no domínio de orientação leste

Domínio Sudeste

Boundary: DOM_SE	
Boudary type	Inlet (entrada)
Location	DOM_SE
Flow regime – option	Subsonic
Mass and momentum	
Turbulence – option	Medium intensity and eddy viscosity ratio
Profile vector components	Cartesian velocity components
Boundary: DOM_NW (Orientação Noroeste)	
Boudary type	Outlet (saída)
Location	DOM_W
Flow regime – option	Subsonic
Relative Pressure	0 Pa
Turbulence – option	Medium intensity and eddy viscosity ratio
Boundary: Predios (Edifícios do modelo)	
Boudary type	Wall (parede)
Location	PREDIOS
Wall influence on flow – option	No slip (com atrito)
Wall roughness – option	Smooth wall (baixa rugosidade – parede lisa)
Boundary: Torresestudo (Algumas torres existentes no modelo onde a malha foi refinada)	
Boudary type	Wall (parede)
Location	TORRESESTUDO
Wall influence on flow – option	No slip (com atrito)
Wall roughness – option	Smooth wall (baixa rugosidade – parede lisa)
Boundary: DOM_NE	
Boudary type	Wall (parede)
Location	DOM_NE
Wall influence on flow – option	Free slip (sem atrito)
Boundary: DOM_SW	
Boudary type	Wall (parede)
Location	DOM_SW
Wall influence on flow – option	Free slip (sem atrito)

Tabela 8 – Características atribuídas as *parts* no domínio de orientação sudeste

A seguir, as figuras 15 e 16 apresentam o aspecto geral das condições de contorno determinadas no módulo do *cfx-pre* para os domínios leste e sudeste, respectivamente.

Figura 15 – Aspecto geral das condições de contorno para o domínio leste

Figura 16 – Aspecto geral das condições de contorno para o domínio sudeste

2.5.4.3.1.2 CFX-Solver

Considerado o “coração” do ANSYS CFX²⁸, o módulo *solver* aplica os parâmetros e as equações determinados na etapa do *CFX-Pre* para calcular os resultados da simulação. Nesta fase, destaca Prata (2005), também é possível monitorar os cálculos, os balanços globais, os pontos definidos para verificação de valores calculados, expressões, etc.

Ao final do processamento da simulação, o *CFX* gera um arquivo de resultados com a extensão **.res* para ser trabalhado no *CFXPost*, etapa seguinte.

Tendo como objetivo resultados confiáveis é recomendado verificar o nível de convergência (*convergence criteria*). O seu comportamento pode ser avaliado através dos

²⁸ <http://www.ansys.com/assets/brochures/cfx-11.pdf>

gráficos RMS gerados durante a simulação. Cóstola (2006) observa que convergências acima de 10^{-4} são muito pobres e só permitem realizar avaliações gerais, ao passo que convergências entre 5×10^{-4} e 1×10^{-4} são consideradas como regulares e aplicáveis. Convergências da ordem de 1×10^{-4} são tidas como meta da maioria das simulações, uma vez que convergências abaixo de 10^{-5} são difíceis de serem obtidas.

Figura 17 – Exemplo de convergência para massa e momento com destaque para o nível satisfatório de resíduos a ser alcançado

2.5.4.3.1.3 CFX-Post

O CFX-Post é a fase de visualização dos resultados, possibilitando gerar gráficos de acordo com as variáveis solicitadas para análise na etapa anterior.

Dentro do modelo 3D é possível analisar o fluido em escoamento com a utilização de ferramentas tais como *isosurfaces*, *slices*, *vectors*, *surface plots* e *streamlines* (MARCONDES; UMAKOSI, 2007). Podem ser produzidas, portanto, imagens ou mesmo cenas animadas plotando-se nos objetos criados os contornos, vetores, campos de velocidades, coeficientes de pressão e planos coloridos para analisar e quantificar o comportamento do fluxo em contato com os obstáculos do modelo.

No interior do modelo podem ser criados objetos tais como pontos, linhas, planos em diversos locais, permitindo verificar as condições de escoamento e os seus resultados em diferentes partes.

ESTUDO DE CASO

3. ESTUDO DE CASO

3.1 A Cidade de Fortaleza

A cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, localiza-se na zona litorânea do nordeste do Brasil. O município situa-se à porção norte do território cearense, coordenadas de latitude sul: 3° 43' 2" e longitude oeste: 38° 32' 35".

A metrópole possui uma área de 314 Km², aproximadamente, e uma altitude média de 21 m. Limita-se ao norte com o oceano Atlântico, ao sul com os municípios de Maracanaú, Itaitinga e Pacatuba, a leste com as cidades de Eusébio e Aquiraz e, a oeste, com o município de Caucaia.

Figura 18 – Brasil

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Brazil_State_Ceara.svg

Figura 19 – Ceará

Fonte: http://saber.sapo.ao/w/thumb.php?f=Ceara_Municip_Fortaleza.svg&w=280&r=1

Figura 20 – Fortaleza

Fonte: Adaptado de http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/Fortaleza_bairro_Benfica.PNG

O sítio é predominantemente plano, tendo sua formação geológica no período Quaternário, existindo, portanto, unidades geomorfológicas diversas. Destacam-se as formas de

acumulação com depósitos de areia de praia representados pelas dunas fixas, semifixas e móveis, depósitos aluvionares flúvio-marinhos, lacustres, fluviais e paleodunas. Os solos predominantes são os argissolos, que cobrem a maior parte da cidade, formados por areias quartzosas marinhas distróficas, e os neossolos, caracteristicamente arenosos, formados por areias quartzosas marinhas distróficas (PDDU, 1992).

Fortaleza desponta, atualmente, como o principal centro urbano do Ceará, concentrando a maior população do Estado²⁹. Historicamente, entretanto, a área que atualmente corresponde à cidade de Fortaleza, permaneceu, até o século XVIII, como um povoado secundário na configuração do território cearense durante as primeiras tentativas de ocupação da região com função estratégico-militar.

Com a criação da vila do Ceará, em 1699, Fortaleza é elevada à sede da província, em 13 de abril de 1726. Entretanto, o aglomerado urbano de Fortaleza desempenhava apenas função administrativa, não estabelecendo relações com outras vilas no interior do Ceará devido à limitada comunicação através de estradas e vias férreas e a inexistência de atividade pecuarista.

Após processos econômicos e políticos acionados por agentes sociais e o próprio Estado, foram instituídas atividades comerciais por meio da exportação de algodão através de seu porto, garantindo o reconhecimento da sua condição de cidade em 1826. As políticas institucionais do Primeiro Império do Brasil, em paralelo à maior expressividade urbana que a cidade apresentou, determinaram-lhe novos arranjos e diretrizes para ordenar a sua expansão. Destacam-se os projetos de traçado urbano de Manuel do Rego de Medeiros, em 1856, trabalho herdado de Silva Paulet, e o planejamento urbano determinado pelas plantas de Adolfo Herbster, em 1859 e seguintes. O traçado urbano apresentava os preceitos higienistas do século XIX.

Figura 21 – Planta Padre Manuel do Rego de Medeiros, em 1856.
Fonte: Azevedo (2001).

Figura 22 – Planta Adolfo Herbster em 1859
Fonte: Azevedo (2001).

²⁹ Com população superior a dois milhões e quatrocentos mil habitantes, Fortaleza configura-se enquanto centro regional, concentrando um contingente populacional que representa 29,70% dos cearenses, segundo o IBGE (2007).

Inicialmente, a expansão da cidade deu-se em direção ao oeste, sul e sudeste da capital cearense (FUCK JÚNIOR, 2003). O vertiginoso crescimento demográfico da cidade durante os primeiros anos do século XX associou-se aos episódios de seca no interior do estado, contribuindo para a expansão demográfico-espacial responsável pela formação da atual paisagem da metrópole.

3.1.1 Expansão Urbana de Fortaleza

O processo que compreende a transformação de Fortaleza em metrópole teve início na segunda metade dos anos oitenta quando ocorreu um crescimento acelerado em sua população e contornos físicos, tendo sua população ultrapassado a marca de um milhão de habitantes em 1980 e de dois milhões em 2004 (BRANDÃO, 1995).

Em relação à sua configuração urbana, Cartaxo Filho (2000) destaca que no decorrer das décadas de 1980 e 1990 Fortaleza apresentou um ritmo de construir-se e reconstruir-se que se traduziu num crescimento cuja velocidade surpreende até leigos, enquanto as possibilidades de ordená-lo no sentido de atender às demandas citadinas encontram grandes obstáculos.

Fuck Júnior (2003) descreve que a capital cearense tinha um perfil “horizontal” até há poucos anos. O desenvolvimento das tecnologias de construção, a atuação do mercado imobiliário e a demanda gerada pelo crescimento populacional acentuaram o processo de verticalização nos últimos vinte anos, reformulando diversos trechos da cidade, reconfigurando a paisagem urbana, estendendo e adensando o espaço construído.

Silva (2001)³⁰ descreve os aspectos do crescimento da metrópole:

“Nas últimas décadas, o crescimento acelerado da cidade resultou na sua configuração metropolitana, dominada também pela pobreza urbana, o que tem ocasionado significativa mudança na sua estruturação interna, formação de anéis periféricos e expansão da bacia metropolitana. Essa configuração adquire feições caóticas diante da trama tecida pela gestão urbana, onde interesses em conflito resvalam pela lógica da especulação imobiliária. A cidade continua com altos índices de crescimento, o que tem provocado o preenchimento de seus vazios urbanos, mesmo com a ocorrência de um acelerado processo de verticalização”.

Mais recentemente, a capital cearense atravessa um processo de expansão urbana em direção às zonas periféricas a leste da cidade, caracterizando-se, também, pela concentração de estruturas verticais (Jornal O POVO, 2006). A evidente verticalização da cidade é, dentre outros aspectos, resultado dos altos custos do terreno, necessidade de locais de moradia e comércio mais próximos ao seu centro e maior segurança.

³⁰ SILVA, J. B. **Fortaleza: 275 anos**. Jornal O Povo - Coluna Opinião. Fortaleza, 08/04/2001 apud Fuck Júnior (2003).

De forma menos acentuada o adensamento em edificações residenciais e comerciais de altura pronunciada está presente também em outras partes do tecido urbano da capital cearense, mormente, ao longo de vias públicas ou principais eixos de ligação intra-urbano ou com outros municípios da Região Metropolitana de Fortaleza³¹ (RMF).

Araújo e Carleial (2003) explicam que desde os anos 1970 a cidade vem crescendo rumo ao setor leste, expandindo-se horizontal e verticalmente. A partir da construção do Shopping Center Um, em 1974, no bairro da Aldeota, inúmeros outros investimentos privados foram atraídos, entre unidades comerciais de bancos e cartórios. Ainda, a instalação de equipamentos de ensino e de lazer, como a Universidade de Fortaleza (UNIFOR) e o Centro de Convenções, no mesmo ano, conduziram a malha urbana fortalezense para esta área da cidade. Desta forma, destacam as autoras, desencadeou-se um processo de ocupação de novos bairros, dentre os quais se destacam Edson Queiroz e Água Fria.

Na década seguinte, consolidou-se tal processo de expansão urbana em direção a este setor, envolvendo interesses comerciais, políticos e imobiliários. Neste mesmo período foi construído o Shopping Center Iguatemi junto ao Parque do Cocó. A instalação do Centro Administrativo Virgílio Távora (CAMBEBA), sede do governo estadual, em 1981, participou da estratégia de valorização do sudeste da capital cearense, envolvendo a esfera política. Posteriormente, o Fórum da Comarca foi transferido para o mesmo setor, em 1997, reforçando a tendência de valorização daquela área da cidade (ARAÚJO; CARLEIAL, 2003).

A porção sudeste do Município de Fortaleza corresponde, historicamente, ao Distrito de Messejana. Sua ocupação é antiga, manifestando-se em paralelo à de Fortaleza, independente, entretanto, devido à sua condição de vila e, posteriormente, de município (FUCK JÚNIOR, 2003).

3.1.2 Legislação Urbana Aplicada à Cidade de Fortaleza

Os modelos urbanos desenvolvidos por Adolfo Herbster e Silva Paulet, ainda no século XIX, influenciaram a confecção dos novos planos urbanísticos para a cidade de Fortaleza. Como destaca Fuck Júnior (2003), estes se preocupavam com a funcionalidade do desenho urbano através do ordenamento físico da cidade e do higienismo, expressos pela criação de normas de conduta à medida que a cidade se transformava sociocultural e politicamente durante o seu crescimento demográfico-espacial e econômico.

Em 1932, o urbanista Nestor de Figueiredo empreendeu o Plano de Remodelação e Extensão de Fortaleza, que incorporava princípios racionalistas de zoneamento e higienismo. O

³¹ A Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), instituída pela Lei complementar nº 18, de 29/12/1999, é constituída pelos municípios de Aquiraz, Caucaia, Chorozinho, Eusébio, Fortaleza, Guaiúba, Horizonte, Itaitinga, Maracanaú, Maranguape, Pacajús, Pacatuba e São Gonçalo do Amarante.

Plano de 1948 absorvera os ideais propostos por Camilo Sitte, Ebenezer Howard e Raymond Unwin relativos à criação de espaços livres, unidades de habitação popular, determinação dos tipos de quadra, lote e limites de crescimento da cidade.

Correspondendo à evolução de tais propostas, os Planos Diretores desenvolvidos a partir da década de 1960 concretizam a visão modernista de cidade.

O primeiro plano diretor de desenvolvimento urbano de Fortaleza foi elaborado em 1963 pelo urbanista Hélio Modesto, com colaboração de Andina Mera (urbanista), José Arthur Rios (sociólogo) e Mário Laranjeiras Mendonça (engenheiro). Vinculava-se às iniciativas de planejamento no âmbito nacional, relacionando-se às políticas de desenvolvimento praticadas por instituições de promoção do crescimento nordestino e ao planejamento de outras capitais desta região do Brasil (HISSA, 2005).

O plano foi pioneiro na incorporação e aplicação de instrumentos de uso e ocupação do solo segundo o zoneamento proposto para cada região da cidade, princípios disseminados pelo movimento modernista e apresentados pela Carta de Atenas. Tinha como características principais a divisão da cidade em quatro zonas segundo os usos permitidos aos terrenos e edificações, definindo, também, a sua volumetria. Apresentava, ainda, uma adaptação ao conceito de unidade de vizinhança ao instituir um centro local em cada bairro, reunindo comércio, instituição de ensino e religiosa como forma de diminuir os deslocamentos da população à semelhança do que propunha o modelo de cidade polinucleada. Incitava-se, assim, o adensamento populacional em torno desses núcleos em cada comunidade.

O crescimento acelerado das metrópoles brasileiras ocorrido durante a década de 1970 conduziu à criação de novas disposições administrativas visando o planejamento da urbanização brasileira, como destaca Hissa (2005). O II Plano Nacional de Desenvolvimento (PND), datado de 1974, definia os contornos da política urbana nacional, que objetivava, sobretudo, consolidar as regiões metropolitanas.

De acordo com Araújo e Carleial (2001) a metropolização e crescimento da cidade tornou-se visível nesse período, concomitante à instituição oficial da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Foi durante o referido período, como apontam as autoras, que a malha urbana cresceu e verticalizou-se o seu solo. Notava-se, também, uma crescente disparidade na distribuição da população no território cearense, colocando a capital em primazia absoluta devido ao avançado processo de expansão urbana e concentração demográfica.

O Plano de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Fortaleza (PLANDIRF) baseava-se em uma abordagem integrada das questões urbanas, envolvendo a capital cearense e os municípios adjacentes, propondo o zoneamento da cidade e hierarquização

do sistema de vias do município. Esse conjunto de diretrizes fundamentou o planejamento urbano da cidade na década de 1970, resultando nos principais instrumentos de regulação urbanística do período: o Plano Diretor Físico de 1975³² e a Lei de Uso e Ocupação do Solo de 1979³³.

Segundo Barbosa (2006), a normatização urbanística desenvolvida neste período foi essencial à transformação da paisagem de Fortaleza. O conjunto de prescrições edilícias inaugurou um modelo de expansão da cidade baseado na descentralização urbana, através do desenvolvimento de pólos e corredores de adensamento, e na verticalização acompanhada pela especulação imobiliária verificada a partir dos anos de 1980 na zona leste e orla marítima da cidade. A principal característica do Plano de 1979 era a proposta de descentralização da cidade de Fortaleza através dos pólos e corredores de adensamento, setores da cidade com maior concentração populacional e comércio intenso. A malha viária adotou a configuração radial-concêntrica e ortogonal preexistente e foram estabelecidas quatro zonas para o município: comercial, residencial, industrial e especial.

Em 1992 foi elaborado o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Fortaleza – PDDU-FOR, que tinha como objetivo evitar e corrigir desigualdades socioeconômicas e distorções do crescimento urbano através da ordenação e expansão dos núcleos urbanos e adequada distribuição espacial da população e das atividades. O plano incorporou novos instrumentos de planejamento, tais como a Função Social da Propriedade, a Ação Consorciada entre poder público e iniciativa privada, o índice de aproveitamento homogêneo (igual a 1,0) e a criação de Fundos Municipais de investimento social (PDDU-FOR, 1992).

O PDDU-FOR (1992) dividiu a metrópole em três setores, definidos como macrozonas: a zona urbanizada, que reunia setores que apresentavam melhores condições de infra-estrutura básica e concentravam a maior parte da população e atividades urbanas; a zona adensável, cujos bairros ainda careciam de infra-estrutura necessária à sua expansão; e a zona de transição, da qual faziam parte remanescentes de características rurais e que constituir-se-iam nas reservas ao desenvolvimento urbano da capital cearense.

A revisão do plano de 1992 culminou na proposta do Plano Diretor Participativo de Fortaleza (PDPFor), apresentado em 2009. O ordenamento territorial da cidade, de acordo com propósitos da política urbana expressos pelo PDPFor (2009), atende às diretrizes de planejamento e controle do uso do solo e desenvolvimento do município. O plano objetiva

³² O Plano Diretor Físico de 1975, lei nº 4486, instituiu zona residencial no bairro Aldeota, determinando-lhe gabarito até 3 pavimentos e taxa de ocupação de 40 a 50%, com índices de aproveitamento de 1 a 1,5. Nas principais avenidas da cidade o gabarito foi elevado até 10 pavimentos, com taxa de ocupação de 70% e recuo mínimo de 3 metros.

³³ A lei nº 5122-A, de 1979, definiu os corredores de atividade e intensificou a verticalização da cidade e o adensamento do bairro da Aldeota.

distribuir espacialmente a população e atividades sociais e econômicas como forma de evitar distorções no crescimento da cidade, a retenção especulativa do imóvel urbano, os conflitos entre atividades incompatíveis e o uso inadequado das propriedades e espaços públicos em relação à infra-estrutura instalada, zoneamento, função social e impactos negativos sobre o meio ambiente.

Para tanto, o atual zoneamento do município incentiva a multiplicidade e interação de diferentes grupos sociais e de atividades na malha urbana, intensificando o uso e ocupação do solo e adensamento construtivo nas áreas com disponibilidade de infraestrutura, serviços urbanos e com quantidade significativa de imóveis não utilizados e subutilizados (PDPFor, 2009).

O atual Plano Diretor de Fortaleza estabelece como parâmetros urbanísticos reguladores da ocupação do solo o índice de aproveitamento, a altura máxima da edificação, a taxa de permeabilidade, os recuos, a taxa de ocupação do solo e do subsolo e a fração do lote (PDPFor, 2009).

O zoneamento elaborado como base ao plano divide o território municipal em duas áreas: a macrozona de ocupação urbana e a macrozona de proteção ambiental (figura 23). Esta última corresponde às áreas compostas por ecossistemas de interesse ambiental e áreas destinadas à proteção, preservação, recuperação ambiental.

Figura 23 – Zoneamento proposto pelo PDPFor, com destaque para os bairros Cambeba e Jardim Iracema, onde localiza-se a área de estudo.

Fonte: PDPFor (2009).

A macrozona de ocupação urbana, por sua vez, corresponde às partes do ambiente urbano caracterizadas pela significativa presença de ambiente construído, dividindo-se em:

- Zonas de Ocupação Preferencial 1 e 2 (ZOP 1), (ZOP 2);
- Zona de Ocupação Consolidada (ZOC);
- Zonas de Requalificação Urbana 1 e 2 (ZRU 1); (ZRU 2)
- Zonas de Ocupação Moderada 1 e 2 (ZOM 1), (ZOM 2);
- Zona de Ocupação Restrita (ZOR);
- Zona da Orla (ZO)

Figura 24 – Zoneamento Ambiental de Fortaleza com destaque para os bairros Cambeba e Jardim Iracema, onde localiza-se a área de estudo.

Fonte: PDPFor (2009).

De acordo com a lei de uso e ocupação de 1996³⁴, ainda em vigor, o trecho objeto de estudo, localizado entre os bairros Jardim Iracema e Cambeba, situava-se entre as zonas adensáveis 1 e 3.

À época, o plano apontava nestas áreas a tendência de expansão das atividades urbanas, com possibilidade de ampliação, ordenamento e direcionamento da infra-estrutura instalada, sem prejuízos para a ocupação existente. Assim, definia os gabaritos de 72 m para o bairro do Jardim Iracema, com índice de aproveitamento máximo de 2,0; e 48 m para o bairro do Cambeba, com índice de aproveitamento máximo de 1,0, como se observa na tabela 9 a seguir (LUOS, 1996).

³⁴ Lei 7.987 de 23 de dezembro de 1996, consolidada em 1998.

Atualmente, segundo o PDPFor (2009), o trecho enquadra-se na Zona de Ocupação Moderada 2. Classificação reservada às áreas caracterizadas pela insuficiência ou ausência de infraestrutura, carência de equipamentos públicos, tendência de intensificação da implantação de equipamentos privados comerciais e de serviços de grande porte e áreas com fragilidade ambiental.

São determinados os seguintes parâmetros urbanísticos à ZOM 2,:

- Índice de aproveitamento básico de 1,0;
- Índice de aproveitamento máximo até 1,5;
- Índice de aproveitamento mínimo de 0,1;
- Taxa de permeabilidade de 40%;
- Taxa de ocupação de 50%;
- Taxa de ocupação de subsolo de 50%;
- Altura máxima da edificação até 48 m;
- Área mínima de lote de 150m²;

Entretanto, o PDPFor (2009) abre uma exceção quanto aos parâmetros urbanísticos aplicados à ZOM 2 para um trecho específico desta zona. O parágrafo único³⁵ do artigo 105, seção VII, determina que o perímetro apresentado no mapa a seguir (figura 25), *“tem os parâmetros urbanísticos diferenciados no que se refere aos índices de aproveitamento básico e máximo que são iguais a 2,0 e a altura máxima da construção que equivale a 72m”*.

A poligonal descrita no plano apresenta comprimento de 20.500 m, aproximadamente, e abrange uma área de 8.649.020 m² em que se destaca a tendência à verticalização em meio ao setor sudeste de Fortaleza, parte da cidade mormente ocupada por edificações de gabarito reduzido.

Compreendendo que esta parte da capital cearense atravessa um processo de expansão urbana vinculado ao mercado imobiliário, evidencia-se, portanto, que tais diretrizes urbanísticas diferenciadas de gabarito mais elevado e maior índice de aproveitamento corroboram para que se intensifiquem a verticalização e o adensamento construtivo neste trecho da ZOM 2, uma vez que são permitidas as condições construtivas necessárias para atender a demanda do mercado imobiliário através de um produto já bastante difundido em outras partes da malha urbana fortalezense: a torre de apartamentos residenciais.

³⁵ A descrição completa do parágrafo único do artigo 105 do PDPFor (2009), incluindo a determinação do perímetro urbano em que os índices diferem do restante da Zona DE Ocupação Moderada 2 (ZOM 2) consta no anexo 1.

MICROZONAS DE DENSIDADE	TAXA DE PERMEABILIDADE (%)	TAXA DE OCUPAÇÃO - (%)				FRAÇÃO DO LOTE (m²)		ÍNDICE DE APROVEITAMENTO I. A.			ALTURA MÁXIMA DA EDIFICAÇÃO	DIMENSÕES MÍNIMAS DO LOTE		
		RESIDENCIAL		OUTROS USOS	SUB-	RESIDENCIAL	C.S.M.	RESIDENCIAL		OUTROS USOS	GABARITO	LOTE		
		UNI	MULTI					UNI	MULTI			TESTADA	PROFUNDIDADE	ÁREA
ZA 1 MESSEJANA / PARQUE IRACEMA	40	45	50	50	50	100	25	1,0	2,0	2,0	72,00	5,00	25,00	125,00
ZA 2-1 ITAPERI / PREF. JOSÉ WALTER / JANGURUSSU	40	45	50	50	50	140	35	1,0	1,0	1,0	48,00	6,00	25,00	150,00
ZA 2-2 GUARARAPES / ENG. LUCIANO CAVALCANTE	40	45	50	50	50	140	35	1,0	2,0	2,0	48,00	6,00	25,00	150,00
ZA 3 CAMBEBA / CIDADE DOS FUNCIONÁRIOS	40	45	50	50	50	200	50	1,0	1,5	1,5	48,00	6,00	25,00	150,00
ZA 4-1 EDSON QUEIROZ / SABIAGUABA	40	45	-	50	50	-	-	1,0	-	1,0	15,00	8,00	25,00	200,00
ZA 4-2 SAPIRANGA - COITÉ / ALAGADIÇO NOVO	40	45	-	50	50	-	-	1,0	-	1,0	15,00	6,00	25,00	150,00
ZA 4-2 DIAS MACEDO / CASTELÃO / JARDIM DAS OLIVEIRAS	40	45	-	50	50	-	-	1,0	-	1,0	15,00	6,00	25,00	150,00

Tabela 9 - Indicadores urbanos de ocupação da macrozona adensável com destaque para os bairros Parque Iracema e Cambéba.

Fonte: Adaptado de Lei de Uso e Ocupação do solo – LUOS (1996).

Figura 25 – Delimitação do trecho de estudo nos bairros Cambeba e Parque Iracema e demarcação do Parágrafo único com base no PDPFor (2009).

Fonte: Adaptado de PDPFor (2009).

A área de estudo, marcada em vermelho na figura 25, representa uma interseção entre os bairros Parque Iracema e Cambeba. Em parte do trecho de análise, mais especificamente a oeste da área de estudo, a elevação do gabarito até 72 m é permitida, enquanto que no restante, a leste do trecho, vigora a restrição até 48 m, como é possível perceber pela demarcação em azul do parágrafo único do artigo 105 estabelecido pelo PDPFor (2009).

3.2 A área de estudo

Especificamente em relação ao trecho objeto de estudo no setor sudeste da cidade, que compreende parte dos bairros Parque Iracema e Cambéba, o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Fortaleza de 1992 determinara-lhes “urbanização prioritária”³⁶, o que intensificou a sua ocupação a partir do direcionamento da infra-estrutura de maneira compatível com a densidade indicada pelo planejamento então vigente, de acordo com os mecanismos fração do lote e índice de aproveitamento.

Em sua configuração atual, esta área da cidade é composta por bairros bastante heterogêneos quanto aos aspectos socioeconômicos e ambientais (FUCK JÚNIOR, 2003). O setor também vem sendo atingido indiretamente pelos incentivos à industrialização e valorização do turismo no Estado do Ceará, fomentados pela agenda do Governo Estadual. Os fluxos que atravessam seu território foram adensados, intensificando o seu uso e requalificando-o, além da expansão *in situ* promovida pela própria demanda de ocupação deste espaço.

A área de estudo, demarcada em vermelho na figura 26, compreende um total de 949.340,12 m², limitando-se ao norte com a Av. Dq. Eng. Agro. José Guimarães, ao leste com a Av. Pedro Lazar, ao sul com a Rua Inácio Vasconcelos e ao Oeste com a BR – 116.

Figura 26 - Delimitação da área de estudo
Fonte: Adaptado de Google earth

³⁶ O artigo 156 da Lei Orgânica do Município de Fortaleza estabelece que as “áreas de urbanização prioritária são as destinadas a: a) ordenação e direcionamento da urbanização; b) implantação prioritária dos equipamentos urbanos e comunitários; c) indução à ocupação de terrenos edificáveis”.

Nas áreas leste e sudeste anteriores ao trecho de estudo, e que correspondem à orientação dos ventos predominantes, diversos empreendimentos residenciais vem alterando as condições de rugosidade (z_0) neste setor da cidade. A verticalização já verificada nesses trechos, como demonstram as figuras 27 e 28, soma-se às demais edificações de baixo gabarito para indicar uma condição de subúrbio ($z_0 = 0,5$) na determinação da rugosidade aplicada às simulações.

Figura 27 – Verticalização a cerca de 500 m antes da área de estudo.

Fonte: Arquivo do autor

Figura 28 – Verticalização a cerca de 750 m antes da área de estudo.

Fonte: Arquivo do autor.

Como forma de melhor caracterizar o trecho estudado, foi realizado um levantamento da ocupação do solo no setor percorrendo-o e registrando, através de fotografias e anotação em mapa, o uso e a altura das edificações (gabarito).

Partiu-se do levantamento das informações cartográficas desta área. Além dos órgãos da Prefeitura Municipal de Fortaleza, as principais empresas incorporadoras com projetos arquitetônicos para este setor da cidade foram contatadas, solicitando-lhes os detalhes dos empreendimentos a serem construídos.

Este material foi necessário à atualização do mapa disponível, datado de 1999. O mapa atualizado constituirá a base para elaboração dos diversos cenários de ocupação da área de estudo a serem submetidos à simulação computacional.

Como resultado, foram confeccionados dois mapas atualizando os dados da área de estudo: um indicando a altura das edificações (figura 29) e outro apontando o uso do solo segundo a atividade da edificação (figura 30). Tais informações foram coletadas *in loco*. Em seguida procedeu-se a sua vetorização em CAD com o auxílio de imagens aéreas (*Google earth*).

Relativamente à ocupação do solo, a área de estudo é composta, em sua maioria, por edificações residenciais unifamiliares de baixo gabarito, destacando-se alguns edifícios residenciais verticais, variando entre 4 ou 5 pavimentos e alguns poucos de 21 pavimentos.

A relativa horizontalidade na ocupação desta parte da cidade é rompida pela inserção pontual de torres de edifícios residenciais que contrastam com as edificações de baixo gabarito, como se observa no mapa a seguir. A ocupação verticalizada será intensificada a partir da execução dos diversos empreendimentos previstos para o trecho.

Quanto ao uso do solo, verifica-se, ainda, a presença de um rarefeito comércio local e algumas poucas edificações de uso misto, serviços, cultural ou institucional.

Figura 29 - Mapa levantamento gabarito das edificações do trecho de estudo

Fonte: Arquivo de dados da pesquisa.

Figura 30 - Mapa levantamento de uso do solo do trecho de estudo

Fonte: Arquivo de dados da pesquisa.

A definição da área de estudo foi feita com base na percepção da expansão urbana experimentada pelo setor sudeste da capital cearense. O crescimento desta parte da cidade é visível, caracterizando-se pela verticalização e adensamento construtivo.

Atualmente, observa-se às margens BR-116, parte do bairro Jardim Iracema e adjacências um processo de verticalização que vem alterando o padrão de ocupação do solo da região. Espaços onde mormente era verificada a presença de edificações residenciais unifamiliares ou condomínios horizontais, começam, paulatinamente, a ceder espaço aos edifícios de múltiplos pavimentos, como é possível verificar no levantamento fotográfico apresentado a seguir (figuras 26 a 32).

Tal mudança reflete a valorização do solo da área, cujo processo de expansão urbana vincula-se ao mercado imobiliário da capital cearense, respaldado, também, pela legislação urbana, que manteve os índices construtivos do plano de 1992 na revisão apresentada em 2009, estimulando a presença de tais estruturas verticais neste trecho.

Contrastando com a ocupação verticalizada de parte do trecho de estudo, ressalta-se a presença quadras ocupadas por edificações de baixo valor agregado e terrenos desocupados. A possibilidade de substituição dessas edificações, suscetíveis à ação de compra pelo mercado imobiliário, reforça a tendência de verticalização verificada na área.

Figura 31 – Padrão de uso do solo comum ao setor: o condomínio residencial horizontal.
Fonte: Arquivo do autor.

Figura 33 – Padrão de verticalização típico da área
Fonte: Arquivo do autor.

Figura 32 - Tipologia de verticalização característica da área
Fonte: Arquivo do autor.

Figura 34 – Condomínio vertical em construção
Fonte: Arquivo do autor.

Figura 35 – Verticalização a nordeste do trecho de estudo (índice de aproveitamento igual a 2,0 e gabarito máximo de 72 m).

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 36 – Vista geral da verticalização do trecho com índice de aproveitamento igual a 2,0 e gabarito máximo de 72 m.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 37 – Verticalização a sudeste do trecho de estudo (índice de aproveitamento igual a 2,0 e gabarito máximo de 72 m).

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 38 – Exemplo de projeto imobiliário para parte da área de estudo com índice de aproveitamento 1,5.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 39 – Conjunto de edificações de baixo valor e suscetíveis à compra para posterior verticalização dos seus terrenos.

Fonte: Arquivo do autor

Figura 40 – Padrão típico das residências de maior valor de compra mantidas nos cenários de ocupação do solo.

Fonte: Arquivo do autor.

3.3 Os cenários de ocupação do solo para simulação

Para a simulação computacional do comportamento do vento sobre a área de estudo torna-se necessário construir modelos tridimensionais de ocupação do solo. A modelagem virtual dos cenários foi feita com base nos índices presentes na legislação urbana vigente em Fortaleza.

3.3.1 A situação atual

O primeiro cenário de ocupação do solo elaborado consiste no modelo base e representa a situação atual da ocupação do solo na área de estudo.

A principal função deste modelo é servir de base para a comparação com os demais cenários de ocupação do solo propostos, permitindo avaliar o impacto das alterações nos demais cenários sobre a ventilação natural na área de estudo.

Procurou-se representar as edificações existentes preservando, ao máximo, as suas características reais. Entretanto, torna-se necessário unificar os volumes, simplificando curvas e faces muito pequenas como forma de melhorar o desempenho computacional. Edículas e edificações menores foram desconsideradas.

Ainda, nos terrenos onde existe vegetação de médio porte representou-se esta como um paralelepípedo com 3m de altura.

Nesse cenário se destacam os dois conjuntos de edificações de maior altura ao centro e próximo à borda sul do modelo. A maior ocupação ocorre junto às residências unifamiliares de baixa renda localizadas entre essas dois conjuntos verticalizados, como se observa na figura 41, a seguir.

Figura 41 – Visualização tridimensional do cenário de ocupação atual

3.3.2 A ocupação máxima permitida

Para a elaboração de um cenário simulando a ocupação máxima permitida pela legislação urbana partiu-se de algumas premissas. Inicialmente, adotou-se o uso residencial multifamiliar – R2 (edifícios de apartamentos), aplicando-se o potencial construtivo máximo permitido, traduzido pelo gabarito de 72 m e índice de aproveitamento de 2,0, resultando em uma expressiva verticalização do trecho de estudo. A altura de pé-direito foi estabelecida em 3 m e, para efeito de cálculo dos recuos mínimos, baseou-se no artigo 60 da Lei de uso e ocupação do solo, correspondendo a 14% da altura da edificação, o que equivale a 10,20 m em relação às divisas do lote.

Hipoteticamente, a forma de atuação do mercado imobiliário na área de estudo se daria através da compra de edificações de menor valor de venda e/ou terrenos não edificadas, lembrando tais lotes para erguer torres residenciais com a altura máxima permitida.

Dessa forma, somente as edificações de uso institucional e aquelas de melhor qualidade construtiva presentes na área, tais como condomínios residenciais horizontais e residências unifamiliares de maior porte, foram mantidas. Tal medida deve-se ao fato que a compra de edificações desse tipo ou um conjunto dessas seria improvável pelo valor das edificações.

O processo de confecção do modelo deu-se, então, a partir da reunião dos lotes visando atingir uma área de terreno em que fosse possível construir o padrão de edifícios de apartamentos residenciais verificados na área: entre 90 e 130 m² de área útil por unidade habitacional. O resultado são prédios com área total de piso entre 220 e 280 m², uma vez que parte deste total corresponde às áreas comuns de circulação. As medidas adotadas devem-se às observações levantadas durante reuniões³⁷ com profissionais envolvidos na produção arquitetônica na cidade de Fortaleza e, mais especificamente, na área de estudo.

Para definir-se o potencial construtivo de cada terreno aplicou-se a equação 9, a seguir, com base nos parâmetros urbanísticos aplicados à área de estudo.

$$\text{Área edificável} = \frac{\text{Área do terreno} \times \text{Índice de Aproveitamento}}{\text{Gabarito}} \quad (\text{Equação 9})$$

³⁷ Como forma de melhor caracterizar a forma de atuação do mercado imobiliário na área de estudo, foi realizada uma reunião com o arquiteto e urbanista Eugênio Celso, profissional à frente do escritório Arquitetura e Cia, sediado em Fortaleza e cuja produção técnica engloba edifícios residenciais em diversos locais da capital cearense, inclusive no setor sudeste desta. O foco da reunião foram as possíveis formas de ocupação da área de estudo considerando os índices urbanísticos vigentes e os produtos imobiliários mais utilizados nesta parte da cidade. Em outra ocasião foi realizada uma reunião com o arquiteto e urbanista Antônio Custódios Santos, coordenador técnico do escritório Croquis Projetos e Construções e presidente do IAB-CE durante os anos de 2008 a 2009. Na oportunidade foram discutidas as formas de ocupação do solo propostas pelo plano diretor e sua relação com variáveis ambientais, com reflexos nas diretrizes adotadas nos cenários de ocupação do solo propostos nessa investigação.

Ressalta-se, por último, que o aspecto do edifício obedece a uma proporção retangular e sua orientação considerou o sentido leste para a fachada principal do edifício. Tais decisões tomadas devem-se a observação das características e diretrizes comuns ao projeto de edifícios residenciais verticais na cidade de Fortaleza, onde a disposição dos ambientes internos dos apartamentos deve priorizar a condição nascente, o que resulta numa configuração espacial mais alongada em direção às laterais e pouca profundidade na planta do pavimento tipo. Tais aspectos também foram evidenciados durante as reuniões realizadas.

Figura 42 – Visualização tridimensional do cenário de ocupação máxima permitida

3.3.3 A ocupação intermediária

A proposta de uma ocupação intermediária constitui um questionamento da legislação urbana. Mais especificamente, realiza-se uma crítica à existência do parágrafo único do artigo 105, que determina uma variação dos índices urbanísticos aplicados a um trecho específico da malha urbana inserido na ZOM 2, permitindo a sua verticalização até 72 m.

Dessa forma, foram aplicados o gabarito de 48 m e índice de aproveitamento de 1,5 para todo o trecho como se o parágrafo único não existisse. Nos casos em que as edificações já foram construídas foi mantida a altura máxima, considerando tal permissividade. Em relação às

edificações ainda propostas no principal condomínio de torres residenciais, recorreu-se à limitação do seu gabarito, mantendo-se, no entanto, a mesma área de ocupação.

Para a definição da forma de ocupação dos lotes utilizou-se a equação 9. Buscou-se a semelhança na forma de ocupação visando comparar os resultados do escoamento do vento entre os demais cenários confeccionados.

Figura 43 – Visualização tridimensional do cenário de ocupação intermediária

3.4 Caracterização Climática da Cidade de Fortaleza

O clima da capital cearense é do tipo AW' da classificação de Köppen (1918), correspondendo ao macroclima da faixa costeira, tropical chuvoso, quente e úmido, com temperatura média de 26,6 °C. Caracteriza-se por um alto índice de umidade relativa do ar devido à influência marítima e alta taxa de evaporação, segundo a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Os meses de junho, julho e agosto apresentam menores médias de temperatura com 25,9 °C, 25,7 °C e 26,1 °C, respectivamente. Novembro, dezembro e janeiro contrapõem-se à estação invernal, com médias elevadas: 27,2 °C, 27,3 °C e 27,4 °C, respectivamente.

A intensa radiação solar e conseqüente elevação das temperaturas no município durante o segundo semestre, associadas às baixas precipitações a partir de junho, intensificam as taxas de evaporação nesta época do ano, atingindo, em média, 1469 mm/ano. É durante a máxima

atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que ocorre o período mais chuvoso, nos meses de março, abril e maio, e que são verificados os mais baixos índices de evaporação (SOUZA, 2009).

O diagnóstico climático para a cidade de Fortaleza pode ser obtido por meio das normais climatológicas, que correspondem às médias dos dados medidos durante 30 anos em estações meteorológicas controladas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A série de registros utilizada compreende o período entre 1961 e 1990 e foi obtida a partir do *software* Climaticus, desenvolvido por Alucci (2003) (tabela 10).

Cidade: Fortaleza		Latitude: 3.46 (S)		Longitude: 38, 4 (W. Grw.)		Altura: 26,5 m									
Registro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano		
Pressão Atmos (hPA)	1007	1008	1008	1008	1009	1010	1011	1010	1010	1009	1008	1008	1008,7		
Temp. Média (°C)	27,3	26,7	26,3	26,5	26,3	25,9	25,7	26,1	26,6	27	27,2	27,3	26,6		
Temp. Máxima (°C)	30,5	30,1	29,7	29,7	29,1	29,6	29,5	29,1	29,2	30,5	30,7	30,8	29,9		
Temp. Mínima (°C)	24,7	23,2	23,8	23,4	23,4	22,1	21,8	22,6	23,4	24,5	24,4	24,6	23,5		
Temp Máx Absoluta (°C)	33	33,3	32,8	32,6	32,8	32	33	34,4	33,4	33,4	33	33,2	34,4		
Temp Mín Absoluta (°C)	20,1	21,2	20,6	20	21	20,3	19,3	19,5	20,1	20,9	20,6	21	19,3		
Precipitação Total (mm)	130	216	339	348	226	160	91,4	31,2	22,8	15,6	13,4	49,8	1642,3		
Precip-Máx em 24h (mm)	81,2	211	128	196	131	142	149	131	38,1	36	19,1	74,4	211,4		
Evaporação Total (mm)	120	95,5	72,4	68,1	84,6	94,7	118	152	168	174	168	154	1469,2		
Umidade Relativa (%)	78	79	84	85	82	80	80	75	74	73	74	76	78,3		
Insolação Total (horas)	216	176	149	153	209	240	263	169	283	296	283	257	2694,3		
Nebulosidade (0-10)	6	6	7	7	6	5	4	4	4	4	5	5	5,3		

Tabela 10 - Tabela Normais climatológicas para Fortaleza.
Fonte: Alucci (2003).

O Climaticus oferece ao usuário a um banco de dados climáticos de 58 cidades brasileiras e disponibiliza ferramentas para o diagnóstico climático, tais como a Carta Bioclimática de Givoni, a classificação do clima segundo Mahoney e diagramas de geometria. Fornece, também, gráficos de temperatura e umidade, radiação solar e insolação, ventos, precipitação e nebulosidade. O programa ainda permite estimar o consumo e o custo de energia elétrica de um ambiente.

Analisando-se a figura 44, pode-se apreender que praticamente durante todo o ano, a partir do início da tarde até o começo da noite, a temperatura do ar atinge níveis mais elevados, situando-se em torno de 30 e 32 °C.

Figura 44 – Variação da temperatura do ar de Fortaleza ao longo do dia durante o ano
Fonte: Alucci (2003).

Como é possível perceber na figura 45, a temperatura máxima do ar atinge valores mais altos, ao redor de 32 °C, justamente durante e os meses de outubro, novembro e dezembro, aumentando as taxas de evaporação. Este período antecede a maior incidência de precipitações, localizada nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril e maio (figura 46).

Figura 45 – Variação da temperatura máxima do ar ao longo do ano
Fonte: Alucci (2003).

Figura 46 – Distribuição da precipitação mensal ao longo do ano.
Fonte: Alucci (2003).

A umidade relativa do ar tem sua curva alterada durante o dia, revelando picos durante as primeiras horas da manhã e depressão ao longo da tarde (figura 47), período em que as temperaturas do ar estão mais elevadas.

Em relação às horas de sol, os meses de setembro, outubro e novembro apresentam maiores valores, acima de 250 horas cada (figura 48). Durante os meses de fevereiro, março e abril, há aumento na nebulosidade e, conseqüentemente, diminuição nas horas de insolação.

Figura 47 – Variação da umidade relativa do ar em Fortaleza no mês mais quente e no mais frio.
Fonte: Alucci (2003).

Figura 48 – Distribuição das horas de sol em Fortaleza ao longo do ano.
Fonte: Alucci (2003).

Por situar-se em latitude próxima ao equador ($3^{\circ} 43' 2''$), a distribuição da radiação solar em Fortaleza apresenta incidência considerável em praticamente todas as orientações.

As orientações leste e oeste tem variação similar durante o ano, com quantidade de radiação solar sempre elevadas. Durante os meses mais quentes a orientação sul recebe maior incidência solar (figura 49), ao passo que nos meses mais frios a orientação norte recebe maior quantidade de energia, (figura 50).

Figura 49 – Distribuição da radiação solar por orientação durante o mês mais quente.
Fonte: Alucci (2003).

Figura 50 – Distribuição da radiação solar por orientação durante o mês mais frio.
Fonte: Alucci (2003).

Diante do panorama de crescimento urbano e modificação das condições ambientais, Xavier (1996; 2001) registrou a alteração do clima natural de Fortaleza e verificou a possibilidade de presença de ilhas de calor no tecido urbano da cidade. De acordo com as pesquisas

abordando o período compreendido entre 1974 e 1995, foram observadas variações nos parâmetros climáticos passíveis de influência pelo processo de urbanização, mais especificamente a velocidade do ar, umidade relativa e evaporação. No caso da temperatura, foi detectada uma discreta tendência de aumento nos últimos anos, o que poderia relacionar-se com a ocorrência do fenômeno de ilha de calor. Entretanto, a autora aponta como necessário o estudo de séries mais longas de temperaturas médias, máximas e mínimas para a afirmação incontestável do fato.

Não obstante, experiências diversas e várias medidas de temperatura foram realizadas por Malveira (1998) com indícios para uma resposta afirmativa ao caso da cidade de Fortaleza. Através de trabalhos de campo desenvolvidos na capital cearense e municípios vizinhos foram medidas a temperatura do ar, a velocidade e direção do vento ao longo de transectos e em pontos determinados. Os dados obtidos foram então comparados às normais climatológicas das variáveis analisadas. O estudo concluiu que a variação de tais parâmetros associa-se aos contrastes climáticos que ocorrem na mancha urbana em decorrência da forma de ocupação do solo, com impactos no conforto térmico (MALVEIRA, 2003).

XAVIER (2001) abordou, também, a questão da ventilação urbana, apontando que a literatura especializada é unânime em acusar como causa à diminuição da ventilação superficial o resultado do efeito topoclimático da cidade, razão esta da rugosidade do terreno, especialmente como consequência da verticalização urbana. Especificamente sobre a intensidade do vento em Fortaleza, os estudos realizados pela referida autora demonstram que o seu decréscimo sobre o ambiente urbano, da ordem de 50%, ocorre durante o segundo semestre. Tal fato associa-se ao uso indiscriminado do solo urbano em termos da crescente verticalização, que tem raízes na especulação imobiliária, tanto na orla marítima da cidade como em outros bairros. A massa edificada trabalha no sentido de barrar os ventos, com consequências práticas de caráter bioclimático ao elevar o desconforto térmico.

Tais estudos tomaram como base os dados monitorados pelas estações meteorológicas distribuídas pela cidade de Fortaleza. A tabela 11³⁸ a seguir apresenta as estações presentes no interior da cidade e os parâmetros climáticos coletados.

³⁸ Tabela baseada em dados disponibilizados pelo Portal de Tecnologia da Informação para a meteorologia associado ao INPE e CPTEC, disponível em: <http://bancodedados.cptec.inpe.br/climatologia/Controller>.

Estação	Responsável	Dados disponibilizados
Estação Agroclimatológica da UFC (INEMET-UFC),	UFC	Pressão Barométrica; Temperatura do ar (bulbo seco e bulbo úmido); umidade relativa do ar; velocidade e direção do vento; precipitação; evaporação; insolação; nebulosidade e visibilidade.
Estação da FUNCEME	FUNCEME	Pressão Barométrica; Temperatura do ar; umidade relativa do ar; velocidade e direção do vento; insolação; temperatura, umidade e fluxo de calor no solo.
Estação do Aeroporto Internacional Pinto Martins	INMET	Temperatura, umidade do ar, velocidade e direção do vento
Estação Rádio-Sonda	INMET	Temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação
Parque ecológico do Cocó	FUNCEME	Precipitação
Sapiranga	FUNCEME	Temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação
Mondubim	INMET	Temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação
Messejana	FUNCEME	Temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação
Parangaba	INMET	Temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação
SUDENE 01	SUDENE	Precipitação
SUDENE 02	SUDENE	Precipitação
SUDENE 03	SUDENE	Precipitação
SUDENE 04	SUDENE	Precipitação

Tabela 11 - Estações meteorológicas presentes na cidade de Fortaleza

Fonte: <http://bancodedados.cptec.inpe.br/climatologia/Controller>

Os dados registrados nestas estações podem ser obtidos junto aos órgãos responsáveis ou através de pesquisa na internet.

3.4.1 Regime de ventos

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (ELETROBRÁS, 2001), o Ceará inclui-se na faixa costeira de 100 km de largura que se estende desde o norte do Amapá até o Cabo de São Roque (RN) onde predominam os ventos alísios de leste e brisas terra-mar.

Nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, devido ao menor albedo do solo, as superfícies se aquecem mais durante o dia, aspecto que favorece o sistema terra-brisas. Tal fenômeno é responsável por ventos com médias anuais elevadas, entre 6 m/s e 9 m/s à uma altura de 50m (ELETROBRÁS, 2001).

SEINFRA (2001) descreve ainda que:

“o Estado do Ceará está imerso na contínua circulação atmosférica sub-equatorial dos ventos alísios, intensificados pelas brisas marinhas ao longo de 640 km de seu perímetro litorâneo com o Oceano Atlântico. Superpondo-se a estes fatores, a movimentação da Zona de Convergência Intertropical induz uma pronunciada sazonalidade nos regimes de vento.”

Relativamente aos ventos alísios que incidem sobre o Ceará, SEINFSPACE (2001) acrescenta que estes:

“são provenientes de uma extensa área oceânica livre de obstáculos - o que lhes confere notável intensidade, constância e baixa turbulência. Adicionalmente, os gradientes térmicos terra-oceano induzem brisas marinhas que contribuem para aumentar a sua intensidade.”

Como os ventos alísios carregam umidade e são gradualmente aquecidos, sua convergência em uma região de pressões menores (ZCIT) é caracterizada por forte convecção e chuvas quase contínuas. Essa posição da ZCIT migra em ciclos anuais, coincidindo sobre o território cearense durante os meses de Março a Maio - o que provoca a sua principal e muitas vezes única estação chuvosa, na qual os ventos atingem sua intensidade mínima anual. Nos restantes nove meses do ano a ZCIT retorna às latitudes equatoriais, resultando em predomínio do período seco e na existência de grandes regiões com clima semi-árido no Ceará e região Nordeste do Brasil. É nesse período seco (Julho-Dezembro) que os ventos da região atingem seu máximo, com intensidade e constância notáveis (SEINFSPACE, 2001).

Em Fortaleza, a circulação atmosférica submete-se, conseqüentemente, à ZCIT, além de outros sistemas de menor escala que influenciam a região, tais como o Sistema de Vorticidade Ciclônica, linhas de instabilidade formadas ao longo da costa e as brisas marítimas (SOUZA, 2009).

Os dados climáticos utilizados para avaliar as condições de vento na cidade de Fortaleza foram obtidos através do *website*³⁹ do Department of Energy (DoE) dos Estados Unidos. O órgão disponibiliza os registros temperatura do ar, direção e velocidade do vento coletados pela estação localizada no Aeroporto Internacional Pinto Martins, distante aproximadamente 4,4 quilômetros da área de estudo.

A série de dados analisada corresponde ao período entre 12 de fevereiro de 2002 e 30 de janeiro de 2009, totalizando 61.032 horas. Dentro desse intervalo, foram analisadas 47.114 horas de registros válidos (77% do total de horas do período) para identificar a frequência de ocorrência das velocidades e direções do vento.

Inicialmente, analisou-se a distribuição dos dados disponíveis a cada hora e mês dentro do período estudado para verificar se existia algum padrão na ausência de registros que influenciasse a avaliação.

A seguir, a tabela 12 indica o percentual de dados válidos por hora, apontando a uniformidade das informações registradas.

³⁹ www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weatherdata/weather_request_search.cfm

Hora	Dados disponíveis	Total dados	%	Hora	Dados disponíveis	Total registros	%
01:00	1951	2543	77%	13:00	2023	2543	80%
02:00	1965	2543	77%	14:00	2027	2543	80%
03:00	1966	2543	77%	15:00	2013	2543	79%
04:00	1869	2543	73%	16:00	1938	2543	76%
05:00	1966	2543	77%	17:00	1924	2543	76%
06:00	1970	2543	77%	18:00	1931	2543	76%
07:00	1990	2543	78%	19:00	1946	2543	77%
08:00	2010	2543	79%	20:00	1951	2543	77%
09:00	2016	2543	79%	21:00	1952	2543	77%
10:00	1968	2543	77%	22:00	1907	2543	75%
11:00	2002	2543	79%	23:00	1900	2543	75%
12:00	2020	2543	79%	00:00	1913	2543	75%

Tabela 12 – Distribuição dos dados por hora do dia
Fonte: DoE (organizado pelo autor).

Também foi analisada a distribuição dos dados válidos para cada mês do período entre os anos de 2002 e 2009, indicando uma relativa uniformidade em sua distribuição. A tabela 13, a seguir, apresenta o resultado da estratificação dos dados para cada mês, possibilitando, também, a análise por estações do ano.

Mês	Dados disponíveis	Total dados	%
Janeiro	4087	5086	80%
Fevereiro	3373	5086	66%
Março	4423	5086	87%
Abril	3883	5086	76%
Mai	4002	5086	79%
Junho	3915	5086	77%
Julho	4027	5086	79%
Agosto	3632	5086	71%
Setembro	4000	5086	79%
Outubro	4027	5086	79%
Novembro	3451	5086	68%
Dezembro	4298	5086	85%
TOTAL	47114	61032	77%

Tabela 13 - Distribuição dos dados de vento por mês
Fonte: DoE (organizado pelo autor)

Apresenta-se, na tabela 14 a seguir, a distribuição dos dados de vento entre 2002 e 2009 segundo a direção, observando-se as predominâncias leste e sudeste.

Direção	Ocorrências	Percentual
N	235	0%
NE	818	2%
E	18917	40%
SE	17503	37%
S	8280	18%
SW	757	2%
W	411	1%
NW	193	0%
TOTAL	47114	100%

Tabela 14 – Distribuição das direções entre os anos de 2002 e 2009
Fonte: DoE (organizado pelo autor).

Figura 51 – Gráfico da distribuição da frequência de ocorrência das direções do vento entre 2002 – 2009.
Fonte: DoE (organizado pelo autor)

Após a análise dos registros, os dados disponíveis foram organizados utilizando-se o programa *WRPLOT View 6.5.1*. O *software* é desenvolvido pela *Lakes Environmental* e sua licença é gratuita pelo período de um ano. O aplicativo associa dados de direção e velocidade do vento a intervalos de tempo determinados (horas, dias, meses e anos), possibilitando combinações diversas. Os resultados são plotados em rosas dos ventos com estratificações entre

8 e 36 direções e entre 1 e 9 classes de velocidades e apontando o vetor resultante da direção do vento em graus.

Para determinar os valores de velocidade e direção do vento mais freqüentes entre as 47.114 horas de dados válidos, foram confeccionadas rosas dos ventos e gráficos de freqüência percentual das direções aplicando a estratificação de 8 direções. A distribuição das freqüências de velocidades foi detalhada em 9 classes de velocidades. O resultado das freqüências totais para a Estação do Aeroporto Pinto Martins são apresentados nas figuras 52 e 53 a seguir.

Figura 52 - Rosa dos ventos para Fortaleza durante o período entre 2002 e 2009.

Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

Figura 53 – Distribuição das classes de velocidade para os dados de vento entre 2002 e 2009.

Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

Com base na rosa dos ventos apresentada pela figura 52, observa-se que a primeira predominância do vento é leste. O vento nessa direção representou 18917 ocorrências, correspondendo a 40% do total de registros. A segunda predominância observada é sudeste, com 17503 ocorrências, correspondendo a 37% do total de dados.

Em relação à velocidade do ar para o período estudado, os valores indicados no gráfico (figura 42) apontam que o vento apresenta intensidade moderada, situando-se nos intervalos de 3 a 4 m/s (20,1%), entre 4 e 5 m/s (17,6%) e entre 5 e 6 m/s (17,4%). A velocidade média apontada para o período foi de 4,48 m/s.

Especificamente em relação ao vento na direção leste (primeira predominância) durante o período entre 2002 e 2009, observa-se que os registros indicam maiores intensidades concentradas nos intervalos de 3 a 4 m/s (25%), 4 a 5 m/s (20%) e 5 a 6 m/s (20%). No caso do vento a sudeste, segunda predominância, verifica-se, no entanto, que este apresenta intensidade mais elevada, com maior quantidade de incidências entre 5 e 6 m/s (19%), entre 4 e 5 m/s (18%) e, principalmente, acima dos 8 m/s (11%).

Ainda, como forma de analisar mais detalhadamente as características do vento sobre a cidade, isolou-se os dados disponibilizados por períodos do dia (ciclo de 24 horas), recalculando as freqüências por direções e velocidades. Foram considerados quatro períodos com 6 horas cada: madrugada (00h – 05h), manhã (06h – 11h), tarde (12h – 17h) e noite (18h – 23h). A distribuição dos registros deu-se de maneira uniforme, cada período correspondendo a 25% do total de dados, com 11630 horas para o período da madrugada, 11956 horas para o ciclo da manhã, 11945 dados alocados na parte da tarde e 11583 informações referentes ao período da noite (tabela 15).

	Madrugada	Manhã	Tarde	Noite	TOTAL
Horas estudadas	11630	11956	11945	11583	47114
Velocidade média	3,68	3,81	5,81	4,62	4,48
Percentual	25%	25%	25%	25%	

Tabela 15 – Distribuição dos dados de vento entre 2002 e 2009 por período do dia
Fonte: DoE (Organizado pelo autor).

O detalhamento do comportamento do vento permite inferir que durante a madrugada (figura 54) predominam as direções leste e sudeste, com intensidades mais baixas, no entanto, variando entre 3 e 4 m/s (24,6%), 2 e 3 m/s (21,7%) e 4 e 5 m/s (19,6%). A velocidade média para o período é de 3,68 m/s.

Figura 54 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para o período da madrugada
Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

Durante o período da manhã (figura 55) ocorre uma variação na predominância do vento, destacando-se o sentido sul, acompanhado, pela direção sudeste. A direção leste passa a uma condição secundária, com intensidades mais baixas. As velocidades no período da manhã são discretamente mais elevadas, mantendo, no entanto, as características da madrugada, concentrando-se, também, entre os intervalos de 3 a 4 m/s (25,7%), 2 a 3 m/s (21,4%) e 4 a 5 m/s (19,2%). A velocidade média passa para 3,81 m/s.

Figura 55 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para o período da manhã
Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

No período da tarde (figura 56) o sentido do vento é claramente sudeste, com velocidades mais elevadas, destacando-se as situadas acima de 8 m/s (16,3%), entre 5 e 6 m/s (19%) e 6 e 7 m/s (17,6%). A segunda predominância dá-se no sentido leste, também apresentando maiores velocidades. A velocidade média é de 5,81 m/s.

Figura 56 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para o período da tarde

Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

Durante a noite, à semelhança do período da manhã, o sentido leste apresenta uma evidente predominância. As velocidades, entretanto, apresentam valores mais elevados, situando-se, em sua maioria, entre 5 e 6 m/s (21,1%), 4 e 5 m/s (19,9%) e 3 e 4 m/s (19%), como observa-se na figura 57. Também são verificados registros consideráveis entre 7 e 8 m/s (7,2%) e acima dos 8 m/s (3,5%), indicando o acréscimo na intensidade do movimento do ar neste período. A velocidade média é de 4,60 m/s

Figura 57 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para o período da noite

Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

É importante observar uma tendência na distribuição das velocidades em classes mais elevadas durante os períodos da tarde e noite. Tal aspecto permite inferir acerca da existência de uma relação entre o aumento na temperatura e o acréscimo na intensidade do vento, uma vez que nestes horários são verificadas as temperaturas mais elevadas do ciclo diário.

Analisando o comportamento do vento ao longo das horas do dia no período compreendido pelos anos de 2002 a 2009, é possível observar que os valores de velocidade média do ar mais elevados situam-se entre o final da manhã e início da noite, com picos às 15:00, como é apresentado pelas tabelas 16 e figura 58. Tal aspecto indica, ainda, que é justamente nos momentos em que a temperatura está mais elevada que ocorre um aumento na intensidade do vento, tornando possível a aplicação do incremento no movimento do ar como estratégia para amenizar condições desfavoráveis ao conforto térmico em localidades de clima quente e úmido, o caso de Fortaleza.

HORA	HORAS DISPONÍVEIS	TOTAL HORAS	%	VELOCIDADE MÉDIA
01:00	1951	2543	77%	3,65
02:00	1965	2543	77%	3,71
03:00	1966	2543	78%	3,74
04:00	1869	2543	74%	3,68
05:00	1966	2543	77%	3,66
06:00	1970	2543	78%	3,72
07:00	1990	2543	78%	3,60
08:00	2006	2543	79%	3,56
09:00	2018	2543	79%	3,59
10:00	1969	2543	77%	3,79
11:00	2003	2543	79%	4,58
12:00	2022	2543	80%	5,18
13:00	2026	2543	80%	5,68
14:00	2033	2543	80%	5,95
15:00	2016	2543	79%	6,07
16:00	1940	2543	76%	6,05
17:00	1925	2543	76%	5,96
18:00	1936	2543	76%	5,79
19:00	1953	2543	77%	5,36
20:00	1955	2543	77%	4,88
21:00	1952	2543	77%	4,13
22:00	1911	2543	75%	3,75
23:00	1899	2543	75%	3,67
00:00	1915	2543	75%	3,62

Tabela 16– Distribuição dos dados de velocidade do ar entre 2002 e 2009 ao longo do dia
Fonte: DoE (Organizado pelo autor).

Figura 58 – Verificação do comportamento da velocidade média do ar ao longo do dia
Fonte: DoE (Organizado pelo autor).

Buscando evidenciar a relação entre a variação na temperatura ao longo do dia e possíveis mudanças na direção e intensidade do vento, fez-se necessário complementar a avaliação por períodos com a análise do comportamento do vento utilizando como critério a temperatura média dos dados disponibilizados, estabelecida em 27,34 °C.

Os dados de vento associados à temperatura do ar até 27 °C totalizam 27769 horas, correspondendo a 59% dos registros. A velocidade média calculada é de 4,11 m/s. Neste intervalo de dados, a direção predominante é leste (36%), com intensidade moderada, acompanhada pela presença de ventos sudeste (32%) mais intensos, como é possível apreender da rosa de ventos (figura 59). Há, ainda, a presença considerável de registros de ventos com direção sul (22%).

Analisando a distribuição por classes de velocidade, também na figura 59, verifica-se o predomínio de ventos de 3 a 4 m/s (23,6%), de 2 a 3 m/s (20,5%) e 4 a 5 (18,5%). Os ventos no sentido sudeste apresentam intensidade discretamente mais elevada em comparação aos ventos de leste, com maior quantidade de registros de velocidades acima dos 5 m/s.

Figura 59 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para temperaturas até 27 °C

Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

Os dados de vento associados às temperaturas acima de 27 °C, por sua vez, totalizam 19337 horas, o que corresponde a 41% do total de dados disponíveis. A velocidade média registrada, da ordem de 5,61 m/s, é significativamente superior àquela calculada para temperaturas até 27 °C.

A distribuição por frequência é semelhante à apontada para temperatura até 27 °C, com ventos predominantes de origem leste (44%) acompanhados de perto pela segunda predominância sudeste (40%), como se observa na rosa dos ventos (figura 60). Os ventos sul, por sua vez, apresentam menor incidência, com apenas 10% dos registros.

A intensidade dos ventos é claramente afetada pela temperatura, aspecto que se conclui da observação da distribuição por classes de velocidade, também na figura 60, onde se verifica que há uma maior frequência de ocorrência de ventos entre 5 e 6 m/s (20,1%), entre 6 e 7 m/s (15,9%) e entre 4 e 5 m/s (14,8%). Destaca-se, ainda, a presença considerável de ventos acima dos 8 m/s (13,2%).

Ressalta-se, aqui, a direção sudeste, onde predominam velocidades superiores a 5 m/s, com 7% entre 5 e 6 m/s, 7% entre 6 e 7 m/s, 7% entre 7 e 8 m/s e 8% acima de 8 m/s, ao passo que o vento leste apresenta o domínio de ventos de 5 a 6 m/s (10%), de 3 a 4 m/s (8%) e de 4 a 5 m/s (8%) e pouco mais de 2% de registros acima de 8 m/s.

Figura 60 – Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para temperaturas acima de 27 °C
Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

Finalmente, cabe avaliar o comportamento do vento em Fortaleza em cada semestre, determinando as variações na direção e intensidade do vento nestes dois períodos com características climáticas distintas. As diferenças nas no âmbito do clima entre essas duas épocas do ano ocorrem em função do volume de precipitações, da umidade do ar e da nebulosidade mais elevados durante os primeiros meses, contrastando com o aumento da taxa de evaporação e maiores horas de insolação a partir do segundo semestre. Tais aspectos foram apresentados na caracterização climática do município e reforçados pelos estudos de Xavier (2001).

O reflexo na velocidade média do ar ao longo do ano pode ser percebido na figura 61, indicando a alternância entre períodos de baixa velocidade média do ar desde o início até meados do ano, sobretudo em março e abril, situando-se abaixo de 3,50 m/s, e uma sensível aceleração entre os meses de agosto a novembro, acima de 5,50 m/s.

Figura 61 – Variação da velocidade média do ar ao longo do ano
Fonte: DoE (organizado pelo autor).

Separando-se os dados disponíveis para os seis primeiros meses, totalizando 23683 informações (50,2% dos registros), o quadro caracteriza-se pela maior frequência de ventos de origem leste, com 38% das ocorrências, representando a primeira predominância, e a origem sudeste aparecendo em seguida, com 29% das ocorrências, como é possível perceber na tabela 17 e figura 62.

A velocidade média para a direção leste durante o primeiro semestre é de 3,85 m/s, enquanto que o vento sudeste, de maior intensidade, possui velocidade média de 4,85 m/s.

Direção	Ocorrências	Percentual
N	226	1%
NE	723	3%
E	8946	38%
SE	6978	29%
S	5512	23%
SW	701	3%
W	405	2%
NW	192	1%
TOTAL	23683	100%

Tabela 17 – Distribuição da frequência de distribuição do vento durante o primeiro semestre
Fonte: DoE (organizado pelo autor).

Figura 62 – Distribuição das direções de incidência do vento durante o primeiro semestre
Fonte: DoE (organizado pelo autor).

Figura 63 - Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para temperaturas acima de 27 °C
Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

A rosa dos ventos para o primeiro semestre, apresentada na figura 63, evidencia a maior frequência de ocorrência de ventos de origem leste. As velocidades são distribuídas, em sua maioria, entre 3,0 e 4,0 m/s e 2,0 e 3,0 m/s, com 23,7% e 23,1%, respectivamente. Ainda registra-se uma ocorrência de ventos do quadrante sul.

Para a segunda metade do ano, compreendendo os meses de julho a dezembro (23431 horas de registros), ocorre uma inversão no quadro apresentado durante o início do ano, com uma predominância de ventos de origem sudeste (45% das informações), acompanhado de perto pela frequência leste, com 43% dos dados, desprezando-se as demais incidências, como é possível observar na tabela 18 e figura 64.

Direção	Ocorrências	Percentual
N	9	0%
NE	95	0%
E	9971	43%
SE	10525	45%
S	2768	12%
SW	56	0%
W	6	0%
NW	1	0%
TOTAL	23431	100%

Tabela 18 - Distribuição da frequência de distribuição do vento durante o primeiro semestre
Fonte: DoE (organizado pelo autor).

Figura 64 – Distribuição das direções de incidência do vento durante o segundo semestre
Fonte: DoE (organizado pelo autor).

Contrastando com o primeiro semestre, durante a segunda metade do ano as velocidades do ar são mais elevadas, sobretudo nos ventos incidentes de sudeste, como é possível perceber na rosa dos ventos e gráfico de distribuição das classes de velocidades do ar para o período (figura 65).

A distribuição das velocidades em classes revela que prevalecem valores entre 5,0 e 6,0 m/s, seguidos de registros entre 4,0 e 5,0 m/s, com 21% e 19,5%, respectivamente. Ainda, ressalta-se a presença significativa de velocidades do ar acima de 8,0 m/s durante o período.

Figura 65 - Rosa dos ventos e distribuição das velocidades do ar para temperaturas acima de 27 °C
Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

Observa-se, portanto, que, à semelhança do que ocorre durante o ano, nos dois semestres prevalecem os ventos de origem leste-sudeste, somente alterando-se entre a primeira e segunda predominância nesses dois momentos. O vento com origem nessas duas direções chega a somar mais de 80% dos registros durante o segundo semestre, o que atesta o seu predomínio sobre as demais orientações.

A velocidade do ar, entretanto, sofre significativa alteração comparando-se esses dois períodos do ano. Durante a estação chuvosa, concentrada entre os meses de março, abril e maio, são verificados valores de velocidade do ar mais baixos. Nos meses que antecedem às maiores médias de temperatura e índices de umidade relativa do ar mais baixos, por sua vez, são observadas as maiores intensidades do vento.

3.5 Medições *in loco*

As informações meteorológicas, sobretudo os dados de vento, precisam ser comparadas aos valores registrados na área de estudo como forma de analisar, com precisão, o comportamento dos parâmetros climáticos sobre o ambiente urbano.

Analogamente à metodologia aplicada por Silva (1999); Prata (2005); Leite (2008), foram realizadas medições no setor objeto de estudo. O objetivo é verificar se existem distorções ou divergências significativas entre os dois locais, permitindo utilizar a série de dados da estação do aeroporto na determinação das frequências de ocorrência de velocidade e direção do vento caso haja compatibilidade entre os dados medidos nos dois locais.

Uma vez que a pesquisa trata da ventilação em meio urbano e sua perturbação pelo ambiente construído no nível topoclimático, as medições foram feitas a 10 m de altura, condição de coleta de dados semelhante à verificada na estação meteorológica do Aeroporto Pinto Martins.

3.5.1 Medição dos dados de vento

O registro da frequência, velocidade e direção de vento é feito por anemômetros instalados em estações meteorológicas, geralmente a dez metros do solo e dispostas em áreas abertas, desobstruídas de elementos construídos em suas imediações ou grandes acidentes topográficos naturais.

Existem diversos tipos de anemômetros disponíveis para o monitoramento das características do vento. Atualmente, os anemômetros ultra-sônicos são os mais sofisticados para o registro de sua direção e velocidade. O seu funcionamento dá-se a partir de um sinal de ultra-som emitido por uma das hastes e captado pela haste oposta. A partir do conhecimento da

velocidade do som no ar, são apontados os atrasos ou antecipações no recebimento do sinal devido o vento contra ou a favor do sentido de propagação da onda sonora (CÓSTOLA, 2006).

Cóstola (2006) acrescenta que os anemômetros ultra-sônicos possibilitam medições com menor incidência de erros. Entretanto, estes equipamentos apresentam custo elevado. Portanto, os anemômetros de copo são os mais utilizados em estações meteorológicas.

A IEA (1999) destaca a utilização dos anemômetros de copo (figura 66), também conhecidos como anemômetros de conchas, devido a sua adequabilidade, resistência e baixos custos. O aparelho consiste em um pequeno rotor eólico cujo eixo de giro dá-se na vertical. A este eixo são conectados braços que sustentam conchas hemisféricas ou cônicas que, impulsionadas pelo vento, giram. Este movimento rotacional determina uma tensão proporcional à rotação via tacômetro ou é possível contabilizar os impulsos gerados em um intervalo de tempo.

Figura 66 - Anemômetro de concha

Fonte: <http://www.onsetcomp.com/products/sensors/s-wca-m003>.

As medições de campo realizadas nesta pesquisa utilizaram anemômetro de concha que apresenta sua calibração verificada e registrada quando da aquisição do conjunto da estação climatológica a que pertence.

Para Bittencourt e Cândido (2005), a combinação entre as informações sobre a frequência, direção e velocidade do vento é fundamental para a identificação de suas características para aplicação eficiente no projeto arquitetônico.

3.5.2 Preparação para as medições

Os equipamentos utilizados para coleta dos dados foram os seguintes:

- Máquina fotográfica digital da marca SONY, modelo SONY DSC H9 (figura 67);
- Estação Meteorológica da marca HOBO, modelo H21-001⁴⁰, já utilizada em pesquisas anteriores (LEITE, 2008) (figura 68);
- GPS da marca GARMIN, modelo GPS 72 para determinação da posição da estação (figura 69);
- Bússola da marca Silva (figura 69).

Figura 68 – Estação HOBO H21-001
Fonte: Leite (2008).

Figura 67 – Máquina Fotográfica digital
Fonte: Arquivo do autor

Figura 69 - Bússola e GPS
Fonte: Arquivo do autor

Inicialmente, procurou-se um terreno de grandes dimensões em meio à área de estudo e que fosse desprovido de obstáculos construídos para instalação da estação meteorológica. Após visitas para reconhecimento do local, foi realizado um levantamento fotográfico dos sítios em que seria possível a sua disposição. Optou-se por um poste de concreto de 10 m de altura com o objetivo de garantir a estabilidade do conjunto.

⁴⁰ A estação meteorológica HOBO H21-001, de propriedade do Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental – LERCA, do IFCE, foi obtida com apoio financeiro da FUNCAP e CNPq por meio do projeto PPP - n° 9792/06.

Levando em consideração a segurança dos equipamentos e as características do terreno (ausência de edificações e árvores de grande porte e topografia relativamente plana), decidiu-se pelo assentamento do poste em um terreno murado de propriedade particular em formato irregular, com 11.700 m² de área, aproximadamente (figura 70).

O terreno usado para medições de campo apresenta, em suas laterais e a barlavento, somente um conjunto de árvores de médio e pequeno porte e, a sotavento, uma edificação residencial de dois pavimentos. A distância em linha reta entre a estação meteorológica situada no Aeroporto Pinto Martins, utilizada como base de dados, e o terreno escolhido para as medições é de 4.400 m, aproximadamente (figura 71).

Figura 70 – Vista superior e demarcação do terreno.
Fonte: Adaptado de Google Earth.

Figura 71 – Distância entre terreno utilizado e o Aeroporto Pinto Martins.
Fonte: Adaptado de Google Earth.

Realizado o contato com o proprietário e, após o seu consentimento, seguiu-se à montagem da estrutura de suporte da estação meteorológica e sua acoplagem ao poste de concreto (figura 72). Como forma de compensar o formato cilíndrico do poste e manter a estação alinhada em seu eixo vertical, foram utilizados anéis de ferro de diâmetros diferentes, responsáveis pela fixação e estabilidade do conjunto (figura 73).

Figura 72 – Montagem da estação no poste
Fonte: Arquivo do autor.

Figura 73 – Anéis de ferro para alinhamento vertical da estação
Fonte: Arquivo do autor.

Conectado ao poste, o conjunto foi erguido por caminhão tipo *munck* (figura 74) e fixado na porção central do terreno, após a demarcação de um raio de pelo menos 60 metros livre de obstáculos (figura 75). Além deste limite encontram-se os muros de 2 m de altura que definem o terreno e um conjunto de árvores de médio porte.

Figura 74 – Caminhão tipo *munck* erguendo o poste e estação.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 75 - Instalação da estação em ponto central do terreno.

Fonte: Arquivo do autor.

Após a fixação do poste na posição (figura 76), as coordenadas de referência da estação instalada foram, então, registradas pelo GPS a fim de determinar a sua localização: $3^{\circ}48'18''$ S e $38^{\circ}29'43''$ W e elevação de 36 m. Posteriormente, subiu-se até a estação para ajustagem dos sensores de velocidade e direção do vento em relação ao norte verdadeiro com o auxílio do GPS (figura 77). A marcação indicativa presente no conjunto da estação necessita estar alinhada ao norte verdadeiro para a correta medição dos ângulos de direção do vento.

Figura 76 – Estação fixada.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 77 – Ajustagem dos sensores.

Fonte: Arquivo do autor.

Finalmente, deu-se início a coleta de dados meteorológicos no local com o auxílio do *software BoxCar 4.3* para ambiente *Windows*, programando o tempo de início e a taxa de amostragem das medições.

O monitoramento dos parâmetros climáticos foi realizado automaticamente pela Estação Meteorológica HOBO H21-001⁴¹.

O sistema HOBO *Weather Station* permite utilizar 15 sensores simultaneamente. A estação utilizou os seguintes equipamentos para coleta de dados, conforme tabela 19⁴² a seguir.

Ressalta-se, ainda, que a estação meteorológica HOBO H21-001 foi implantada na área de estudo especificamente para a realização da investigação, registrando dados de radiação solar, pressão barométrica, temperatura, umidade relativa, direção e velocidade do ar a 10 m do solo durante o período de 16 de janeiro a 20 de fevereiro de 2009.

⁴¹ A Estação Meteorológica HOBO H21-001 recebeu da *American Society of Agricultural Engineers Resource Magazine* o prêmio AE50 de inovação. Os sensores escolhidos são reconhecidos automaticamente através de conectores ao serem plugados, descartando a necessidade de programação, calibração ou novas fiações.

⁴² Tabela confeccionada com base em dados disponibilizados pelo fabricante da estação. Disponível em: www.onsetcomp.com.

Equipamento	Imagem	Especificações
HOBO Weather Station		<p>Funcionamento entre -40 e $+75$ °C, com baterias de lítio.</p> <p>Capacidade de memória de 512 K (512.000 medidas) e intervalos de registro programável entre 1 segundo e 9 horas.</p>
Termo-higrômetro		<p>Registra a temperatura do ar entre -40 e $+75$ °C com resolução de $0,02$ °C e intervalo de umidade relativa de 0 a 100%, com precisão de $0,1\%$. O sensor de temperatura e umidade relativa do ar foi fixado no interior do protetor tipo <i>shield</i>, confeccionado em PVC, também da marca HOBO, de forma a não receber incidência solar direta.</p>
Sensor de pressão barométrica.		<p>Coleta valores de pressão barométrica entre 660 mBar e 1070 mBar com precisão de $1,5$ mBar, aproximadamente.</p>
Pirômetro de silicone		<p>Monitora a radiação solar entre 0 a 1280 W/m² e gama espectral de 300 a 1100 nm, com exatidão de cerca de 10 W/m².</p>
Anemômetro de copo		<p>Mede o deslocamento do ar no intervalo de 0 a 44 m/s e sua direção entre 0 e 358°, com resolução de $0,19$ m/s e $1,4^\circ$, respectivamente.</p> <p>As revoluções do anemômetro de copo são acumuladas a cada três segundos. A velocidade do ar é a média registrada nesse intervalo.</p> <p>A direção do vento é à média calculada segundo a soma das componentes vetoriais coletadas no intervalo de três segundos.</p>

Tabela 19 - Apresentação sensores utilizados pela estação HOBO H21-001 para coleta dos dados *in loco*

Fonte: www.onsetcomp.com.

3.5.3 Resultados das medições *in loco*

As medições *in loco* foram realizadas entre os dias 16 de janeiro e 20 de fevereiro de 2009, totalizando 838 horas de dados válidos.

As condições climáticas⁴³ durante o período de medições na área de estudo mantiveram-se dentro da normalidade para esta época do ano, destacando-se a presença de Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) em parte do nordeste e um cavado são norte da região, aumentando a nebulosidade e a ocorrência de chuvas.

O volume de dados medidos a cada 5 segundos pela Estação HOBO H21-001, instalada na área de estudo, durante esses 36 dias totalizou 601913 registros válidos. A seguir, são apresentados os resultados totais da medição para direção do vento e velocidade do ar nas tabelas 20 e 21 e o gráfico apresentado pela figura 78.

DIREÇÃO	QUANTIDADE	FREQUÊNCIA
N	20529	3%
NE	88522	15%
E	235571	39%
SE	150267	25%
S	69208	11%
SW	19070	3%
W	11368	2%
NW	7377	1%
TOTAL	601912	100%

Tabela 20 - Distribuição da frequência de direções do vento durante as medições *in loco*
Fonte: Organizado pelo autor.

INTERVALOS DE VELOCIDADES	QUANTIDADE	FREQUÊNCIA
entre 0 e 1 m/s	142375	24%
entre 1 e 2 m/s	172845	29%
entre 2 e 3 m/s	151668	25%
entre 3 e 4 m/s	73624	12%
entre 4 e 5 m/s	37680	6%
acima de 5	23721	4%
TOTAL	601913	100%

Tabela 21 - Distribuição da frequência de velocidades do ar durante as medições *in loco*
Fonte: Organizado pelo autor.

Figura 78 – Distribuição da frequência de direções do vento durante as medições *in loco*
Fonte: DoE (organizado pelo autor).

⁴³ Para a descrição detalhada das condições climáticas durante o período ver o apêndice 1

No entanto, como o objetivo do monitoramento era a comparação dos dados medidos no local com os registros da estação do Aeroporto Pinto Martins, posteriormente foram analisadas apenas as informações coletadas entre os dias 16 e 30 de janeiro de 2009, isolando os dados do período em que as duas estações estiveram funcionando simultaneamente. Os dados válidos registrados por cada uma das estações meteorológicas para este período totalizam 342 horas.

Os parâmetros climáticos coletados pela estação HOBO H21-001 foram transferidos automaticamente e armazenados no *datalogger* do conjunto durante o período. Em seguida, para os valores de direção e velocidade do vento foram calculadas médias aritméticas para cada hora de monitoramento.

Em relação à temperatura, ao longo dos quinze dias monitorados foram verificadas pequenas diferenças entre as estações do Aeroporto e a situada no local de estudo, da ordem de 0,6 a 1 grau, em sua maioria. No aspecto geral, a variação de temperatura ao longo do dia ocorre de maneira semelhante. Na área de estudo, no entanto, verifica-se um aquecimento mais rápido em comparação à estação do Aeroporto, aspecto evidenciado pelo atraso na curva de temperaturas desta estação (figura 79).

Figura 79 – Comparação da temperatura do ar registrada pela Estação HOBO H21-001 e Aeroporto durante o período de medições

Fonte: Organizado pelo autor

Por outro lado, a estação do Aeroporto registrou amplitudes térmicas mais acentuadas em relação à estação HOBO H21-001, com temperaturas mais elevadas nos horários de pico, por volta das 15:00 e 16:00 hs, e temperaturas mais baixas no início de cada manhã, mormente às 5:00 hs. A estação situada na área de estudo, por sua vez, apontou diferenças menores entre as temperaturas máximas e mínimas ao longo de cada dia.

As características naturais da área de estudo influenciaram o comportamento do vento. Uma vez que a velocidade do ar é função da rugosidade do meio, a presença de expressiva massa vegetada a barlavento do terreno utilizado como base às medições reduziu a intensidade do vento sobre o setor (figura 80).

Figura 80 – Visualização das características naturais do terreno usado para as medições

Fonte: Arquivo do autor.

O resultado são diferenças significativas entre os valores de velocidade do ar registrados pela estação do Aeroporto e a área de estudo, como é possível verificar no gráfico a seguir (figura 81).

Figura 81 – Comparação da velocidade do ar registrada pela Estação HOBO H21-001 durante o período de medições

Fonte: Organizado pelo autor.

A velocidade do ar na estação do aeroporto esteve superior à apontada pela estação HOBO H21-001 em 82% das horas monitoradas. Comparando os dados de vento registrados pelas duas estações o longo dos dias avaliados, observam-se diferenças de intensidade superiores a 2 m/s em 31% dos registros. Valores de velocidade do ar com diferenças menores, entre 0 e 1 m/s e de 1 a 2 m/s correspondem a 24% e 27% dos dados, respectivamente.

Entretanto, é possível notar que o comportamento do vento incidente registrado pelas curvas para cada estação apresenta semelhanças: nos períodos de pico, em que foram registradas as velocidades mais altas das rajadas de vento, foram percebidos simultaneamente. Em sua maioria, os períodos de calmaria, comprovados pelas depressões nas curvas, também foram observados de maneira análoga nas duas áreas da cidade.

Examinando a distribuição por classes de velocidades, constata-se que prevaleceram ventos entre 2 e 3 m/s na estações de coleta de dados na área de estudo. No entanto, a ausência de ventos acima dos 5 m/s na área de estudo (figura 82) evidencia a influência das características naturais do setor, ao passo que 21,1% dos dados de vento do aeroporto tiveram velocidades acima dos 5 m/s (figura 83). Ainda, a presença significativa de ventos de baixa intensidade na área de estudo (entre 0 e 1 m/s), reforça a diferença observada entre as informações apresentadas pela estação HOB0 H21-001 e a situada no aeroporto.

Figura 82 – Distribuição das classes de velocidade do ar medidos na área de estudo).

Fonte: Arquivo do autor (Organizado em WRPlot View).

Figura 83 – Distribuição das classes de velocidade do ar medidos no Aeroporto.

Fonte: DoE (Organizado pelo autor em WRPlot View).

Analisando as rosas de vento confeccionadas para cada estação, constata-se em ambas a predominância de ventos de leste. Para a estação HOB0 H21-001, localizada na área de estudo, os ventos neste sentido foram acompanhados por registros nas direções nordeste e sudeste como segunda e terceira incidências predominantes, respectivamente (figura 84). A rosa dos ventos para a estação do Aeroporto Pinto Martins (figura 85) apontou a predominância sudeste como incidência secundária, o que indica uma variação em relação aos dados coletados *in loco*. O vetor resultante da direção do vento, entretanto, é bastante aproximado, calculado em 100 graus em relação ao norte para os dados colhidos na área de estudo e 101 graus para as medidas do Aeroporto.

Figura 84– Rosa dos ventos para os dados coletados na área de estudo
Fonte: Arquivo de dados da pesquisa.

Figura 85– Rosa dos ventos para os dados coletados no aeroporto
Fonte: Arquivo de dados da pesquisa.

Tomando como base a tabela 22 sobre a distribuição dos dados de direção de vento mais freqüentes durante o período do monitoramento, observa-se que das 342 horas de registros válidos coletados pela estação localizada na área de estudo, o vento no sentido leste corresponde a 42% das ocorrências, seguido pelos sentidos nordeste (18%) e sudeste (15%). A estação do Aeroporto, por sua vez, indicou que durante 50% das horas da investigação os ventos também estiveram soprando de leste, acompanhados pelas incidências sudeste (17%) e nordeste (11%).

	Estação HOB0 H21-001		Estação Aeroporto	
Direção	Ocorrências	Percentual	Ocorrências	Percentual
N	8	2%	15	4%
NE	63	18%	37	11%
E	142	42%	171	50%
SE	53	15%	57	17%
S	42	12%	37	11%
SW	15	4%	9	3%
W	43	4%	14	4%
NW	6	2%	2	1%
TOTAL	342	100%	342	100%

Tabela 22 - Comparação da distribuição das freqüências de direção do vento entre a área de estudo e Aeroporto
Fonte: Arquivo de dados da pesquisa.

Figura 86 – Comparação entre a distribuição das direções do vento *in loco* e na estação do aeroporto.
Fonte: DoE (Organizado pelo autor).

Da análise comparativa dos dados coletados simultaneamente *in loco* e os registrados pela estação do Aeroporto Pinto Martins sob condições ambientais semelhantes, evidencia-se a proximidade dos resultados, sobretudo em relação à primeira direção predominante e comportamento análogo quanto à temperatura do ar, momentos de calmaria e ventos intensos. Conclusivamente, demonstrou-se a validade em se utilizar os parâmetros climáticos registrados pelo aeroporto em sua série de dados mais longa (2002-2009) nas simulações computacionais do comportamento do vento sobre a área de estudo.

3.6 Conclusões acerca do comportamento do vento em Fortaleza

A análise do comportamento do vento em Fortaleza durante o período entre 2002 e 2009 permite inferir acerca da predominância de ventos de orientação leste e sudeste. As duas incidências prevalecem sobre as demais em expressiva frequência de ocorrência, fato atestado pelos números: somam 77% do total de registros para o período. Tal aspecto permite adotar essas duas direções como base para realizar as simulações do vento sobre os cenários de ocupação do solo na área de estudo, desprezando a necessidade de simular outras orientações de entrada dos ventos.

A compatibilidade entre as medições dos dados de vento realizadas simultaneamente na estação do Aeroporto e na área de estudo durante os meses de janeiro e fevereiro de 2009 ainda reforçam o predomínio das duas principais orientações (leste e sudeste).

Analisando-se o comportamento do vento em Fortaleza durante o ano, é notável a sua alteração em relação aos dois semestres. Durante o início do ano, época de concentração da estação chuvosa, com índices de nebulosidade e umidade relativa do ar mais elevados, há uma sensível diminuição na intensidade do vento. Com a elevação da temperatura a partir do meio do ano, o comportamento do vento assemelha-se à condição de ventos quando a temperatura situa-se acima dos 27 °C, com a presença marcante de ventos de sudeste mais fortes, registrando, inclusive, uma expressiva quantidade de picos de velocidade acima dos 8,0 m/s.

Portanto, devido à significativa variação observada na intensidade do ar entre os dois semestres, com aumentos da ordem de 26% entre esses dois momentos, optou-se por simular as condições de ventilação natural em Fortaleza segundo as velocidades médias calculadas isolando-se as direções leste e sudeste em cada um desses períodos, conforme a tabela 23 a seguir.

VELOCIDADE MÉDIA DO AR (m/s)		
ORIENTAÇÃO	1 SEMESTRE	2 SEMESTRE
LESTE	3,85	4,85
SUDESTE	4,51	5,75

Tabela 23 – Velocidades médias do ar em Fortaleza para as orientações leste e sudeste durante os dois semestres.
Fonte: DoE (Organizado pelo autor).

Portanto, para simular as condições de ventilação natural em cada cenário de ocupação do solo desenvolvido serão adotadas as orientações leste e sudeste e as velocidades médias correspondentes para cada orientação do vento em cada um dos semestres. Como resultado serão calculadas quatro condições para cada cenário, a saber:

- Orientação leste durante o primeiro semestre – velocidade média do ar: 3,85 m/s;
- Orientação sudeste durante o primeiro semestre – velocidade média do ar: 4,85 m/s;
- Orientação leste durante o segundo semestre – velocidade média do ar: 4,51 m/s;
- Orientação sudeste durante o segundo semestre – velocidade média do ar: 5,75 m/s;

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para análise do comportamento do vento em cada modelo de ocupação do solo foram definidos planos no interior do domínio para visualização dos resultados.

Inicialmente foram gerados planos horizontais em diferentes alturas. O primeiro plano (PH1) está a 1,5 m do solo, correspondendo à altura do pedestre. O segundo plano (PH2) está a 10 m, altura em que foram coletados os dados de vento pela estação do aeroporto Pinto Martins. O terceiro plano (PH3) localiza-se a 36 m do solo, metade da altura máxima permitida pela legislação às edificações na área de estudo.

Também foram propostos alguns planos verticais para verificar as alterações no perfil de velocidades. Com esses procurou-se analisar o comprometimento das condições de ventilação no âmbito local e, também, em numa escala maior a partir da observação das dimensões do vórtice formado na região posterior ao conjunto edificado.

A avaliação dos perfis de velocidades foi complementada com a inserção de alguns pontos de verificação e comparação em cada um dos cenários. Estes foram posicionados em linha reta e paralelos ao sentido do vento, localizados em trechos com características de ocupação distintas.

Os resultados são visualizados através de vetores e linhas de contorno. Por meio dos vetores é possível avaliar a direção dos fluxos gerados a sua variação da intensidade. As linhas de contorno permitem caracterizar os intervalos de velocidades verificados em determinados trechos em cada modelo. Ainda foram utilizadas outras ferramentas como as *streamlines*, permitindo a avaliação tridimensional da alteração no escoamento do ar sobre os cenários.

A avaliação do comportamento do vento é feita analisando os impactos das formas de ocupação em cada cenário nos planos horizontais a 1,5 m, 10 m e 36 m do solo, recorrendo ao detalhamento de determinados trechos quando necessário. Inicialmente são examinadas as simulações com orientação a leste e, em seguida, o conjunto de simulações com vento a sudeste. Essas análises são complementadas com gráficos, quantificando as acelerações ou diminuição na intensidade dos fluxos, elevação do gradiente de ventilação e da camada limite e o aumento ou amenização das dimensões vórtices entre outros aspectos.

A situação atual, apresentada pela figura 87, corresponde a uma ocupação de 14,11% da área de estudo (134.031,81 m²).

Figura 87 – Projeção horizontal da área ocupada pelo cenário da situação atual.

Após a alteração de alguns parâmetros e a inserção de prismas para refinar a malha do modelo, a simulação da situação atual com vento a leste apresentou resultados satisfatórios, com as equações de massa e de momento estabilizando-se com RMS (*Residual Mean Square*) inferior a 1×10^{-4} após cerca de 70 interações (figura 88).

Figura 88 – Convergência da simulação da situação atual orientação leste.

O cenário de máxima ocupação proposto, por sua vez, corresponde à ocupação de 13,38% do solo da área de estudo (127.023,08 m²). O valor é ligeiramente menor se comparado à situação atual. No entanto, a densidade de ocupação é expressivamente maior, fato que se deve à intensa verticalização do trecho.

Analisando a planta de ocupação (figura 89) observa-se a presença de inúmeros edifícios mais espaçados entre si devido à aplicação dos parâmetros urbanísticos definidos pela legislação.

Figura 89 – Projeção horizontal da área ocupada pelo cenário da máxima ocupação.

Devido a presença de grandes superfícies e, após a realização de testes com os parâmetros de criação da malha, as simulações da ocupação máxima permitida pela legislação urbana foram calculadas com o tamanho mínimo do elemento fixado em 4. Com a aplicação de tais parâmetros, as equações para massa e momento atingiram níveis satisfatórios, convergindo após 140 iterações.

Figura 90 – Definição dos parâmetros aplicados à simulação da ocupação máxima orientação leste e a convergência resultante.

Na proposta de um cenário de ocupação intermediária ocorre um discreto aumento na ocupação do solo da área de estudo em relação ao modelo de ocupação máxima permitida, correspondendo a 13,58% (128.982,59 m²). O aumento de cerca de 2.000 m² em relação à ocupação máxima deve-se a aplicação de um índice de aproveitamento menor (1,5) e uma redução do gabarito para 48 m, induzindo a um discreto aumento na taxa de ocupação.

Figura 91 - Projeção horizontal da área ocupada pelo cenário de ocupação intermediária.

Da mesma forma como ocorreu no cenário de ocupação máxima, para o cálculo das simulações de uma condição intermediária questionando os índices urbanísticos permitidos pela lei, os parâmetros utilizados para geração da malha foram testados em uma série de tentativas. Como resultado, determinou-se o tamanho 4 para o menor elemento, o que viabilizou o processamento e garantiu um aspecto adequado às simulações.

As equações para massa e momento com a condição de vento a leste convergiram satisfatoriamente após 140 interações, num total de cerca de seis horas de processamento, como é atestado pelo gráfico a seguir (figura 92).

Figura 92 – Convergência da simulação da ocupação intermediária com orientação leste.

4.1 Simulações com vento a leste

4.1.1 Visualização a 1,5 m do solo

Na situação atual, a visualização das linhas de contorno a 1,5 m do solo apresentadas na figura 93 permite inferir que, de maneira geral, as velocidades verificadas encontram-se no intervalo entre 1,1 e 2,2 m/s. São verificados efeitos de canto e, no início das vias cujo sentido coincide com o vento a leste, registra-se uma relativa aceleração dos fluxos devido à canalização destes ao longo do eixo das ruas, atingindo velocidades da ordem de 1,9 m/s.

Figura 93 – Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.

Na figura 93 é possível constatar, também, a formação de dois vórtices de maiores dimensões. Esses trechos de desaceleração dos fluxos correspondem a áreas localizadas após os principais conjuntos de torres residenciais já edificadas, com alturas acima dos 60 m.

No caso do conjunto de torres residenciais ao centro do modelo, correspondente ao Condomínio Parque Del Sol (círculo de destaque A), o impacto dos prédios existentes sobre o vento a leste na área de estudo corresponde a uma área de desaceleração que se prolonga por cerca de 600 m em direção à borda oeste do modelo. A canalização do vento devido ao posicionamento aproximado dos edifícios associa-se ao efeito de canto gerado pelo maior prédio, conferindo velocidades mais elevadas neste trecho.

Ao contrário do que ocorre junto às torres no centro do cenário, devido à ocupação mais aproximada dos edifícios que formam um conjunto ao sul da área de estudo (círculo B), o segundo vórtice gerado apresenta menores dimensões. Tal aspecto deve-se, também, ao posicionamento dos prédios com a menor face voltada para o sentido do vento. Neste trecho, o efeito de esquina é mais evidente nos cantos do primeiro edifício, acelerando o fluxo.

Na simulação do cenário de ocupação máxima, a avaliação através dos contornos de velocidades a 1,5 m do solo apresentada pela figura 94 permite inferir acerca do impacto da construção das demais torres residenciais já propostas para o condomínio Parque Del Sol, ao centro do cenário (círculo A). Em conjunto com as demais edificações, o resultado é a criação de uma área de estagnação significativamente maior, com dimensões de 3 x 4 quadras, aproximadamente.

Figura 94 – Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o primeiro semestre.

A ocupação da área neste modelo caracteriza-se, de forma geral, pelo grande afastamento entre as edificações de grande altura devido à aplicação dos índices urbanísticos. O resultado do ponto de vista da circulação do ar é a canalização do vento no início das ruas paralelas ao sentido do vento, sobretudo na primeira quadra próxima à borda leste do cenário (círculo B). A partir da segunda quadra, entretanto, o que se nota é um desvio do fluxo, gerando uma zona de desaceleração voltada para o sentido sul. Cabe salientar que a disposição ritmada de uma série de edifícios com 48 m de altura nessa parte do cenário não gera uma condição de estagnação a sotavento destes, aspecto que se deve, possivelmente, aos afastamentos aplicados.

Analisando os resultados na porção sul da área de estudo, detalhada na figura 95, observa-se que os contornos de velocidades a 1,5 m do piso permitem verificar a canalização do vento com forte efeito de aceleração logo após o grande edifício institucional localizado à Rua Adualdo Batista e destacado com o círculo A. Nas quadras seguintes, ao invés de canalizar-se entre as ruas, o vento passa a atravessar os espaços entre os edifícios de forma mais rápida, indicando os reflexos de uma ocupação de edificações altas necessariamente mais espaçada.

O vórtice após o conjunto de torres a sul do cenário, que no cenário da ocupação atual era mais evidente, agora é diminuído, uma vez que são criadas outras áreas de desaceleração.

Figura 95 – Detalhe dos efeitos de canalização após o grande edifício institucional a partir da Rua Adualdo Batista no modelo de ocupação máxima.

Ademais, nas bordas norte e sul do modelo, paralelas ao sentido do fluxo, observa-se a aceleração do ar. A presença de um conjunto de edificações mais baixas após o conjunto de gabarito mais elevado acaba transferindo a zona de estagnação para cerca de 500 m após os edifícios. Junto aos prédios mais baixos é verificada uma área de velocidades entre 1,0 m/s e 1,3 m/s que precede a área de desaceleração mais acentuada, com valores entre 0 e 0,4 m/s e que corresponde ao vórtice devido à ocupação verticalizada do conjunto.

No cenário de ocupação intermediária, a visualização dos contornos de velocidades a 1,5 do solo (figura 96) permite verificar a diminuição expressiva do vórtice localizado imediatamente após as edificações altas do Condomínio Parque Del Sol, ao centro do cenário (círculo A).

Figura 96 – Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste.

A canalização do vento ao entrar em contato com os primeiros edifícios mais próximos da borda leste do cenário é ainda mais evidente se comparado à condição gerada na ocupação máxima, como se observa comparando as figuras 97 e 98, destacadas com os círculos A e B. Tal aspecto deve-se, possivelmente, ao estreitamento dos corredores entre os edifícios que ocorreu devido à maior ocupação no modelo, uma vez que os edifícios sofreram um alargamento.

Entretanto, o que se procura evidenciar na análise do modelo de ocupação do solo intermediário é a maior quantidade de áreas de desaceleração junto às edificações em relação ao cenário de ocupação máxima. A presença de trechos com velocidade abaixo de 0,2 m/s no interior deste cenário é maior se comparados os mesmos locais no modelo de máxima ocupação.

Identifica-se, também, a diminuição do efeito de canalização observado no cenário de ocupação máxima que se iniciava na Av. Ministro José Américo e chegava a adentrar grande parte do modelo em um fluxo que atingia velocidades acima de 1,3 m/s, como destacam os círculos C e D sobre a figuras 97 e 98. A diminuição de tal aspecto deve-se à maior taxa de ocupação verificada neste cenário em detrimento de uma verticalização maior verificada na ocupação máxima permitida.

Figura 97 – Detalhe dos contornos e vetores a sul do modelo de ocupação intermediária.

Figura 98 - Detalhe dos contornos e vetores a sul do modelo de ocupação máxima a 1,5 m.

Observando o trecho mais a norte dos modelos e próximo à entrada de vento é possível identificar mais trechos de estagnação do vento junto às edificações mais altas no modelo de ocupação intermediária. O desvio do fluxo é semelhante, ocorrendo em direção à lateral esquerda do primeiro conjunto de edifícios após a primeira quadra, como evidenciam os círculos A e B.

A intensidade do efeito de canalização ao longo das vias é mais evidente no modelo de ocupação intermediária, mesmo em se tratando de uma área com as mesmas configurações de ocupação do solo, o que se procura frisar é a presença de maiores trechos de desaceleração no centro desse cenário em comparação com a simulação da condição máxima, como se identifica comparando as figuras 99 e 100.

Figura 99 – Detalhe dos contornos e vetores a norte do modelo de ocupação intermediária.

Figura 100 – Detalhe dos contornos e vetores a norte do modelo de ocupação máxima.

Com a visualização através de vetores a 1,5 m do solo apresentada pela figura 101, os sentidos dos fluxos e a alteração no escoamento tornam-se mais evidentes, sobretudo após as edificações mais altas, que, na situação atual, permanecem agrupadas em dois conjuntos destacados pelos círculos A e B. Ao encontrar tais estruturas, o vento sofre um desvio para as direções norte e sul do modelo, retomando o sentido natural quando em contato com os fluxos que sofreram menos alteração pelos obstáculos.

Figura 101 – Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.

No detalhe, a perspectiva utilizando vetores (figura 102) permite delinear o efeito de esteira na área imediatamente posterior ao conjunto de edifícios altos do Parque Del Sol a 1,5 m de altura. No segundo grupamento de prédios altos mais a sul do cenário, apresentado em detalhe na figura 103, o efeito de barreira apresenta-se mais estreito, com zonas de recirculação ainda bastante próximas aos edifícios do conjunto.

Figura 102 – Detalhe dos vetores a 1,5 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do modelo da situação atual

Figura 103 – Detalhe dos vetores a 1,5 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao sul do modelo da situação atual.

No cenário de ocupação máxima, a visualização dos vetores a 1,5 m de altura torna possível a caracterização dos desvios que dão origem ao grande vórtice observado. O formato assumido pela grande zona de desaceleração assemelha-se ao um triângulo cuja base corresponde aos cantos das edificações próximas às bordas norte e sul do modelo, afunilando-se em direção à fronteira oeste do cenário em um trecho que corresponde a mais de 1100 m, como se observa na figura 104.

Com a visualização dos vetores a 1,5 m de altura é possível notar, também, o início dos desvios sofridos pelo fluxo ao sul do modelo. A combinação de prédios altos e edificações de baixo gabarito preservam a maior permeabilidade do vento e aceleração do escoamento quando em contato com áreas mais estreitas.

As zonas onde são verificados vetores de menor intensidade estão localizadas mais longe do conjunto edificado, próximos à fronteira oeste do cenário, como destacam os círculos A, B e C.

Figura 104 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.

No cenário de ocupação intermediária também são verificadas grandes zonas com vetores de menor intensidade a sotavento das edificações. Diferentemente do cenário de máxima ocupação, estas zonas estão localizadas mais próximas do conjunto edificado, como se observa na figura 105.

Figura 105 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste durante o primeiro semestre.

Destaca-se o forte efeito de canalização do vento ao entrar em contato com os primeiros edifícios mais próximos da borda leste do cenário intermediário, como observado na figura 106. A aceleração é ainda mais evidente se comparada à condição gerada na ocupação máxima (figura 107) analisando-se os vetores para esse mesmo trecho.

Salienta-se que essa área compreende uma mesma forma de ocupação do solo. Entretanto, mesmo diante de mesmas alturas das edificações e espaçamentos semelhantes entre estas, a condição intermediária apresentou impactos menores no escoamento do ar.

Figura 106 - Detalhe dos vetores de velocidade do ar junto aos primeiros edifícios próximos a borda leste do cenário de ocupação intermediária indicando a aceleração pelo efeito de canalização.

Figura 107 – Detalhe dos vetores de velocidade do ar junto aos primeiros edifícios próximos a borda leste do cenário de ocupação máxima indicando aceleração pelo efeito de canalização.

4.1.2 Visualização a 10 m do solo

Observando os contornos de velocidade a 10 m de altura, nível acima da maioria das edificações existentes na área de estudo, torna-se mais nítida a influência dos edifícios mais altos no comportamento do vento, como é possível verificar através da figura 108.

Ao centro do modelo (círculo A), o que se observa é uma associação do efeito de canto ao vórtice formado pelo pelos edifícios do Condomínio Parque Del Sol, conferindo-lhe uma forma mais estreita, porém um pouco mais alongada. A disposição das torres formando uma espécie de corredor gera uma aceleração devido à canalização do fluxo.

Figura 108 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.

Evidencia-se, ainda, que a forma e o posicionamento do edifício em relação ao fluxo têm forte influência sobre as características da sombra de vento gerada. O edifício de oito pavimentos próximo a parte leste do cenário (círculo B) apresenta o canto voltado para o vento a leste, o que provoca uma nítida divisão do vórtice gerado na área posterior a este. A sombra de vento gerada por este prédio apresenta um conjunto de fluxos paralelos mais lentos (entre 1,4 e 1,6 m/s) separados por um escoamento central mais acelerado (acima de 1,6 m/s).

No cenário de ocupação máxima, a visualização dos contornos a 10 m do solo mostra que as duas zonas de estagnação a sotavento do cenário são ampliadas, destacadas pelos círculos A e B, sobretudo na área imediatamente posterior ao conjunto do Parque Del Sol, ao

centro do cenário. Paralelamente, os efeitos de canalização ao longo do eixo de vias paralelas ao vento e no espaço entre os edifícios mais altos são reforçados, como se observa na figura 109.

Figura 109 – Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.

Na ocupação intermediária, observando os contornos a 10 m do solo, nota-se a diminuição nos vórtices após o conjunto edificado em relação à ocupação máxima. Mais especificamente, no trecho contíguo ao Condomínio Parque Del Sol, círculo A, ocorre uma sensível diluição da área de velocidades próximas a 0 e 0,2 m/s, como mostra a figura 110.

Figura 110 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste.

É possível concluir, também observando a figura 110, que a grande área de estagnação do vento após as edificações mais ao sul do modelo, evidenciadas pelo círculo B, apresenta as mesmas proporções observadas a essa mesma altura no cenário de ocupação máxima, porém mais próximo das edificações. No entanto, o que se ressalta é o fato de que antes da geração dessa zona de estagnação, esses dois modelos de ocupação apresentam uma área imediatamente após as edificações com formato aproximado de um círculo em que são registradas velocidades um pouco mais elevadas. A diferença reside no intervalo de velocidades dessa zona entre os dois modelos. Enquanto no cenário de ocupação intermediária são observadas velocidades até 0,6 m/s, como mostra o círculo A, o modelo de ocupação máxima consegue registrar até 1,1 m/s nesse mesmo trecho, destacado pelo círculo B.

A existência desse círculo de 300 m de diâmetro, aproximadamente, não se deve somente a presença de edificações mais baixas logo após o conjunto de edifícios mais altos, mas também, e principalmente, pelo fato de ocorrerem velocidades mais elevadas no interior no modelo de máxima ocupação. A configuração apresentada pelo cenário de máxima ocupação permitida apresenta uma maior permeabilidade ao vento em decorrência da menor ocupação do solo apresentada pelo modelo.

Figura 112 – Detalhe do trecho menos acelerado após o conjunto edificado no cenário de ocupação intermediária.

Figura 111– Detalhe do trecho mais acelerado após o conjunto edificado no cenário de ocupação máxima.

No cenário atual, visualizando os fluxos através dos vetores na camada a 10 m do solo, observa-se que os efeitos de canto já observados nas proximidades dos primeiros edifícios a receberem o fluxo de vento são mais claros do que a 1,5 m de altura, se destacando o desvio devido o conjunto de edifícios altos próximo à fronteira sul do cenário, gerando uma corrente que adentra o modelo com forte intensidade (velocidades acima de 1,7 m/s) e atravessa a Av. Min. José Américo chegando até a Rua Leão Veloso, como destaca o círculo A, sobre a figura 113.

No caso de prédios que apresentam faces menores voltadas para o sentido do vento a tendência é a formação de menores áreas de estagnação do ar, como também é possível inferir na observação da figura 113 a seguir.

Figura 113 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.

No detalhe, as perspectivas utilizando vetores permitem delinear o efeito de esteira na área imediatamente posterior ao conjunto de edifícios altos do Parque Del Sol. O efeito vai ganhando contornos mais nítidos com a elevação do plano de observação para 10 m do solo e tornam-se evidentes, também, efeitos de canto nos edifícios, acelerando o fluxo nas proximidades dos vértices expostos ao vento, como se observa na figura 114.

No segundo grupamento de prédios altos mais a sul do cenário, o efeito de esteira apresenta comportamento diferente segundo a altura do plano de observação. A 10 m de altura o efeito parece deslocar-se mais para o interior do conjunto de edifícios e a aceleração nos cantos dos edifícios é reforçada, como atesta a figura 115.

Figura 114 – Detalhe dos vetores a 10 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do modelo.

Figura 115 – Detalhe dos vetores a 10 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao sul do modelo.

No cenário de ocupação máxima, a visualização dos vetores a 10 m de altura na figura 116 permite perceber que após os edifícios ocorre um início de recirculação do ar com velocidades acima de 1,1 m/s (círculo A), contribuindo para diminuir as dimensões do vórtice principal. De maneira geral, é possível observar vetores mais acelerados em alguns locais, inclusive adentrando o modelo com intensidade acima de 1,3 m/s, destacados pelos círculos B e C. No entanto, a presença de grandes trechos de baixas velocidades é mais evidente.

Figura 116 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o primeiro semestre.

Cabe destacar, ainda, que junto às primeiras quadras localizadas mais próximas à borda leste do modelo de ocupação máxima são reforçados os efeitos de canalização do fluxo ao longo do eixo das vias, como é apresentado pela figura 117. O mesmo efeito de aceleração ocorre nos espaços entre as demais edificações do cenário, como demonstra a figura 118.

Figura 117 – Detalhe do efeito de canalização junto às vias de sentido paralelo ao fluxo de vento no cenário de ocupação máxima a 10 m do solo.

Figura 118 – Detalhe do efeito de canalização nas primeiras edificações a leste do cenário de ocupação máxima a 10 m do solo.

Na proposta de ocupação intermediária, a visualização dos vetores a 10 m do solo caracterizam a grande zona de desaceleração após o conjunto verticalizado. Em comparação com a ocupação máxima, há um encurtamento da faixa de vetores mais lentos na parte oeste do cenário, apontando para uma diminuição nas dimensões do vórtice, como mostra a figura 119.

Entretanto, apesar da diminuição nas proporções do vórtice principal em relação ao modelo de ocupação máxima, no cenário intermediário os vetores em meio aos edifícios têm menor intensidade, caracterizando uma condição um pouco mais lenta devido à forma de ocupação do solo para este modelo, como é percebido na figura 119.

Figura 119 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste.

A aceleração ao longo do eixo das primeiras vias é mais forte no modelo de ocupação intermediário, ao passo que no interior do cenário não são observados tantos vetores de maior velocidade em relação a proposta de ocupação máxima, como mostram as figuras 120 e 121.

Figura 120 – Detalhe do efeito de canalização junto às vias de sentido paralelo ao fluxo de vento no cenário de ocupação intermediária a 10 m do solo.

Figura 121 – Detalhe do efeito de canalização nas primeiras edificações a leste do cenário de ocupação máxima a 10 m do solo.

4.1.3 Visualização a 36 m do solo

Visualizando os contornos de velocidades a 36 m de altura, a área de desaceleração gerada pelos principais vórtices criados pelos dois conjuntos de edifícios mais altos, destacados pelos círculos A e B, tem suas proporções significativamente diminuídas. No entanto, se estabelece um terceiro vórtice na área posterior a dois edifícios posicionados próximos entre si e com o canto voltado para o sentido do vento a leste, destacado pelo círculo C.

Os efeitos de esquina junto aos principais edifícios são reforçados nos vértices dos prédios, onde são verificadas velocidades acima de 2,2 m/s. Assim, é possível apreender que, ao elevar-se a altura do plano de observação dos resultados, as áreas de estagnação tendem a diminuir, ainda que as características de ocupação sejam mantidas, como no caso dos trechos ocupados por edifícios mais altos.

Figura 122 – Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.

Nesse nível, diferentemente dos campos de velocidade em outras alturas, as áreas de desaceleração dos fluxos de vento são absorvidas pelo domínio, permitindo calcular suas dimensões em pouco mais de 1 km.

No cenário de ocupação máxima, a figura 123 apresenta os contornos de velocidades também a 36 m do solo. O grande vórtice gerado pelas edificações altas ao centro do modelo é agora dispersado, como mostra detalhe em destaque pelo círculo A. O que se verifica, no entanto, é a presença de alguns pequenos vórtices mais alongados e de dimensões bastante inferiores se comparados à grande zona de estagnação observada em outros planos.

A grande zona de desaceleração criada pelo conjunto como um todo, por sua vez, encaminha-se para oeste do cenário, mas um pouco mais próximo do conjunto verticalizado e com dimensões mais estreitas.

Ocorrem pontos onde o fluxo incidente adentra o modelo com velocidades maiores – aspecto resultante dos efeitos de canalização. Tais trechos localizam-se no início de algumas vias e entre alguns edifícios, como se observa no destaque dado pelo círculo B sobre a figura 123.

Figura 123 – Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.

Comparando-se o cenário de ocupação máxima com o modelo intermediário no plano de observação a 36 m do solo verificam-se os mesmos efeitos de canalização e de canto. No entanto, é bastante evidente a diminuição do principal vórtice formado após o conjunto edificado no modelo de ocupação intermediária, como é apresentado pelo círculo A sobre a figura 124. A principal área de estagnação do vento agora parece menor e localizada mais próxima dos edifícios, não se afastando destes como no cenário de máxima ocupação.

São verificados pequenos vórtices espalhados pelo modelo, a semelhança do cenário de ocupação máxima, porém estes apresentam menores dimensões.

De maneira geral, a retomada das condições de velocidade semelhantes ao fluxo não perturbado parece ocorrer mais próxima no modelo de ocupação intermediária, uma vez que o vórtice apresenta menores dimensões se comparado àquele gerado pelo cenário de máxima ocupação.

Figura 124 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste.

Com base nos resultados através de vetores, os efeitos de canto e desvios do fluxo são mais evidentes. Analisando a figura 125, a seguir, reforça-se a presença das três zonas de desvio do fluxo junto aos edifícios mais altos presentes no modelo, destacadas pelos círculos A, B e C. Estas zonas, entretanto, apresentam-se mais alongadas, com largura reduzida se comparada à condição apresentada analisando o plano de observação a 10 m do solo.

Figura 125 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a leste durante o primeiro semestre.

Visualizando os resultados a 36 m de altura, os efeitos de canto ou esquina também se tornam mais claros, com velocidades próximas a 2,5 m/s. O efeito vai ganhando contornos mais nítidos sobretudo nos edifícios ao centro do modelo (figura 126).

No segundo grupamento de prédios altos mais a sul do cenário, apresentado na figura 127, o efeito de esteira apresenta comportamento diferente segundo a altura do plano de observação. Visualizando os resultados na camada a 36 m, o único efeito de esteira antes observado a 1,5 m e 10 m de altura divide-se, dando origem a dois vórtices, ao passo que as áreas de desaceleração são menores se comparadas às sombras de vento geradas nos planos mais baixos, como é possível perceber pelos vetores de direção e velocidade.

Figura 126 – Detalhe dos vetores a 36 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do

Figura 127 – Detalhe dos vetores a 36 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao sul do modelo

Visualizando os vetores a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima, nota-se a diminuição do vórtice formado após o conjunto edificado ao centro do modelo (círculo A) e é possível caracterizar o afunilamento do fluxo mais lento em direção à borda oeste do cenário.

Figura 128 – Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.

Em geral, a disposição mais espaçada dos prédios no cenário de ocupação máxima permite uma maior permeabilidade do vento, criando correntes mais aceleradas que adentram parte da ocupação verticalizada próxima, como se observa nos vetores gerados a 36 m do solo.

São diversos fluxos que, devido ao efeito de canalização, conseguem inserir-se no interior dos cenários em condições mais rápidas, provocando uma recirculação do ar nessa cota.

No detalhe, é possível delinear os direcionamentos do fluxo adentrando parte deste cenário após as primeiras edificações a leste, como se observa nos detalhes apresentados nas figuras 129 e 130.

Figura 129 - Detalhe dos vetores nas primeiras edificações a leste do cenário de ocupação máxima a 36 m do solo.

Figura 130 - Detalhe dos vetores junto aos primeiros edifícios próximos à borda leste do cenário de ocupação máxima indicando efeitos de canalização.

Analisando os vetores no plano de observação a 36 m do solo no cenário de ocupação intermediária nota-se a ausência de fluxos mais acelerados em meio aos edifícios. Entretanto, o afunilamento do fluxo em direção à fronteira oeste é mais claro, apresentando uma menor área de baixas velocidades em comparação com o modelo de ocupação máxima.

Figura 131 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste.

A aceleração do fluxo devido à canalização ao longo do eixo das primeiras vias é semelhante à condição de ocupação máxima, como atesta a figura 132. Por outro lado, apesar da aceleração nos cantos dos primeiros edifícios ser mais evidente no modelo de ocupação intermediária, nas quadras mais internas do modelo não são verificados vetores de maior intensidade. Ao contrário, é mais clara a estagnação do ar em alguns pontos, como demonstra a figura 133.

Figura 132 – Detalhe dos vetores nas primeiras edificações a leste do cenário de ocupação intermediária a 36 m do solo.

Figura 133– Detalhe dos vetores junto aos primeiros edifícios próximos à borda leste do cenário de ocupação intermediária indicando efeitos de canalização.

A 36 m do solo, cabe ressaltar que a maior diferença entre os cenários de ocupação máxima e esse modelo de ocupação intermediária se refere à expressiva diminuição do vórtice após o grande conjunto edificado. No cenário intermediário observa-se a diluição dessa zona de desaceleração em vórtices menores agora localizados em trecho imediatamente após os edifícios mais altos.

Por outro lado é evidente, também, certo aumento na quantidade de zonas de estagnação do vento em alguns pontos em meio ao cenário, caracterizando a presença de pequenos vórtices mais localizados do que na ocupação máxima proposta.

O aspecto de direcionamento dos fluxos através das vias paralelas ao sentido do vento deve-se à maior ocupação do solo no modelo intermediário. A maior área de fachada dos edifícios acaba desviando o vento ao entrar em contato com os primeiros prédios, deslocando os fluxos para o eixo das áreas desobstruídas formadas pelos corredores das ruas que, por sua vez, são mais estreitas nesse cenário.

Da observação dos desvios dos fluxos e a sua canalização através das ruas e espaços entre os edifícios paralelos ao sentido do vento pode-se concluir que, tanto a 10 m do solo como na metade dos edifícios, a 36 m de altura, são maiores as possibilidades de recirculação do ar em

um adensamento construtivo maior, porém representando uma ocupação menor do trecho, como é o caso do cenário de máxima ocupação.

4.1.4 Streamlines

A observação do comportamento do vento através de *streamlines* geradas após o conjunto arborizado, localizado à Av. Pedro Lazar, reafirma a alteração no escoamento provocada pelos edifícios mais altos ao centro e no canto sul do modelo representando a atual situação. No caso do conjunto ao centro, o efeito de barreira é determinado pela dimensão dos edifícios dispostos perpendicularmente ao sentido do vento. Nos prédios próximos a borda sul do cenário, as correntes são desviadas pela disposição em ângulo agudo do conjunto edificado, gerando desvios para as laterais relativamente menores se comparados à grande dispersão provocada pelos edifícios ao centro do cenário.

Logo após as edificações de baixo gabarito ocorrem *streamlines* mais rápidas (acima de 2,3 m/s), semelhantes àsquelas verificadas nos cantos do cenário, onde o fluxo mantém-se inalterado, como é possível inferir da observação da figura 134.

A visualização dos aspectos do vórtice formado após o conjunto das principais edificações é ainda mais clara através da visualização das *streamlines*.

Figura 134 - Visualização do escoamento do vento a leste sobre o cenário atual através de *streamlines*.

No cenário de ocupação máxima, as *streamlines* também foram geradas a partir da Av. Pedro Lazar e caracterizam os desvios dos fluxos junto aos primeiros edifícios, direcionando o vento para o sentido sul do cenário como é percebido pela figura 135, a seguir.

Adentrando o modelo, o vento é acelerado sobre todo o conjunto verticalizado, como se a estrutura urbana representasse um todo unificado, uma barreira a circulação do ar, elevando-o para níveis mais altos, o que acarreta num agravamento do vórtice gerado a sotavento.

Na região imediatamente após o Condomínio do Parque Del Sol, neste cenário inteiramente verticalizado, o efeito de esteira é melhor descrito através das *streamlines*, indicando a turbulência atribuída ao fluxo após o contato com esses obstáculos.

Figura 135 - Visualização do escoamento do vento a leste sobre o cenário de ocupação máxima através de *streamlines*.

No cenário de ocupação intermediária é interessante observar que, diferentemente do modelo de ocupação máxima, as *streamlines* não se elevam tanto. Tal aspecto evidencia, portanto, que no caso da ocupação máxima ocorre um efeito de elevação dos fluxos devido à presença de edifícios de 48 m antes dos prédios de 72 m, uma vez que parte da área de estudo situa-se fora dos limites do parágrafo único que permite o acréscimo no gabarito.

Dessa forma o resultado é uma elevação menor dos perfis de velocidade neste cenário de ocupação atual, como se observa na figura 136, a seguir. Através desta ferramenta também é mais evidente a aproximação do vórtice para juntos dos edifícios.

Streamlines com maiores velocidades são observadas quando adentram o cenário a partir dos primeiros edifícios a leste, mantendo-se nas primeiras quadras, entretanto. Tal aspecto difere da ocupação máxima, quando as *streamlines* conseguem adentrar mais o cenário.

Figura 136 - Visualização do escoamento do vento a leste sobre o cenário de ocupação intermediária através de *streamlines*

4.1.5 Planos Verticais

Analisando os planos verticais é possível identificar o comportamento do vórtice gerado, evidenciando a tendência à frenagem do fluxo e a criação de zonas de recirculação do ar.

Na condição atual observa-se que na área imediatamente posterior ao principal conjunto verticalizado, destacada entre as linhas brancas, o fluxo apresenta uma significativa redução nas velocidades. A área de desaceleração apresenta uma dimensão que se estende até a fronteira oeste do modelo e uma zona de estagnação do ar, com velocidades abaixo de 0,4 m/s com dimensão de 400 m, aproximadamente, como se observa na figura 137, a seguir.

Figura 137 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário da condição atual com vento a leste.

Apesar da influência do principal conjunto de edifícios altos, o vento consegue retomar velocidades acima de 2,1 m/s dentro de 500 m, aproximadamente, após uma redução mais evidente que ocorre junto às torres, como demonstra a figura 138. Trata-se, no entanto, de uma perturbação significativa, uma vez que o vento fluía em campo relativamente desobstruído acima da altura da maioria das edificações existentes, por volta dos 6 m.

Figura 138 – Vista lateral do plano vertical com o contorno de velocidades após o principal conjunto verticalizado da situação atual com vento a leste.

Os vetores próximos do trecho caracterizam os desvios sofridos pelo fluxo ao encontrar os edifícios. Nesses pontos, o vento é direcionado para as laterais, gerando o vórtice que caracteriza a área imediatamente posterior aos obstáculos, como é possível notar nas figuras 139 e 140.

Figura 139 – Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo ao encontrar as principais torres no modelo da situação atual.

Figura 140 – Detalhe do vórtice gerado a sotavento do principal conjunto verticalizado na situação atual.

Ao sul do cenário de ocupação atual, onde as edificações ainda não apresentam grande altura, os contornos de velocidades apresentam uma gradação relativamente uniforme a partir do piso até o topo do modelo, caracterizando a baixa rugosidade ali encontrada. São velocidades entre 1,3 m/s e 2,6 m/s até próximo dos 100 m, e acima dos 3,4 m/s nas camadas mais elevadas, como se observa na figura 141.

Figura 141 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao sul do cenário da condição atual com vento a leste.

Os desvios que ocorrem nesse trecho são de pequenas dimensões, uma vez que resultam resultado do contato com edificações de pouca altura, como demonstra a figura 142.

Figura 142- Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo ao encontrar as edificações baixas ao sul do modelo da situação atual

Na proposta de máxima ocupação, os impactos são mais evidentes e de proporções significativas, sobretudo na região a sotavento da área de estudo, destaca pelas linhas brancas.

Com base na figura 143, é possível perceber o aumento nos trechos onde o movimento do ar é bastante reduzido. Ocorre, também, uma maior quantidade de áreas com velocidades abaixo de 1,3 m/s.

Figura 143 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário de máxima ocupação com vento a leste.

Apesar da redução das velocidades que caracterizam o grande vórtice na região a sotavento, cabe ressaltar que ocorre uma aceleração do fluxo em camadas mais próximas ao topo dos edifícios em comparação à situação atual, como demonstra a vista lateral do plano vertical apresentada pela figura 144.

Figura 144 - Vista lateral do plano vertical com o contorno de velocidades ao centro do modelo de máxima ocupação com vento a leste.

Além dos desvios causados pelos edifícios mais altos, e que resultam no grande trecho de redução das velocidades, o que chama atenção são os vórtices e áreas de turbulência criadas entre estes, como demonstra a figura 145.

Figura 145 – Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo na parte central do cenário de máxima ocupação e os vórtices nos espaços entre os prédios.

No trecho mais ao sul do cenário de ocupação máxima, onde ocorreu uma intensa verticalização, são observadas grandes zonas de velocidades abaixo de 0,4 m/s e que se estendem ainda mais distante do conjunto edificado, como se percebe na figura 146.

Figura 146 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao sul do cenário de máxima ocupação com vento a leste.

Figura 147 - Vista lateral do plano vertical com o contorno de velocidades ao sul do modelo de máxima ocupação com vento a leste.

Os vetores de direção e velocidade do ar no sentido do fluxo permitem perceber os desvios sofridos pelo vento ao encontrar os edifícios ao sul do cenário de máxima ocupação. Nas primeiras quadras os vetores apresentam velocidades acima dos 2,3 m/s, diminuindo à medida que adentram o cenário em direção às demais torres e são direcionados para as laterais em função dos obstáculos, conformando a grande zona de desaceleração a sotavento (figura 148).

Figura 148 - Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo na parte central do cenário de máxima ocupação e os vórtices nos espaços entre os prédios.

Ao centro do cenário de ocupação intermediária, os vórtices gerados apresentam características semelhantes àsquelas registradas pelo modelo de máxima ocupação. São pequenas

áreas de desaceleração entre os prédios e um trecho de redução a sotavento com as mesmas dimensões, porém com intervalos de velocidades acima de 0,4 m/s (figura 149).

Figura 149 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário de ocupação intermediária com vento a leste.

Comparando-se a influência da ocupação intermediária sobre a região ao centro do modelo com o mesmo trecho no cenário de máxima ocupação, o que se percebe através dos vetores é que, em parte, o fluxo é direcionado pra baixo, o que concorre para minimizar as dimensões do vórtice gerado.

Figura 150 - Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo na parte central do cenário de ocupação intermediária.

Para a parte sul do modelo intermediário, as diferenças em relação à máxima ocupação são mais evidentes. O vórtice gerado a sotavento, com velocidades abaixo de 0,4 m/s, localiza-se mais próximo do conjunto e com menores dimensões, como demonstra a figura 151.

Figura 151 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao sul do cenário de ocupação intermediária com vento a leste.

Analisando o plano vertical ao sul do cenário em vista lateral percebe-se, ainda, que o trecho onde se verifica a redução das velocidades tem seu topo localizado junto à altura máxima das edificações do modelo, ao passo que no cenário de máxima ocupação ainda ocorre uma elevação do vórtice. Tal aspecto na simulação da máxima ocupação permitida se deve a presença de edificações de 16 pavimentos na parte anterior do modelo, localizadas fora dos limites onde é permitida a elevação do gabarito até 24 pavimentos. O acréscimo em cerca de 24 m na altura dos edifícios eleva ainda mais o gradiente de vento e contribui para o aumento nas dimensões do vórtice para o modelo mais verticalizado.

Figura 152 - Vista lateral do plano vertical com o contorno de velocidades ao sul do modelo de máxima ocupação com vento a leste.

4.1.6 Pontos de Verificação e Comparação

Os perfis de velocidade segundo a altura foram medidos em pontos localizados nas ruas como forma de comparar as diferentes rugosidades impostas ao fluxo ao longo do cenário.

O primeiro ponto (P1) localiza-se na Av. Pedro Lazar e indica ainda a pouca influência da ocupação da área de estudo sobre o vento. Em contrapartida, nos pontos 3, 4 é possível perceber o impacto das edificações mais altas na rugosidade conferida à situação atual.

Figura 153 – Pontos de verificação dos perfis de velocidade no trecho mais verticalizado do cenário de ocupação atual com vento a leste

Contudo, é no ponto 5, localizado em terreno a sotavento do modelo e imediatamente após o principal conjunto verticalizado, que se percebe o impacto da verticalização já presente na área de estudo sobre o comportamento do vento. Até os 30 m de altura o fluxo apresenta-se bastante reduzido em sua intensidade, quando tende a retorna a normalidade.

De maneira geral, os perfis se unificam acima de 120 m de altura, determinando a altura da camada limite urbana para essas condições, como indicam os gráficos a seguir (figura 154).

À medida que se adentra no modelo o vento atravessa edificações mais baixas até encontrar as torres já construídas no Condomínio Parque Del Sol. Assim, as velocidades nos pontos mais baixos parecem sofrer maiores reduções. No ponto 1 a velocidade do ar a 5 m do solo é de 1,81 m/s e a 10 m é de 2,02 m/s, ao passo que nos pontos 2 e 3 a velocidade cai para 1,67 m/s e 1,37 m/s a 5 m do solo, respectivamente. A 10 m de altura, os pontos 2 e 3 registram maiores diferenças, com 1,86 m/s e 1,50 m/s, indicando o impacto da rugosidade na redução da velocidade do ar nas camadas mais baixas.

Nas camadas mais altas, entretanto, os impactos são menores. No ponto 1 a velocidade do ar a 70 m do solo passa para 2,76 m/s. Não se observam reduções significativas quando se observa a velocidade do ar nessa mesma altura nos pontos 2 e 3, com 2,75 m/s, 2,64 m/s, respectivamente. Após os prédios mais altos a redução ganha contornos mais nítidos, passando para 2,27 m/s no ponto 4 e cai para 1,46 m/s no terreno a sotavento representado pelo ponto 5.

Figura 154 – Perfis de velocidade segundo a altura nos pontos 1 a 5 com vento a leste no cenário atual (250 m e 100 m de altura)

No cenário de ocupação máxima foram calculados os perfis de velocidade nos mesmos pontos do cenário da situação atual como forma de comparar o impacto da ocupação máxima permitida. De maneira geral, nesse trecho as curvas se unificam acima dos 150 m de altura.

Figura 155 - Pontos de verificação dos perfis de velocidade no trecho a norte do cenário de ocupação máxima permitida com vento a leste

No ponto 1, localizado ainda na Av. Pedro Lazar, mesmo antes de encontrar os edifícios do modelo, evidencia-se a diminuição da velocidade em até 39,78% a 5 m do solo e 33,66% a 10 m comparado às velocidades para o mesmo ponto na situação atual.

O ponto 2, que antes correspondia a uma curva semelhante à condição apresentada no ponto 1, passa a refletir uma expressiva diminuição da intensidade do fluxo até próximo dos 50 m de altura. Comparado à situação atual, o ponto 2 representa a uma redução entre 71,86% e 88,93% até a altura das edificações propostas, por volta dos 48 m.

Nos pontos 3 e 4, localizados em meio ao conjunto do Parque Del Sol, o impacto dos edifícios mais altos sobre o comportamento do vento pode ser melhor avaliado. Devido a associação destes edifícios com os demais, também de gabarito elevado, o que se observa é que a da velocidade a 50 m do solo cai de 2,22 m/s no ponto 3 na situação atual para 1,40 m/s na proposta de máxima ocupação, correspondendo a 36,94% de redução.

O ponto 4 corresponde a uma diminuição nas mesmas proporções, uma vez que no cenário anterior sua velocidade a 50 m do solo correspondia a 1,75 m/s, passando para 1,31 m/s no mesmo nível calculado para a situação de maior adensamento construtivo.

No ponto 5, localizado em terreno a sotavento do modelo, ocorre uma discreta aceleração a partir dos 30 m de altura se comparado à situação atual. Os resultados afirmam, portanto, a elevação dos perfis de velocidades nesta condição verticalizada em relação aos níveis mais baixos, como atesta o gráfico na figura 156.

Figura 156 - Perfis de velocidade segundo a altura nos pontos 1 a 5 para o vento a leste no cenário de ocupação máxima

A localização dos perfis de velocidades no cenário de ocupação intermediária para os mesmos pontos analisados anteriormente caracteriza uma condição já observada através de outras ferramentas: a menor permeabilidade nesse trecho do modelo intermediário.

Figura 157 - Pontos de verificação dos perfis de velocidade no trecho a norte do cenário de ocupação intermediária com vento a leste

Nos pontos 1 e 2 da ocupação intermediária, o fluxo de vento apresenta as mesmas características de velocidade apresentadas na condição máxima até 10 m do solo, correspondendo a uma redução da ordem de 30% no P1 e 70% no P2, em relação à situação atual.

Entretanto, cabe ressaltar que a partir do ponto 3 é verificada uma redução ainda maior na ocupação intermediária em relação à situação atual. Tal fato é verificado também nos pontos 4 e 5, onde as reduções de velocidades nas camadas mais próximas do chão são ainda mais significativas se comparadas à ocupação máxima permitida, entre 10% a 20% mais lentos do que neste último cenário

O ponto 5 da ocupação intermediária também reforça a tendência à elevação das velocidades nos níveis mais elevados como ocorre no cenário de ocupação máxima, aspecto atestado pelo gráfico a seguir (figura 158). Até 50 m de altura, no entanto, as velocidades são menores neste modelo intermediário, permitindo avaliar o impacto da adoção de uma taxa de ocupação maior para a ventilação do entorno imediato, que corresponde a trechos mais comprometidos na proposta de ocupação intermediária.

Figura 158 - Perfis de velocidade segundo a altura para o vento a leste no cenário de ocupação intermediária.

A seguir, foram gerados gráficos de comparação das velocidades nas camadas mais baixas até 100 m de altura em cada um dos três modelos de ocupação do solo. Com a redução do intervalo de alturas é possível perceber melhor a influência da rugosidade sobre o perfil de velocidades em cada um dos pontos analisados neste trecho.

Figura 159 - Gráfico dos perfis de velocidades nos pontos 1 a 5 até 100 m do solo no cenário de ocupação máxima.

Figura 160 - Gráfico dos perfis de velocidades nos pontos 1 a 5 até 100 m do solo no cenário de ocupação intermediária.

As reduções mais evidentes até 100 m de altura nos cenários de máxima ocupação e intermediária comparados à situação atual estão concentradas no interior do modelo, desde o ponto 1 até o ponto 3. Nesses pontos a redução atinge valores mais expressivos, acima dos 60% e, em algumas alturas, até 80%, como demonstram os gráficos a seguir. Tal aspecto era previsto a partir da inserção de propostas de ocupação mais verticalizadas.

É necessário frisar, no entanto, que é apenas nos primeiros edifícios (pontos 1 e 2) que a ocupação máxima apresenta níveis de velocidade inferiores à condição intermediária. Após o segundo ponto e, sobretudo em alturas maiores, as velocidades no cenário de máxima ocupação superam as velocidades verificadas no modelo intermediário.

Figura 161 – Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 1.

Figura 162 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 2.

Figura 163 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 3.

Nos pontos 4 e 5, por sua vez, o que chama a atenção é o fato de que as velocidades do ar registradas em praticamente todas as alturas são bastante próximas entre os três cenários.

Após 70 m, a tendência é a diminuição das diferenças e, no ponto 5, a partir dos 30 m de altura, as velocidades são ainda maiores nos cenários de maior ocupação do que na atual situação, comprovando a elevação dos perfis de velocidade para cotas mais altas devido o contato com estruturas verticalizadas, como indicado nos gráficos a seguir.

Figura 164 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 4.

Figura 165 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 5.

Procurou-se medir os perfis de velocidade do ar em um trecho onde a verticalização ainda não ocorreu, avaliando o impacto do adensamento proposto para os demais cenários.

O ponto 6 corresponde a um terreno livre localizado no Centro Administrativo do Estado (CAMBEBA), uma área desprovida de obstáculos, sendo utilizado para comparações entre os demais pontos. A partir do ponto 7 em diante o fluxo já se apresenta mais alterado pelas edificações presentes na área de estudo.

Diante de áreas menos verticalizadas do cenário atual observa-se que a influência dos edifícios mais baixos sobre o fluxo de vento é significativamente menor, como se percebe nos perfis de velocidade apresentados na figura 166, a seguir.

Figura 166 – Pontos de verificação dos perfis de velocidade no trecho mais horizontal do cenário de ocupação atual com vento a leste.

Nessas condições, os perfis se unificam ainda próximos a 50 m de altura, indicando a baixa rugosidade neste trecho do cenário. Já a 60 metros de altura as velocidades são semelhantes, indicando o final do efeito de cobertura das edificações sobre a ventilação natural.

É somente no P8, na Rua João Veloso, que a presença de edificações representa uma diminuição maior da intensidade do fluxo incidente para próximo de 1,00 m/s nas camadas próximas do nível do solo. Tal fato se deve, possivelmente, a ocupação mais aproximada entre as edificações residenciais ali verificadas, que variam de 1 até 3 pavimentos.

No entanto, em todos os pontos na condição atual o perfil de velocidades caracteriza uma curva ascendente típica do fluxo inalterado, como se observa através do gráfico a seguir (figura 167).

Figura 167 – Perfis de velocidade segundo a altura para o vento a leste no cenário de ocupação atual.

Comparando esse mesmo trecho no cenário de ocupação máxima permitida pela legislação os impactos são ainda mais evidentes.

O perfil de velocidades gerado para o ponto 7 já indica a influência da alteração na rugosidade verificada no trecho. Os pontos 8 e 9, agora inseridos em área extremamente verticalizada, apontam os resultados para uma ocupação adensada. O ponto 10 é utilizado para avaliar os reflexos sobre a circulação do ar em terreno a sotavento.

Figura 168 - Pontos de verificação dos perfis de velocidade no cenário de ocupação máxima com vento a leste.

No ponto 7, próximo ao solo, a velocidade do ar é de 0,48 m/s a 5 m, 0,79 m/s a 10 m e 1,53 a 20 m. Com base nesses valores, são calculadas reduções em relação à situação existente de 72,57%, 61,46% e 33,48%, respectivamente. A diminuição da velocidade do ar nesse ponto em relação à ocupação atual somente é menor acima dos 70 m, quando cai para menos de 10%.

Os pontos 8 e 9, inseridos em meio aos prédios mais altos desse cenário de ocupação máxima, descrevem um perfil de velocidades profundamente alterado até os 50 m de altura, com velocidades iniciais abaixo de 1,0 m/s. É então acima da altura cota máxima dos edifícios (72 m) que esses pontos passam a descrever uma tendência de retorno à normalidade da curva de velocidades do ar.

A redução das velocidades nesses pontos são as maiores verificadas nesse trecho quando comparadas à situação atual, com pontos cujos fluxos estão entre 65% a 95% mais lentos nas camadas mais baixas.

Os perfis se unificam um pouco antes de 150 m, quando as curvas de velocidade assumem as mesmas condições acima desse nível. Tal aspecto indica o estabelecimento da camada limite urbana para o trecho.

É interessante notar, também, que apesar de representarem uma alteração estrutural na curva de velocidades próximo ao solo, após os 150 m de altura, esses mesmos pontos apresentam valores de velocidade ainda mais elevados do que os pontos onde o fluxo é menos alterado, como é possível inferir na figura 169, a seguir.

Figura 169 – Perfis de velocidade segundo a altura para o vento a leste no cenário de ocupação máxima.

No caso da ocupação intermediária, o que se observa é a presença de trechos mais acelerados no interior do modelo segundo os valores calculados para os mesmos pontos analisados anteriormente (figura 170).

Figura 170 - Pontos de verificação dos perfis de velocidade no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.

Analisando o ponto 7, a redução das velocidades do ar em alturas próximas ao solo é bem mais discreta do que no modelo de máxima ocupação. A 5 m do solo a velocidade cai para 47,43% do valor verificado na situação atual. A 10 m do solo no mesmo ponto o valor é de 0,79 m/s, 34,15% a menos, e, a 20 m de altura, há uma redução de 17,39% do valor na situação atual.

Nos pontos 8 e 9 o percentual de redução no perfil de velocidades verificado neste modelo é menor nas camadas mais baixas, aproximando-se da condição existente. Em cotas mais elevadas, a ocupação intermediária apresenta comportamento semelhante à máxima ocupação, apresentando reduções significativas quando comparadas à situação atual.

No cenário de ocupação intermediária, o ponto 5 apresenta-se mais lento em todos os níveis do que o cenário de máxima ocupação. Tal aspecto confirma a observação dos contornos de velocidades realizada anteriormente, que determinou a existência de um trecho em formato circular logo após o cenário de ocupação intermediária em que as velocidades eram menores do que aquelas observadas na mesma área no cenário de máxima ocupação.

Figura 171 - Perfis de velocidade segundo a altura para o vento a leste no cenário de ocupação intermediária.

Como observado nos gráficos anteriores, nos pontos 6, 7, 8 e 9 fica evidente que as maiores velocidades são registradas no cenário de ocupação intermediária em relação ao modelo de máxima ocupação. Conseqüentemente, as reduções em relação à situação atual são menores no modelo intermediário quando se analisa este trecho mais adensado, como reforçam os gráficos até 100 m do solo (figuras 172 e 173).

Figura 172 - Gráfico dos perfis de velocidades nos pontos 6 a 10 até 100 m do solo no cenário de ocupação máxima.

Figura 173 - Gráfico dos perfis de velocidades nos pontos 6 a 10 até 100 m do solo no cenário de ocupação intermediária.

As diferenças nas velocidades ao longo do trecho são mais evidentes ao adentrar os diferentes modelos. O ponto 6 ainda aponta a condição semelhante entre os cenários, ao passo que os demais pontos evidenciam a redução nos perfis de velocidades sobretudo no cenário de ocupação máxima.

Figura 174 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 6.

A partir do ponto 7 as reduções na intensidade do vento nos modelos de ocupação mais adensados são mais evidentes em relação à condição atual da área de estudo. Mais especificamente, a sensível diminuição das velocidades nos níveis mais baixos do cenário de máxima ocupação permite concluir que a elevação no gabarito até 72 m apresenta um impacto maior no âmbito local do que a redução na taxa de ocupação proposta pela legislação para esse trecho, como é possível constatar analisando os gráficos dos pontos 7, 8 e 9.

Figura 175 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 7.

Mesmo com o aumento registrado na ocupação do solo nos pontos 8 e 9 e diminuição dos espaçamentos, os intervalos de velocidades são maiores no cenário de ocupação intermediária do que no modelo de máxima ocupação.

Figura 176 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 8.

Figura 177 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 9.

No ponto 10, como apontado em outras situações, ocorrem velocidades maiores nos níveis mais baixos no modelo de ocupação máxima em relação ao cenário intermediário. Tal aspecto pode indicar que há uma permeabilidade maior ao final dos edifícios, gerando zonas mais aceleradas nas proximidades dos prédios mais altos (72 m) do que numa condição de maior ocupação do solo e menor altura (48 m).

Apesar das maiores velocidades do ar se apresentarem mais acima no modelo de máxima ocupação devido à presença de edifícios mais altos, aparentemente, a condição única de alturas a 16 pavimentos do modelo intermediário comprometeu mais o escoamento do vento nas cotas mais baixas, como se verifica no gráfico a seguir (figura 178).

Figura 178 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 10.

O que se apreende da avaliação dos perfis de velocidade calculados para trechos mais adensados, como é o caso dos pontos 6 a 9, é que, mesmo diante de uma ocupação do solo discretamente maior, a ventilação nas alturas dos edifícios foram maiores no modelo de ocupação intermediária do que no cenário de máxima ocupação.

Assim, decidiu-se avaliar o comportamento do vento em centros de quadras completamente verticalizadas e ao longo de todo um trecho como forma de comparar adequadamente os perfis de velocidades e o vórtice formado a sotavento para as situações atual, cenário de máxima ocupação e ocupação intermediária, como demonstra a figura 179.

Da mesma forma das verificações feitas para outros trechos, o Ponto de Comparação 1 (PC1) corresponde a um trecho desprovido de obstáculos, servindo de comparação por apresentar o perfil de velocidades não perturbado pelas estruturas existentes.

Os pontos de comparação 2, 3, 4, 11 e 12 foram dispostos ao centro de quadras como forma de analisar a influência da verticalização máxima e intermediária.

O PC 5 corresponde ao primeiro trecho a sotavento, imediatamente após o conjunto edificado. Os pontos de comparação 6, 7, 8, 9 e 10 indicam a localização de trechos a 200 m, 400 m, 600 m, 800 m e 1000 m a sotavento e foram dispostos como forma de medir o espaço necessário à retomada das condições iniciais do fluxo, ou seja, avaliando o vórtice a sotavento gerado por cada cenário.

Figura 179 - Perfis de velocidades nos Pontos de Comparação para o cenário da ocupação atual.

A análise dos fluxos nos pontos de comparação no cenário atual descreve a alteração no comportamento do vento apenas nas camadas mais baixas até 20 m. Após essa altura, o vento tende a retornar a normalidade, apresentando um acréscimo na intensidade segundo a elevação da cota.

Somente no PC 3, PC 4 e PC 5 que se verificam diminuições no fluxo mais evidentes. Tal fato se deve à ocupação do solo nesses trechos, configurando um discreto aumento na rugosidade, como mostra o gráfico a seguir (figura 180).

Figura 180 – Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos de comparação 1 a 10 do cenário da situação atual.

Os mesmos pontos de comparação foram locados no cenário de ocupação máxima. Analogamente ao que ocorria em outros pontos de medição dos perfis de velocidades, nos primeiros pontos (PC 1 e PC 2) a velocidade parece manter-se próximo aos valores verificados na condição atual. As reduções, nesses locais se situam dentro de valores pequenos, representando apenas valores até 10% mais lentos.

Mais adiante, no entanto, o fluxo começa a sofrer maiores interferências pela rugosidade imposta. Nos pontos de comparação 3 e 4 a redução atinge valores mais expressivos em comparação às velocidades alcançadas no cenário atual, reduzindo pela metade a intensidade do ar nos níveis mais baixos.

Figura 181 - Perfis de velocidades nos Pontos de Comparação para o cenário de ocupação máxima.

Nos trechos a sotavento (PC 6, PC 7, PC 8, PC 9 e PC 10) a diferença entre as velocidades do ar registradas na situação atual e a ocupação máxima vai paulatinamente diminuindo e a curva caminha no sentido de assemelhar-se ao PC 1. A representação do perfil de velocidades nesses pontos indica o efeito dos edifícios verticalizados sobre o fluxo, como mostra a figura 182.

Figura 182 - Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos de comparação 1 a 10 do cenário de ocupação máxima.

A inserção dos mesmos pontos de comparação no cenário de ocupação intermediária tornou possível avaliar a influência de uma maior ocupação do solo e menor verticalização em relação aos resultados para o cenário com a máxima ocupação permitida.

Figura 183 - Perfis de velocidades nos Pontos de Comparação para o cenário de ocupação intermediária.

De maneira geral, analisando o gráfico a seguir (figura 184), apreende-se que as edificações do modelo intermediário representam uma influência menor em cotas mais elevadas. O que se observa é a maior proximidade das curvas nos pontos a sotavento (PC 6, PC 7, PC 8, PC 9 e PC 10) do perfil apresentado pelo PC 1 e PC 2, onde o fluxo de vento ainda não sofreu tanta alteração.

O que se pode concluir, portanto, é que o impacto da ocupação máxima para o grande vórtice gerado na área a sotavento é maior do que o verificado nas condições intermediárias de ocupação da área de estudo, uma vez que tomaria mais espaço da região após o modelo para o retorno às condições normais do fluxo.

Ainda, a redução da velocidade do ar nos centros de quadra definidos pelo PC 3 e PC 4 é menor neste cenário de ocupação intermediária se comparados à diminuição na intensidade observada no modelo de máxima ocupação. No cenário intermediário, as reduções na velocidade nestes pontos em relação à ocupação atual situam-se entre 23% e 65% até 50 m, enquanto que no cenário de máxima ocupação sobem para o intervalo compreendido entre 50% e 90% para a mesma altura.

Figura 184 - Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos de comparação 1 a 10 do cenário de ocupação intermediária.

Nos primeiros pontos de comparação o que se torna mais evidente é a aceleração do vento em níveis mais elevados, sobretudo na condição de máxima ocupação. Tal aspecto decorre da elevação do gradiente de velocidades pelo contato com as edificações mais altas.

Figura 185 – Comparação dos perfis de velocidade calculados no Ponto de Comparação 1 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

No PC 2, além da elevação da velocidade nos pontos mais altos, também ocorre uma aceleração no cenário de ocupação máxima nas camadas mais baixas até superior à situação atual. Como se trata de um dos primeiros pontos a receber o vento, a ocupação máxima representa uma condição mais permeável ao vento, acelerando-o próximo ao chão.

Figura 186 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 2 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

A partir do PC 3, e nos demais pontos locados no interior dos cenários, as velocidades tendem a ser menores em comparação com a situação atual. As reduções no modelo de máxima ocupação situam-se entre 50% e 90%, enquanto que o modelo de ocupação intermediária registra diminuições da ordem 30% a 70%, como se observa nos gráficos a seguir. Por se tratarem

de pontos inseridos em quadras totalmente verticalizadas, o PC 3, PC 4 e PC 5 permitem comparar a diminuição da velocidade do ar entre os gabaritos máximo e intermediário.

Figura 187 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 3 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

Figura 188 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 4 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

Figura 189 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 5 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

A análise dos gráficos para os Pontos de Comparação 6, 7, 8 e 9 indica a influência dos cenários de ocupação máxima e intermediária no fluxo a sotavento do conjunto edificado. As maiores reduções em relação à situação atual são verificadas no modelo de máxima ocupação, o que caracteriza a criação de um vórtice de maiores dimensões nesse modelo. São diminuições nas velocidades dos fluxos que paulatinamente diminuem à medida que se caminha para o final do modelo: desde 80% nas camadas mais baixas no ponto 7, para 70% até 50 m de altura no ponto 8 e 60% nas cotas mais próximas ao chão no ponto 9.

O modelo intermediário, por sua vez, apresenta reduções menos significativas, o que indica que o vórtice criado depois das edificações presentes neste cenário não assume grandes proporções, permitindo uma recirculação do ar para os pontos localizados após o cenário, como atestam os gráficos para os pontos 6, 7, 8 e 9.

Com base na avaliação dos planos verticais e dos pontos de verificação do perfil de velocidades a leste é possível concluir que o modelo de ocupação máxima apresenta um comprometimento maior das condições de ventilação após o modelo. Em suma, das avaliações realizadas para o vento a leste, pode-se inferir que a permissividade da legislação poderia conduzir a uma diminuição na ventilação natural em trechos a sotavento da área de estudo.

Figura 190 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 6 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

Figura 191 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 7 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

Figura 192 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 8 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

Figura 193 - Comparação dos perfis de velocidade calculados nos Ponto de Comparação 8 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

Analisando os pontos no interior de quadras completamente verticalizadas é possível realizar uma comparação mais precisa das diferenças entre os cenários de máxima ocupação e intermediária. Procurou-se avaliar o comprometimento da ventilação natural ao adotar-se uma altura maior das edificações ou uma maior taxa de ocupação, representadas pelos modelos de máxima ocupação e ocupação intermediária, respectivamente.

Isolando, portanto, os pontos de comparação 2, 3, 4, 11 e 12, o que se torna mais evidente é a alteração estrutural dos perfis de velocidade até os 60 m de altura nos dois cenários, como demonstram os gráficos a seguir (figura 194 e 195).

Figura 194 - Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos localizados nos centros de quadra do modelo de ocupação máxima.

Figura 195 - Perfis de velocidades até 100 m de altura nos pontos localizados nos centros de quadra do modelo de ocupação intermediária.

Entretanto, ressalta-se que a redução nas velocidades registradas em cada um dos pontos é mais significativa no modelo de máxima ocupação. O que permite apreender que, mantendo-se uma mesma área de ocupação das edificações em valores próximos, a elevação no gabarito passa a comprometer a circulação do ar também em camadas mais baixas.

Analisando o ponto 3, localizado ao centro da quadra 9, a redução das velocidades verificadas até 50 m no cenário de máxima ocupação do solo é de 10% a 25% menor do que no modelo de ocupação intermediária.

Figura 196 - Comparação dos perfis de velocidade calculados no Centro da Quadra 9 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

Da mesma forma, o ponto 4, localizado no interior da quadra 17, indica a diminuição da velocidade do ar em até 15% a 45% em relação aos valores observados no modelo intermediário.

Figura 197 - Comparação dos perfis de velocidade calculados no Centro da Quadra 17 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

No ponto 12, localizado no centro da quadra 19 e ainda mais no interior dos cenários, a observação dos perfis indica uma condição mais aproximada entre as velocidades verificadas nos modelos, com as maiores reduções ainda no cenário de máxima ocupação, como atesta o gráfico a seguir (figura 198).

Figura 198 - Comparação dos perfis de velocidade calculados no Centro da Quadra 19 entre os cenários atual, máximo e intermediário.

As simulações do vento durante o segundo semestre evidenciam as mesmas características atribuídas aos fluxos durante o primeiro semestre. O que se observa, no entanto, é uma discreta tendência à diminuição nas proporções dos vórtices gerados com a inserção de uma velocidade maior na entrada do modelo. Contudo, salienta-se que o efeito dos edifícios mais altos sobre o comportamento do vento é semelhante ao que foi verificado na simulação para a condição do primeiro semestre.

As imagens referentes às simulações para o vento durante o segundo semestre nos três cenários elaborados encontram-se no Apêndice 2.

4.2 Simulações com vento a sudeste

A simulação da situação atual com vento a sudeste apresentou convergência satisfatória. Foram aplicados os mesmos níveis de refinamento adotados para as primeiras simulações a leste e as equações de massa e momento estabilizam-se após cerca de 110 interações, como se observa na figura 199 a seguir.

A simulação da ocupação máxima com vento a sudeste passou por uma série de testes até que apresentasse convergência satisfatória e o próprio aspecto dos resultados estivessem compatíveis com a qualidade apresentada pelos demais. Dessa forma, trabalhou-se a quantidade de prismas e tetraedros dentro dos limites e, alterando os parâmetros de tamanho mínimo de elementos para 4, alcançou-se uma estabilização das equações após 120 interações, aproximadamente, como demonstra o gráfico (figura 200).

Figura 199 - Convergência da simulação da situação atual com orientação sudeste.

Figura 200 - Convergência da simulação da ocupação máxima com orientação sudeste.

No modelo de ocupação intermediário foram aplicados os mesmos valores para o tamanho dos elementos utilizados no cenário de máxima ocupação e a convergência com RMS inferior a 1×10^{-4} foi alcançada também após 110 interações.

Os modelos a sudeste assumiram um peso maior para as malhas confeccionadas, o que indica que a posição dos obstáculos em relação ao domínio tem reflexos na quantidade de elementos e, em consequência, nos tempos de processamento.

Figura 201 - Convergência da simulação da ocupação intermediária com orientação sudeste.

De maneira geral, evidencia-se que as simulações do vento a sudeste apresentaram uma proporção menor de áreas estagnadas em comparação às simulações do vento a leste. Essas áreas apresentavam, ainda, aspecto mais alongado e estreito. Tal aspecto deve-se a posição do conjunto de edifícios altos, que provocam uma diminuição da sua intensidade pelo efeito de barreira, porém com dimensões menores pelo fato da menor face estar perpendicular ao sentido do vento, com maiores possibilidades de permeabilidade ao vento.

4.2.1 Visualização a 1,5 m do solo

Analisando-se os contornos de velocidade a 1,5 m do piso, é possível observar a aceleração do vento principalmente no início de algumas vias paralelas ao sentido do vento a sudeste. Tal fato deve-se à canalização provocada pelas laterais das edificações nas ruas longitudinais do modelo, agora percebidas mais claramente se comparadas à simulação com vento a leste.

Como se observa na figura 202, a seguir, o conjunto de edifícios altos ao centro do cenário (Condomínio Parque Del Sol) tem seu efeito de barreira minimizado pela aceleração do fluxo devido ao forte efeito de canalização, atingindo velocidades próximas a 2,0 m/s nesse trecho, destacado pelo círculo A. A disposição das torres residenciais formando um corredor para o escoamento do ar determina a criação de um vórtice mais alongado em direção à borda noroeste do modelo. A zona de desaceleração é nitidamente menor em comparação ao modelo simulado com vento a leste.

Próximo à borda sudoeste do cenário, no entanto, o conjunto de torres apresenta um forte efeito de barreira, gerando uma zona de desaceleração mais evidente,

concentrando velocidades mais baixas (entre 0 e 0,3 m/s) junto às edificações de menor gabarito a sotavento, evidenciadas pelo círculo B.

Figura 202 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste durante o primeiro semestre.

Com a inserção do grande número de edificações permitido pelo modelo de máxima ocupação é possível observar um grande vórtice formado ao final do conjunto edificado, localizado junto às residências de baixo gabarito mais próximas da borda noroeste do cenário, demarcado pelo círculo A. Essa área de estagnação do ar, com velocidades abaixo de 0,2 m/s, apresenta dimensões superiores a 500 m, configurando o grande impacto provocado pelas torres na circulação do ar nessa cota.

O vórtice verificado após o conjunto de sete torres anteriormente na ocupação atual agora se associa às demais torres propostas para gerar uma área de desaceleração dos fluxos mais intensa, como se destaca pelo círculo B.

O que mais chama atenção nesse modelo, no entanto, são os significativos efeitos de canalização do fluxo entre os edifícios e vias no mesmo sentido do fluxo. Tal configuração espacial diminui a possibilidade de verifica-se grandes trechos de circulação do ar mais lentos no interior do cenário, como se observa a seguir na figura 203.

Figura 203 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da ocupação máxima com vento a sudeste durante o primeiro semestre.

No modelo intermediário de ocupação do solo o comportamento do ar assume características semelhantes àsquelas observadas no cenário de máxima ocupação. O principal vórtice apresenta praticamente as mesmas dimensões vistas anteriormente e destacada pelo círculo A, mas situa-se dentro dos limites do domínio, o que indica que a área a sotavento alterada pelo conjunto edificado é menor, aspecto que se deve à menor altura dos edifícios.

Figura 204 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da ocupação máxima com vento a sudeste durante o primeiro semestre.

Com a visualização através de vetores (figura 205) é possível identificar os desvios na direção natural dos fluxos devido ao contato com os edifícios. No caso, com o plano de observação situado a 1,5 m do solo, é mais evidente a alteração no escoamento do ar na área imediatamente após os edifícios altos a sudoeste.

Figura 205 – Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudoeste.

No detalhe, o efeito de barreira no canto sudoeste é causado pela posição dos edifícios perpendicularmente ao fluxo, gerando uma grande zona de estagnação (figura 206). Na porção central do cenário, no entanto, a disposição dos edifícios em corredor garante velocidades mais elevadas pelo efeito de canalização, com se observa na figura 207, a seguir.

Figura 206 - Detalhe dos vetores a 1,5 m do solo próximos ao conjunto verticalizado a sudoeste do modelo

Figura 207 - Detalhe dos vetores a 1,5 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do modelo

Visualizando os vetores a 1,5 m do solo no modelo de ocupação máxima, a canalização que ocorre entre as vias longitudinais presentes no cenário é reforçada (figura 208).

Figura 208 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.

Ao adentrar o cenário, no entanto, o maior desvio ocorre junto às torres do Condomínio Parque Del Sol (círculo A). A alteração contribui para a geração do grande vórtice a sotavento.

No cenário de ocupação intermediária, a percolação do vento em direção ao interior do cenário também ocorre devido ao espaçamento entre os edifícios e presença de vias (círculo B).

Figura 209 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.

No detalhe são comparadas as duas formas de ocupação do solo e a permeabilidade ao vento. Após as edificações mais altas, no entanto, é possível perceber que no modelo de máxima ocupação os desvios resultam em vetores mais lentos juntos às residências na região a sotavento, como mostram as figuras 210 e 211.

Figura 210 - Permeabilidade ao vento a partir das vias e espaços entre edificações na ocupação intermediária.

Figura 211 – Permeabilidade ao vento a partir das vias e espaços entre edificações na ocupação máxima.

4.2.2 Visualização a 10 m do solo

A 10 m do solo ocorre um aumento nas dimensões do vórtice observado a sudoeste do modelo, destacado pelo círculo A. Mesmo com a presença de efeitos de canto ou esquina ainda mais claros, o que se evidencia é um prolongamento do efeito de desaceleração a sotavento do conjunto edificado até próximo da borda noroeste do cenário. A presença de zonas de velocidades mais baixas, próximas a 0,5 m/s, torna-se mais visível nesta parte do modelo, como atestado pela visualização dos contornos de velocidades (figura 212).

Figura 212 – Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste.

Com a ocupação mais espaçada adotada pelas torres no cenário de máxima ocupação, mesmo diante um adensamento construtivo maior, a 10 m do solo ocorre uma divisão na forma do principal vórtice que contribui para minimizar os seus reflexos negativos sobre a circulação do vento, aspecto destacado no círculo A.

Observa-se que a região com velocidades abaixo de 0,3 m/s ainda apresenta grandes dimensões, atingindo cerca de 750 m. No entanto, o estreitamento desta passa a representar menos impactos negativos para a ventilação da região posterior do cenário, como demonstra a figura 213, a seguir.

Figura 213 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da ocupação máxima com vento a sudeste.

Ao contrário, no cenário de ocupação intermediária, apesar das edificações apresentarem altura menor do que no modelo de máxima ocupação, a área de estagnação do ar é marcadamente maior, representando, sobretudo, uma diminuição significativa nas velocidades sobre as residências de baixo gabarito ali situadas.

O aspecto de divisão dos trechos de baixas velocidades não ocorre mais, apesar dos efeitos de canalização ao longo das vias e espaços entre edifícios se apresentarem com aspectos e velocidades semelhantes, acima de 2,8 na entrada e entre 1,7 e 2,4 ao longo destes trechos. Dessa forma é possível concluir que a influência da taxa de ocupação sobre a permeabilidade do vento em alturas médias parece ser mais significativa no âmbito local.

Figura 214 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da ocupação intermediária com vento a sudeste.

Faz-se necessário, portanto, examinar o que ocorre na entrada de vento junto às primeiras edificações nesses dois cenários.

Próximo da fronteira sudeste, nos dois cenários, a aceleração dos fluxos ao longo das vias e entre os edifícios é evidente, com sombras de vento mais estreitas e localizadas junto aos prédios. No cenário de ocupação máxima (figura 216), no entanto, são verificados mais trechos com velocidades acima entre 2,8 e 3,0 m/s, aspecto decorrente da menor ocupação do solo em detrimento de uma maior verticalização. Paralelamente, os trechos com velocidades abaixo de 0,7 m/s são mais alongados no modelo de máxima ocupação, o que, em consequência, acaba gerando maiores zonas de estagnação do vento.

Figura 215 - Caracterização do fluxo junto às primeiras edificações no cenário de ocupação intermediária.

Figura 216 - Caracterização do fluxo junto às primeiras edificações no cenário de ocupação máxima.

Analisando os fluxos no plano de observação a 10 m do solo através de vetores, na situação atual, os edifícios altos ao centro do modelo provocam efeito de barreira mais alongado, porém menos intenso. Tal aspecto possibilita uma recirculação do ar, amenizando o impacto das torres de grande altura devido à presença de um espaço relativamente grande entre estas, conformando um corredor onde são verificadas velocidades acima de 2,20 m/s (círculo A). O efeito de canto ou esquina nos dois primeiros edifícios ao centro do conjunto é mais evidente (círculo A). Próximo da borda sudoeste do modelo ocorre um desvio para a lateral do cenário, como se observa na figura 217 em seu destaque através do círculo B.

Figura 217 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste.

No plano de observação a 10 m do solo, os vetores apresentados para a ocupação máxima indicam o aumento do efeito de aceleração devido a canalização ao longo das vias, destacadas pelo círculo A. A essa altura é possível notar, também, que se forma uma área de redução das velocidades acima das edificações mais baixas localizadas atrás do Conjunto do Parque Del Sol.

O formato do vórtice principal gerado pelo conjunto afunila-se em direção à borda noroeste, como demonstra a figura 218. Comparando com o modelo de ocupação intermediária o que ocorre é apenas o deslocamento do maior vórtice em direção à lateral do cenário, mas as características de desvios e acelerações é bastante semelhante, como é possível avaliar observando a figura 219.

Figura 218 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.

Figura 219 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.

4.2.3 Visualização a 32 m do solo

Quando observados os contornos de velocidades no plano a 32 m do solo, o resultado é o estreitamento do efeito de barreira verificado no conjunto a sudoeste do modelo. O efeito de canalização entre os primeiros edifícios neste trecho ainda persiste, atingindo valores mais elevados, entre 2,6 m/s e 3,0 m/s.

A zona de desaceleração imediatamente posterior às torres apresenta-se de forma mais homogênea e os efeitos de canto são intensificados. Para os demais edifícios de grande altura presentes na área de estudo, confirma-se o grande efeito de canalização do vento a sudeste entre estes, aspecto que se deve a posição destes prédios, o que ameniza o efeito da reunião destas edificações.

Figura 220 – Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste.

Ademais, velocidades acima de 2,6 m/s são verificadas na maior parte do modelo, uma vez que retratam grandes trechos desobstruídos, garantindo a continuidade do fluxo de vento a sudeste.

Nos cenários de ocupação máxima e intermediária a aceleração que ocorre através do espaço desobstruído das ruas Araújo Torreão, Elizário Mendes e Farias Lemos é reforçada. O que cabe destacar é a continuidade dos fluxos mais intensos até o interior do cenário de ocupação máxima, enquanto que no modelo intermediário tal efeito diminui paulatinamente.

O vórtice formado a sotavento também apresenta diferenças marcantes. No caso do modelo de máxima ocupação apresenta-se mais alongado, porém mais estreito, enquanto que no cenário intermediário as formas das zonas de estagnação do fluxo são mais concentradas.

No centro do cenário intermediário são verificados mais trechos com velocidades abaixo de 1,0 m/s em comparação com a máxima ocupação permitida, como demonstram as figuras 221 e 222, a seguir. Nas laterais dos modelos, trechos mais acelerados entre 2,4 e 3,2 m/s.

Figura 221 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de máxima ocupação com vento a sudeste.

Figura 222- Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.

Os efeitos de cantos são mais localizados enquanto que a canalização do vento é mais evidente como nos detalhes comparando os modelos de ocupação intermediária e máxima (figuras 223 e 224). Com a aproximação é possível observar melhor a geração de pequenos vórtices no cenário intermediário, aspecto que se deve ao aumento na taxa de ocupação do solo.

Figura 224 – Caracterização do fluxo junto às primeiras edificações no cenário de ocupação intermediária a 36 m do solo.

Figura 223 – Caracterização do fluxo junto às primeiras edificações no cenário de ocupação máxima a 36 m do solo.

Os vetores a 36 m do solo na situação atual reforçam os desvios provocados pelas edificações mais altas. A diferença em relação ao vento a leste é a diminuição na largura destes.

Figura 225 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste.

Ampliando os vetores para analisar os desvios a 36 m do solo na região próximo ao conjunto de edifícios a sudoeste do modelo, o que se realça é a canalização do vento nos espaços entre esses prédios. Nesse mesmo trecho também são observados dois vórtices de grandes dimensões localizados sobre as edificações mais baixas após as torres residenciais (figura 226).

Em relação aos prédios na porção central do modelo, o efeito de canto combina-se com a canalização que ocorre entre as torres para acelerar ainda mais o fluxo incidente, como demonstra a figura 227.

Figura 226 – Detalhe dos vetores a 32 m do solo próximos ao conjunto verticalizado a sudoeste do modelo.

Figura 227 – Detalhe dos vetores a 32 m do solo próximos ao conjunto verticalizado ao centro do modelo.

Os vetores a 36 m do solo sobre os cenários de máxima ocupação do solo e proposta de ocupação intermediária apresentam como principal diferença a proximidade do principal vórtice gerado. No modelo de ocupação máxima, a área com vetores de velocidades abaixo de 0,6 m/s é afastada dos edifícios, estando grande parte localizada na zona a sotavento desprovida de obstáculos. No modelo de ocupação intermediária, por sua vez, os vetores nesse intervalo ainda se localizam junto às edificações, e, mais especificamente, sobre o conjunto de residências de baixo gabarito, como é observado nas figuras 228 e 229, a seguir.

Figura 228 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.

Figura 229 - Visualização dos vetores da direção e velocidade do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste.

Com o objetivo de avaliar a permeabilidade ao vento nos cenários de máxima ocupação e modelo intermediário, ampliou-se a região próxima aos primeiros edifícios junto à borda sudeste.

Os efeitos de canalização são semelhantes. Entretanto, no modelo de ocupação máxima ainda é possível verificar a presença de vetores com velocidades acima de 2,3 m/s após as primeiras quadras, enquanto que no cenário de ocupação intermediária a maior quantidade está no intervalo entre 1,3 m/s e 2,0 m/s, como atestam as figura 230 e 231.

Figura 230 - Permeabilidade ao vento a partir das vias e espaços entre edificações na ocupação intermediária a 36 m do solo.

Figura 231 - Permeabilidade ao vento a partir das vias e espaços entre edificações na ocupação máxima a 36 m do solo.

4.2.4 Streamlines

As *streamlines* confirmam a presença dos dois principais vórtices provocados pelos edifícios mais altos a sudoeste e o efeito de canalização entre os prédios ao centro do modelo da atual ocupação da área.

Figura 232 - Visualização do escoamento do vento a sudeste sobre o cenário atual através de *streamlines*

No modelo de máxima ocupação, à semelhança do que ocorreu na simulação do vento a leste, as *streamlines* identificam a elevação do fluxo devido à diferença na altura dos edifícios, uma vez que o vento atravessa edifícios de 16 pavimentos antes de encontrar os prédios de 24 andares previstos pelo cenário, como se percebe na figura 233, a seguir.

Figura 233 - Visualização do escoamento do vento a sudeste sobre o cenário de ocupação máxima através de *streamlines*

No cenário de ocupação intermediária as *streamlines* de maior velocidade ocorrem ao adentrar a área entre os edifícios. Analogamente à visualização do cenário de máxima ocupação os vórtices estão caracterizados como as zonas turbulentas em que as *streamlines* sofrem maiores desvios e revoluções.

Ao contrário da ocupação máxima, neste cenário não se observa a elevação dos fluxos, permanecendo, de forma geral, um pouco acima dos edifícios, como mostra a figura 234.

Figura 234 - Visualização do escoamento do vento a sudeste sobre o cenário de ocupação intermediária através de *streamlines*

4.2.5 Planos verticais

Somando-se à avaliação dos perfis de velocidades, os planos verticais traçados ao longo dos modelos com vento a sudeste retratam a presença de vórtices mais alongados em relação à borda oposta a entrada do vento.

Como se observa no centro do cenário representando a situação atual, ao encontrar os edifícios mais altos deste modelo, o fluxo gera uma sombra de vento com dimensões consideráveis, e, por 250 m, aproximadamente, a circulação de ar registra velocidades abaixo de 0,5 m/s, aspectos evidentes na figura 235.

No espaço entre os edifícios as condições de ventilação são profundamente alteradas, como indicam os vetores apresentados na figura 236. Os vórtices criados acabam gerando zonas de recirculação, porém com velocidades mais baixas, uma vez que o desvio sofrido pelo vento parece ser mais significativo em comparação com os efeitos de barreira observados com vento a leste, como demonstra a figura 236.

Figura 235 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário da condição atual com vento a sudeste.

Figura 236 - Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo na parte central do cenário da situação atual e os vórtices nos espaços entre os prédios com vento a sudeste.

A parte mais a sudoeste do cenário de ocupação atual apresenta uma menor influência sobre o vento em pontos mais elevados. O que se percebe pela avaliação das linhas de contorno é que o campo de velocidades aumenta de forma gradual com a altura (figura 237). Como esta parte do modelo ainda apresenta edificações baixas, os desvios sofridos pelo fluxo se concentram nas áreas junto às edificações, como demonstram os vetores gerados próximo a esta região (figura 238).

Figura 237 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical a sudoeste do cenário da condição atual com vento a sudeste.

Figura 238 - Detalhe dos desvios menos intensos sofridos pelo fluxo a sudoeste do cenário de ocupação atual.

A simulação do vento a sudeste sobre o cenário da máxima ocupação permitida caracterizou as proporções do vórtice gerado após o conjunto verticalizado. Trata-se de um trecho onde a influência das edificações na velocidade do ar é percebida por 700 m, aproximadamente. Nesse trecho, destacado pelas linhas verticais, a intensidade do vento situa-se abaixo de 1,5 m/s, formando uma área de estagnação que contribui para o agravamento das condições de ventilação na região a sotavento da área de estudo, como nota-se na figura 239.

A observação do plano vertical em vista lateral permite inferir que até os 150 m de altura a influência dos edifícios sobre o comportamento do vento é significativa, como mostra a figura 240.

Figura 239 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical a sudoeste do cenário de máxima ocupação permitida com vento a sudeste.

Figura 240 – Vista lateral do plano vertical para o trecho central do cenário de máxima ocupação caracterizando o vórtice após o conjunto de edifícios altos.

Os desvios sofridos pelo fluxo diminuem a intensidade dos vetores ao adentrar o modelo. Ao entrar em contato com o primeiro obstáculo representado pelo edifício de 72 m de altura, o fluxo se eleva e inicia um processo de desaceleração. Como resultado, uma área com vetores com velocidade abaixo de 1,0 m/s é gerada após o conjunto do Parque Del Sol, como demonstra a figura 241.

Figura 241 – Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo de vento a sudeste ao encontrar os primeiros edifícios ao centro do modelo de máxima ocupação.

Mais a sudoeste do cenário a influência dos edifícios altos sobre o vento é menor, uma vez que o fluxo atravessa uma área, também, de menor comprimento. A alteração na região posterior aos edifícios é bem mais contida, correspondendo a um trecho de 200 m, aproximadamente, onde são verificadas velocidades abaixo de 1,0 m/s.

Figura 242 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical a sudoeste do cenário de máxima ocupação permitida com vento a sudeste.

No cenário de ocupação intermediária, a visualização dos planos verticais reforçou os resultados encontrados nos planos horizontais. No caso, a simulação de uma proposta de redução do gabarito e aumento na taxa de ocupação provocou a diminuição da influência dos

edifícios na região a sotavento. No interior do cenário, no entanto, são observados mais trechos de desaceleração junto aos edifícios, como é possível verificar comparando os contornos de velocidade para o trecho ao centro do modelo, apresentado na figura 243.

Figura 243 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical ao centro do cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.

Analisando o plano vertical em vista lateral (figura 244), ao centro do modelo de ocupação intermediária as áreas de desaceleração mais significativa (abaixo de 0,5 m/s) ainda estão localizadas entre os edifícios. Em contrapartida, a região logo após o conjunto edificado já apresenta valores acima de 1,0 m/s.

Figura 244 - Vista lateral do plano vertical para o trecho ao centro do cenário de ocupação intermediária caracterizando o vórtice após o conjunto de edifícios.

Reforçando os efeitos discutidos anteriormente, a observação do plano vertical a sudoeste do modelo de ocupação intermediária revela o deslocamento dos vórtices. No cenário de ocupação máxima estes surgem após o conjunto e no modelo intermediário aparecem mais próximo dos edifícios, como se evidencia na figura 245.

Figura 245 - Perspectiva dos contornos de velocidade no plano vertical a sudoeste do cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste.

Os desvios sofridos pelo fluxo são semelhantes aos verificados na condição de máxima ocupação em direção às laterais do cenário, como atesta a figura 246.

Figura 246 - Detalhe dos desvios sofridos pelo fluxo de vento a sudeste ao encontrar os primeiros edifícios a sudoeste do modelo.

Tomando como base a maior taxa de ocupação do solo registrada neste cenário e a visualização dos intervalos de velocidades registrados nos trechos entre os edifícios torna-se necessário avaliar os efeitos de desaceleração devido à maior área ocupada pelos prédios, calculando-as em pontos específicos.

4.2.6 Pontos de verificação e comparação

Da mesma maneira que ocorreu nas simulações com vento a leste, foram inseridos pontos de comparação dos perfis de velocidade como forma de analisar as alterações no comportamento do vento em trechos dos modelos de ocupação atual, máxima e intermediária.

A localização do ponto 11 é usada para indicar o resultado do contato do fluxo inalterado ao encontrar as primeiras edificações, representando um perfil de velocidades da menor interferência das edificações desse trecho sobre o fluxo de ar.

Os pontos 12, 13, 14 e 15 estão localizados entre as edificações, servindo de comparação das condições de ventilação locais. OS pontos 16, 17, 18 e 19, entretanto, indicam a influência de cada cenário na região a sotavento a 200 m, 400 m, 600 m e 800 m, respectivamente.

Figura 247 - Pontos de comparação dos perfis de velocidade no cenário de ocupação atual com vento a sudeste.

Através do gráfico (figura 248) é possível perceber que no ponto 12 ocorre uma sensível diminuição na intensidade do fluxo até os 5 m de altura, quando então o perfil tende a assumir as condições naturais. Tal aspecto é também verificado no ponto 3, mas devido ao fato deste ponto situar-se mais no interior do cenário, a redução nas velocidades é sentida até próximo aos 100 m de altura.

Apesar da aceleração do escoamento entre os edifícios altos ao centro do modelo, o ponto 14 registra a maior influência da rugosidade desse trecho sobre o comportamento do

vento. Tal aspecto é reforçado pelo perfil de velocidades apresentado pelo ponto 15, correspondente a um terreno a sotavento.

Os perfis localizados a sotavento apresentam suas curvas aproximando-se da condição verificada no P11 a medida em que se afastam mais das edificações, como atesta o gráfico (figura 248).

Figura 248 – Perfis de velocidade segundo a altura no cenário atual para o vento a sudeste.

No modelo de máxima ocupação os pontos 12, 13 e 14 passam a configurar trechos extremamente alterados pela verticalização, como se observa na figura 249, a seguir. O reflexo de tais condições na velocidade do ar no ponto 12 são reduções da ordem de 50% a 70% antes dos 50 m de altura comparadas à condição atual.

Entretanto, no ponto 13 ocorrem acelerações do vento até os 30 m de altura em relação à situação existente. Tal aspecto se deve, possivelmente, à presença de outras edificações, uma vez que na situação atual o P13 representa a primeira barreira de grande altura verificada no trecho.

Tal aspecto é ainda reforçado pelas velocidades calculadas nos pontos 14 e 15, que apresentam reduções menos significativas do que o que foi verificado no ponto 12. Nesses locais ainda mais inseridos no cenário as velocidades apresentaram reduções menos significativas, entre 30% e 50% a menos do que a situação atual, o que permite inferir que ocorre uma relativa aceleração junto às demais edificações verticais desse modelo.

Figura 249 - Pontos de comparação dos perfis de velocidade no cenário de máxima ocupação com vento a sudeste.

As reduções nas velocidades nos pontos 16, 17, 18 e 19 são significativamente maiores em relação à situação verificada atualmente. São valores entre 20% a 30% menores até os 50 m de altura e de 35% a 55% acima dos 70 m de altura, o que indica o impacto a sotavento do conjunto verticalizado permitido pela legislação.

Figura 250 - Perfis de velocidade segundo a altura nos pontos de comparação para o cenário de máxima ocupação para o vento a sudeste.

No cenário de ocupação intermediária, a avaliação dos perfis de velocidade nos pontos de comparação aponta para a aceleração em alguns trechos e diminuição em outros se comparada à proposta de ocupação máxima.

Figura 251 - Pontos de comparação dos perfis de velocidade no cenário de máxima ocupação com vento a sudeste.

Da avaliação através do gráfico apresentado pela figura 252 é possível notar as semelhanças nas curvas entre os dois cenários. No ponto 12, apesar de bastante próximas, as maiores velocidades até 50 m do solo são registradas no modelo de máxima ocupação.

Nos pontos 13 e 14 a situação se inverte, mas salienta-se que os valores situam-se bastante próximos.

Em todo o trecho a sotavento, representado pelos pontos 15, 16, 17, 18 e 19, o que se observa é que a intensidade dos fluxos sofre pequenas reduções em relação à situação atual. A perturbação do vento atinge valores de 5% a 15% mais baixos do que aqueles apontados pela situação atual até 50 m de altura.

Ainda, devido à menor altura dos edifícios nesse cenário, os perfis tendem a apresentar o mesmo comportamento pouco depois dos 150 m de altura, como se observa na figura 252. No cenário de máxima ocupação, por sua vez, as curvas se unificavam apenas depois dos 200 m de altura, representando o topo da camada acima das coberturas.

Figura 252 - Perfis de velocidade segundo a altura nos pontos de comparação para o cenário de máxima ocupação para o vento a sudeste.

No ponto de comparação 12 são observadas reduções significativas nas velocidades do vento acima dos 20 m de altura, entre 50% e 75% mais lento do que a situação atual. Nas cotas mais altas do cenário intermediário (acima dos 70 m) ocorre uma aceleração do fluxo.

Figura 253 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 12.

No ponto 13 ocorre uma aceleração do fluxo nos cenários máximo e intermediário em relação à atual situação. A presença de torres canalizando os fluxos no espaço entre estas, como observado nos detalhes apresentando os vetores para a região próxima à entrada do vento a sudeste, gera fluxos uma circulação mais intensa do ar nas camadas mais baixas, como mostra o gráfico a seguir (figura 254)

Figura 254 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 13.

Devido à ocupação mais adensada no ponto de comparação 14, os fluxos para os três cenários apresentam-se bastante próximos, como se observa a seguir.

Figura 255 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 14.

A partir do ponto 16 é possível medir os impactos a sotavento do conjunto edificado em cada cenário. As maiores reduções nas velocidades são apresentadas pelo cenário de máxima ocupação, onde os valores na região do vórtice foram de 20% a 55% mais lentos do que a condição atual. Nos gráficos para os pontos 16, 17, 18 e 19, a seguir, o que se observa é a proximidade dos valores entre o cenário intermediário e a condição atual, o que permite concluir que nesse cenário a redução do vento a sotavento é bastante menor do que no modelo de máxima ocupação, ainda que a taxa de ocupação seja maior.

Figura 256 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 16.

Figura 257 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 17

Figura 258 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 18.

Figura 259 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no ponto 19.

Visando a comparação das velocidades no meio construtivamente adensado dos cenários foram inseridos pontos para verificação dos perfis de velocidade em centros de quadras totalmente verticalizadas com vento a sudeste.

Figura 260 – Pontos nos centros de quadra para avaliação do vento a sudeste.

Com base nos perfis de velocidade calculados para esses pontos, apresentados nas figuras 261 e 262, é possível afirmar que em todos os trechos nos centros de quadra com vento a sudeste o cenário de ocupação máxima apresentou condições de vento mais aceleradas

Figura 261 – Perfis de velocidades nos centros de quadra do cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste

Figura 262 – Perfis de velocidades nos centros de quadra do cenário de máxima ocupação com vento a sudeste

Numa primeira análise dos gráficos é possível notar que, nos níveis mais próximos do solo, o cenário de ocupação intermediária apresenta maiores atrasos nas curvas em todos os pontos que caracterizam o perfil logarítmico de velocidades nos centros de quadra em relação ao cenário de máxima ocupação.

Nos pontos 2, 3 e 4, localizados nos centros das quadras 2,9 e 17, respectivamente, o fluxo é acelerado em contato com os edifícios, o que faz com que as velocidades nos níveis mais baixos até 20 m sejam mais elevadas do que a situação atual. Até os 30 m, mesmo com a verticalização que ocorre no cenário de máxima ocupação, a velocidade é mais elevada do que o modelo intermediário, como demonstra o gráfico a seguir (figuras 263, 264 e 265).

Figura 263 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 2.

Figura 264 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 9.

Figura 265 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 17.

A aceleração que ocorre junto às primeiras camadas nos centros das primeiras quadras persiste em partes mais adensadas dos modelos de máxima ocupação e intermediário. Dessa forma, é possível concluir que para o vento a sudeste, que registrou menos áreas de estagnação pela maior permeabilidade ao vento devido, também gerou melhores condições de ventilação no interior das quadras.

Nos pontos 11 e 12, dispostos no centro das quadras 21 e 19, respectivamente, ainda é necessário ressaltar que os intervalos de velocidade registrados no modelo de máxima ocupação superaram os valores verificados no cenário intermediário em até 60%, como demonstram os gráficos a seguir (figuras 266 e 267). Por volta dos 60 m de altura, entretanto, as velocidades são superiores no cenário intermediário.

Tal aspecto permite inferir, também, acerca do potencial de redução da circulação do ar a alturas mais baixas em modelos com maior taxa de ocupação em detrimento de uma menor altura das edificações.

Figura 266 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 21.

Figura 267 - Comparação dos perfis de velocidade entre os cenários atual, máximo e intermediário no centro da quadra 19.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo inicial desta pesquisa era identificar o impacto da verticalização e do adensamento construtivo permitidos por legislação em parte da cidade de Fortaleza utilizando um aplicativo de *cfD*.

Antes de tratar especificamente da ventilação natural intra-urbana, o estudo abordou temas como legislação urbanística e planejamento, atuação do mercado imobiliário e expansão urbana. O propósito era apreender os processos envolvidos nas transformações do espaço na cidade na tentativa de prever os seus desdobramentos e reflexos nas condições ambientais urbanas.

As avaliações do comportamento do vento na área de estudo foram feitas comparando os resultados dos cenários de ocupação máxima e intermediária com a situação existente e, posteriormente, entre si.

A velocidade do ar foi o parâmetro de medição das condições de ventilação em cada trecho analisado, uma vez que para a condição quente e úmida do clima de Fortaleza é fundamental uma maior intensidade no movimento do ar tanto no interior da edificação como no espaço urbano. A sua redução significa, portanto, o comprometimento do conforto térmico com implicações no desempenho energético do espaço construído.

A realização das simulações para as duas direções predominantes do vento permitiu a comparação dos resultados considerando as características típicas do comportamento do vento na capital cearense, ao mesmo tempo em que a investigação utilizando o critério de comparação dos resultados ganhava em complexidade pelo aumento na quantidade de dados.

Como forma de avaliar mais apropriadamente as condições de ventilação em Fortaleza, durante o exame de qualificação, a professora Dra. Eleonora Sad de Assis chamou atenção para o fato da variação climática que ocorre entre os dois semestres, alterando, entre outros fatores, a velocidade do ar sobre a capital cearense. Com base em suas considerações foram adotadas velocidades médias para as orientações leste e sudeste isolando os dados para o primeiro e segundo semestres.

Entretanto, os resultados das simulações indicaram que, apesar da intensidade do vento diferenciar-se ao longo do ano, a formação de zonas de estagnação, desaceleração de fluxos e efeitos de canto, barreira e/ou esteira era semelhante nos modelos confeccionados, o que reforça o fato de que a forma urbana representa um forte condicionante nas condições de escoamento do ar, alterando estruturalmente o seu comportamento mesmo diante de uma variação na sua intensidade.

O uso da ferramenta de cfd

As etapas de planejamento e sistematização das simulações em *cfd* levaram uma considerável parte do tempo desta pesquisa. No entanto, acredita-se que tais fases foram fundamentais ao aprendizado para a utilização do programa, cujo amadurecimento refletiu na organização dos passos anteriores à geração dos resultados esperados pela investigação.

Os tempos de processamento para cada uma das simulações no módulo *solver* oscilaram entre 5 e 7 horas. A relativa agilidade no cálculo das simulações, mesmo contando com malhas com valor total de elementos acima de 3.500.000, permitiu a realização de alguns testes de refinamento para cada malha gerada, observando-se, no entanto, a capacidade de processamento disponível. Como resultado, em praticamente todas as situações simuladas, o refinamento da malha gerada situou-se próximo ao limite da capacidade de processamento para o computador utilizado, contando com 4 gb de memória RAM.

A impossibilidade de utilizar o cálculo de simulações em paralelo, em que são utilizados mais computadores conectados, deveu-se à modificação na rede do LABAUT. Assim, tornou-se fundamental observar atentamente tais limites computacionais como forma de viabilizar os resultados.

A extrema simplificação da geometria dos edifícios estudados foi, portanto, necessária, sobretudo em trechos de edificações mais baixas nos modelos simulando a situação existente. Contudo, acredita-se que tal medida não teve impactos negativos nos resultados dos cenários, conseguindo-se reproduzir as condições gerais de ventilação verificadas no local.

Ainda como resultado da realização de uma etapa de testes, conseguiu-se calcular todas as simulações propostas (situação atual, ocupação máxima permitida e cenário intermediário) para os sentidos leste e sudeste com resultados satisfatórios, o que representa um ponto positivo por tornar possível a comparação dos modelos em todas as situações planejadas.

Acredita-se, ainda, que se tenha avançado no âmbito das simulações utilizando o aplicativo ANSYS CFX pela inserção de novos níveis de avaliação do comportamento do vento na escala urbana, sobretudo com o cálculo dos perfis em pontos específicos de cada cenário proposto, comparando-os segundo as reduções ou acelerações do ar em cada trecho.

Finalmente, salienta-se que a utilização de um programa de *cfd* aplicado à análise da ventilação natural no espaço urbano permite, efetivamente, ganhos em relação ao tempo consumido para realização dos experimentos. A modelagem dos cenários é feita de maneira relativamente rápida, se comparada à confecção de maquetes físicas, e a preparação das etapas anteriores aos cálculos podem, inclusive, ser melhoradas em pesquisas futuras, o que representa

a possibilidade de simular mais condições para comparação, contribuindo para a precisão e qualidade dos resultados.

A identificação do impacto da verticalização e do adensamento construtivo sobre a ventilação natural

Diante da existência de uma elevação do gabarito nesta zona da cidade permitida por lei, a investigação lançou o questionamento acerca dos impactos do aumento na altura das edificações em um trecho específico da malha urbana de Fortaleza para o seu entorno.

A observação dos contornos de velocidades e vetores nas alturas analisadas foi complementada com a avaliação dos perfis logarítmicos em diversos pontos no interior dos cenários elaborados. Com base nos intervalos de velocidades calculados, percentuais de redução das velocidades após o conjunto edificado e as dimensões nos vórtices criados a sotavento é possível concluir que a adoção de uma verticalização máxima como é permitida pela legislação urbana geraria um vórtice de maiores dimensões que, possivelmente, comprometeria o movimento do ar na região a sotavento da área de estudo.

As maiores reduções nas velocidades a sotavento do conjunto edificado foram verificadas no cenário de ocupação máxima. Confrontando com os dados referentes à ocupação intermediária, todos os pontos de comparação a sotavento das edificações no modelo de máxima verticalização apresentaram velocidades menores tanto em camadas mais baixas como em pontos mais elevados, com valores de 30% a 90% mais lentos do que as condições atuais de ventilação no trecho avaliado.

As *streamlines* evidenciaram, ainda, a elevação dos fluxos devido ao escalonamento das edificações, uma vez que o fluxo de vento encontra edifícios de 16 pavimentos situados fora do limite estabelecido pelo parágrafo único antes de passar por torres de 24 andares inseridas no trecho onde é permitida a máxima verticalização para esta zona da cidade. Tal aspecto tem impactos estruturais na circulação do ar nas regiões posteriores da área de estudo pela elevação do gradiente de vento.

A análise da interação entre prescrições urbanísticas sobre o comportamento do vento no local

Com a possibilidade de gerar dados de saída de forma rápida e de maneira relativamente simples no módulo do *cfx-post*, lançou-se mão de uma série de informações medidas em diversos pontos de verificação espalhados pelos três cenários. A idéia era comparar como as formas de ocupação propostas influenciavam a ventilação natural no âmbito local, uma vez que

já havia se caminhado no sentido de uma afirmativa acerca do impacto da verticalização permitida pela legislação para a escala urbana.

As observações da Dra. Alessandra Prata Shimomura durante o exame de qualificação e em outras oportunidades reforçaram a necessidade em organizar as medidas em pontos específicos dos modelos de ocupação estudados. A pesquisadora ainda orientou sobre as possíveis formas de sistematizar os seus resultados.

No entanto, apesar do estudo detalhar as condições de ventilação em diversos trechos, ocorre uma variação considerável nos resultados, o que impede uma afirmação mais precisa quanto aos impactos de determinada forma de ocupação na circulação do vento em meio às edificações, comprometendo a ventilação de fachadas, por exemplo.

Foram 39 pontos de medição dos perfis de velocidade do ar. Desse total, 26 se encontravam efetivamente em meio ao conjunto edificado, em centros de quadra ou outras posições que permitiram uma análise da influência efetiva do conjunto edificado. Tomando esses locais como base, foram avaliadas as velocidades até 70 m do piso, altura em que se encontram a maioria das edificações dos modelos.

Em centros de quadra a ocupação máxima apresentou velocidades superiores à condição intermediária em 70% dos casos. Nos pontos de comparação em locais específicos, como ruas ou junto a edifícios, a ocupação máxima apresentou maiores possibilidades de circulação do ar em até 62% das vezes

Observa-se, ainda, que quando ocorreram reduções mais significativas nos valores para a condição de máxima ocupação em relação à situação atual, na maioria dos casos esses números se mantiveram próximos dos valores verificados no cenário intermediário. Em contrapartida, as reduções calculadas para o modelo intermediário superavam os valores de ocupação máxima em diversas ocasiões.

No entanto, devido a sua quantidade, é válido ressaltar que em alguns pontos o modelo de ocupação intermediária também registrou maiores velocidades, sobretudo nas simulações com o vento a leste. Em 38% dos casos a ventilação nos pontos da proposta de ocupação intermediária apresentou condições mais aceleradas.

Em suma, os resultados corroboraram com a premissa de que a verticalização permite melhores condições de circulação do ar através da maior permeabilidade ao vento, uma vez que, ao elevar a altura da edificação, diminui-se a taxa de ocupação do solo. Tal aspecto não foi mais evidente pelo fato de que o que se permite no trecho em relação ao restante da ZOM 2 é uma elevação no gabarito de 16 para 24 pavimentos, ao passo que o aumento no índice de aproveitamento é de 1,5 para 2,0, apenas.

Contudo, tomando como base os resultados da investigação, adverte-se que para o estudo das condições de ventilação devem ser analisadas as condições específicas de cada localidade, uma vez que as condições de circulação do ar são facilmente alteradas por parâmetros construtivos, cabendo o seu estudo detalhado.

Próximos passos

Diante de análises das condições de ventilação em trechos da malha urbana, em que os resultados são calculados em locais específicos e utilizados para comparar determinadas condições, torna-se necessário um tratamento estatístico dos dados como forma de apontar, de forma mais adequada, os critérios de semelhança, tabular os resultados e representar a variabilidade das informações.

Um referencial estatístico também contribuiria para a caracterização do comportamento do vento para a localidade estudada, uma vez que uma série histórica de dados foi sistematizada.

Observa-se que o zoneamento dos bairros estudados pode favorecer o adensamento. Ainda, o respaldo da legislação urbana em verticalizar esta área da cidade representa um potencial construtivo de interesse para o mercado imobiliário e que se traduz num vetor para o crescimento do trecho, como já se percebe pelos contornos de transformação da paisagem nesta parte da cidade.

No entanto, os resultados obtidos reforçam a necessidade de estudos ainda mais detalhados para uma condição de maior verticalização e, portanto, densificação da malha urbana. Ademais, concorda-se com Freitas (2008, p. 24) em relação ao fato de que *“em diversas cidades, as áreas mais valorizadas pelo mercado imobiliário, estão também, contraditoriamente, entre aquelas que mais sofrem com os efeitos combinados do aumento da altura das edificações, diminuição da vegetação urbana, sobrecarga da infra-estrutura, poluição atmosférica e formação de ilhas de calor, entre outros problemas no ambiente urbano”*.

Em etapas futuras, faz-se fundamental avaliar (e testar) os limites para o adensamento construtivo, controlando ou estimulando a forma urbana de modo que esta resulte em melhoria no fluxo de ar no meio urbano e, conseqüentemente, nas condições de ventilação de fachadas.

Esta etapa de mestrado consistiu na aproximação do tema da ventilação natural intra-urbana, compreendendo o fenômeno físico e os aspectos que influenciam o processo, sejam fatores variáveis ou características dos elementos do entorno e das edificações. Adiante, caberia um aprofundamento nos métodos de avaliação do comportamento do vento em meio urbano, quantificando os impactos de arranjos construtivos urbanos sobre a ventilação tendo como parâmetro a imprescindível qualidade climática de edificações.

O objetivo é aproximar-se de uma definição mais adequada de diretrizes de planejamento urbano que incorporem a ventilação natural como estratégia de conservação energética, permitindo o seu aproveitamento e explorando o potencial de arrefecimento passivo de edificações na busca pelo desenvolvimento em equilíbrio com o meio natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACSELRAD, H. **Discursos da sustentabilidade urbana**. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, São Paulo: ANPUR. n.1, p. 79-90, maio de 1999.
- ALBERTI, L. B. **De re aedificatoria**. Tradução de Javier Fresnillo Núñez. Ediciones Akal: Madrid, 1991.
- ALCOFORADO, M. J.; LOPES, A.; ANDRADE, H.; VASCONCELOS, J. **Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa**. Centro de Estudos Geográficos. Área de investigação de geo-ecologia. Universidade de Lisboa: Lisboa, 2005.
- ALLARD, F. **Natural ventilation in buildings: a design handbook**. James e James: London, 1998.
- ALLARD, F.; GHIAUS, C. **Natural ventilation in the urban environment**. In: Building Ventilation: the state of the art. SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. (org.) Earthscan: Londres, 2006.
- ALLARD, F.; GHIAUS, C.; MANSOURI, Y. **Natural ventilation for health, comfort and energy efficiency**. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 7, Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2003, Curitiba. Anais... Curitiba: ANTAC, 2003.
- ALIROL, P. **Como iniciar um processo de integração**. In: Novos Instrumentos de Gestão Ambiental Urbana. RIBEIRO, H.; VARGAS, H. C. (org.) EDUSP: São Paulo, 2004.
- ALUCCI, M. P. **CLIMATICUS_4.2.xls**. criado em 2005, com acesso em agosto de 2009, disponível no site: <http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html>.
- ANDRADE, H. **O clima urbano - natureza, escalas de análise e aplicabilidade**. In: Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia. n. 80, 2005.
- ARAÚJO, A. M. M., CARLEIAL, A. N. **O processo de metropolização em fortaleza: uma interpretação pela migração**. Universidade de Barcelona: Scripta Nova – Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. nº 94, Barcelona, 2001.
- _____. **Opulência e Miséria nos Bairros de Fortaleza (Ceará/Brasil)**. Universidade de Barcelona: Scripta Nova – Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. nº 146, Barcelona, 2003.
- ARAÚJO, V. M. D.; VIDAL, R. D. M. **Proposta de recuos e taxa de impermeabilização para revisão do plano diretor de natal**. Parecer técnico em atendimento ao Ofício nº. 08/98 – CONPLAM, Natal, 1998.
- ASSIS, E. S. **Impactos da forma Urbana na Mudança Climática: Método para a previsão do Comportamento Térmico e melhoria de Desempenho no Ambiente Urbano**. (Tese). Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

_____. **A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória.** ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2005.

ASSIS, E. S. e FROTA, A. B. **Urban bioclimatic design strategies for a tropical city.** Atmospheric Environment, v. 33, p. 4135-4142, 1999.

BARBOSA, R. H. **Fortaleza: arquitetura e cidade no final do século XX.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Projeto de Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BITAN, A. **The high climatic quality city of the future.** Atmospheric Environment, n. 26B, 1992.

BITTENCOURT, L. **Low energy buildings in warm-humid regions: the use of perforated blocks.** Proceedings of the technical conference on Tropical Urban Climate: Dhaka: 1993.

BITTENCOURT, L. S. CRUZ, M. J. LÔBO, D. G. F. **A influência da relação entre taxa de ocupação x nº de pavimentos no potencial de ventilação natural dos ambientes internos e externos.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1997, Salvador. Anais... Salvador: ANTAC, 1997.

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

BRAGA, T. **Principais limitações à internalização da discussão ambiental nas práticas urbanas.** Anais do Encontro Nacional da ANPUR: Ética, Planejamento e Construção Democrática do Espaço, Rio de Janeiro, 2001.

BRANDÃO, A. H. P. M. **O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro.** (Tese). Departamento de Geografia, FFLCH/USP, 1996.

BRANDÃO, R. L. **Sistema de informações para a gestão e administração territorial da Região Metropolitana de Fortaleza.** Projeto SINFOR: diagnóstico geoambiental e os principais problemas de uso e ocupação do meio físico da Região Metropolitana de Fortaleza. CPRM, Fortaleza, 1995.

BRANDÃO, R. S. **As Interações espaciais urbanas e o clima.** (Tese). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BUENO, L. M. M.; CYMBALISTA, R. **Planos diretores municipais: novos conceitos de planejamento territorial.** BUENO, L. M. M.; CYMBALISTA, R. (Org.). São Paulo: Annablume, 2007.

CARLOS, A. F. A. **A (re)produção do espaço urbano.** São Paulo: EDUSP, 1994

_____. **A cidade.** 2 ed. São Paulo: Contexto, 2007.

CARTAXO FILHO, J. **A cidade fatual.** Fortaleza: Imprensa Universitária – Universidade Federal do

Ceará, 2000.

CARVALHO, H. J. M.; CORBELL, O. D.; SILVA, F. A. G. **Influência da direção dos ventos sobre as correlações entre a forma urbana e o clima**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2007, Ouro Preto. Anais... Belo Horizonte: ANTAC, 2007.

CARVALHO, P. **Geração eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003.

CELINSKI, F.; SANTOS, G. H.; MENDES, N. **Análise térmica de um ambiente através da dinâmica dos fluidos computacional**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2003, Curitiba. Anais... Curitiba: ANTAC, 2003.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). **Síntese sinótica mensal de janeiro de 2009**. Disponível em: http://www7.cptec.inpe.br/~rupload/arquivo/Sintese_0109.pdf. Acessado em 11/10/2009.

CHANDLER, T. J. **Urban Climatology and its Relevance to Urban Design**. Geneva, WMO. Technical Note 149, 1976.

CHOAY, F. **O urbanismo: utopias e realidade, uma antologia**. São Paulo: Perspectiva, 1979.

CORBELL, O. D. **Um estudo da ventilação natural em edifícios e sua contribuição no uso racional de energia**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1997, Salvador. Anais... Salvador: ANTAC, 1997.

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) Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2001.

COSTA, H. S. de M. **Desenvolvimento urbano sustentável: uma contradição em termos?** ANPUR – Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, n.2, p. 55-71, março de 2000.

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

DANNI-OLIVEIRA, I. M. **A cidade de Curitiba e a poluição do ar – implicações de seus atributos urbanos e geoecológicos na dispersão de poluentes em período de inverno**. In: Clima urbano. São Paulo: Contexto, 2003.

DEÁK, C. **Especulação imobiliária**. Extrato de Deák, Csaba (1985) Rent theory and the price of urban land/Spatial organization in a capitalist economy. (Tese). Cambridge 1985.

- DUARTE, D. H. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental: método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano**. 2000. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- DUARTE, D. H. S., SERRA, G. G. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e proposta de um indicador**. Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 7-20, abr./jun. 2003.
- ECKARDT, W. V. **A crise das cidades: um lugar para viver**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1975.
- ELETROBRÁS. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2001.
- ETHERIDGE, D.; SANDBERG, M. **Building ventilation: theory and measurement**. Chichester: John Wiley and Sons, 1996.
- EVANS, M.; SCHILLER, S. **Diseño Bioambiental y arquitectura Solar**. Buenos Aires: Universidade de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. 3 ed., 1994.
- FANGER, P.O. **Airflow characteristics of occupied zone of ventilated space**. **ASHRAE Transactions**. New York: ASHRAE, 1987.
- FERREIRA, D. G.; ASSIS E. S.; FERREIRA, C. M. O. **Verificação da alteração dos padrões de vento devido à ocupação urbana na cidade de Belo Horizonte, MG**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2009, Natal. Anais... Natal: ANTAC, 2009.
- FORTALEZA. (1979). **Legislação Básica do Plano Diretor: Município de Fortaleza**. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará. Superintendência do Planejamento do Município, 1979.
- _____. (1992). **PDDU-FOR. Plano de Desenvolvimento Urbano de Fortaleza**. – Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza, 1992.
- _____. (1996). **Lei de uso e ocupação do solo – LUOS**. Fortaleza: Câmara Municipal de Fortaleza, 1996.
- _____. (2009). **Plano diretor participativo de Fortaleza – PDPFor**. Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2009.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos**. São Paulo: Edusp, 2000.
- FORSDYKE, A. G. **Previsão de tempo e clima**. São Paulo: Melhoramentos-Edusp, 1975.
- FREITAS, R. **Entre mitos e limites: as possibilidades do adensamento construtivo face à qualidade de vida no ambiente urbano**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2008.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 6 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

- FUCK JÚNIOR, S. C. **Expansão urbana e segregação espacial no sudeste do município de Fortaleza**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2002.
- GEORGAKIS, C.; SANTAMOURIS, M. **Wind and temperature in the urban environment**. In: Natural Ventilation in the urban environment: Assesment and Design. Ghiaus e Allard, org. Buildings, Energy, Solar Techonolgy, Londres, 2005.
- GIVONI, B. **Basic study of ventilation problems in houses in hot countries**. Israel: Building Research Station of the Institute of Technology, 1962.
- _____. **Passive and low energy cooling of buildings**., Nova Iorque: John Wiley and Sons, 1994.
- _____. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- GOMES, P. V.; LAMBERTS, R. **O estudo do clima urbano e a legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros, MG**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 73-91, jan./mar. 2009.
- GOTTDIENER, M. **A produção social do espaço urbano**. São Paulo: Ed USP, 1993.
- HADDAD, E. et al. **O mercado imobiliário antecipa as alterações na estrutura urbana? Evidências do caso de São Paulo**. In: LATIN AMERICAN REAL ESTATE SOCIETY – LARES, 5, 2005. Anais... São Paulo, 2005.
- HALL, P. **Cidades do amanhã: uma história intelectual do planejamento e do projeto urbanos no século XX**. São Paulo: Perspectiva, 2007.
- HARRIES, Alan. Notas de Aula. In: Workshop: CFX – FAU-USP. São Paulo, 2005.
- HIGUERAS, E. **Urbanismo bioclimático**. Barcelona: Gustavo Gili, 2006.
- HISSA, F. N. **Legislação urbana e ambiente construído: uma abordagem sistêmica dos parâmetros de controle de uso e ocupação do solo em Fortaleza – CE**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- HOUGH, M. **Cities and natural process**. Routledge: London, 1995.
- _____. **Naturaleza y ciudad**. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contagem da população 2007**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 11/07/2008).
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Wind speed measurement and use of cup anemometry**. 1999.
- JACOBS, J. **Morte e vida de grandes cidades**. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

JORNAL O POVO (2006). **Para onde cresce Fortaleza.** Disponível em <http://www.opovo.com.br/opovo/fortaleza/632905.html>. Acesso em 07/08/2007.

KATZSCHNER, L. **Urban climate studies as tools for urban planning and architecture.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1997, Salvador. Anais... Salvador: ANTAC, 1997.

KOENIGSBERGER, O.; INGERSOL, T. G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S. V. **Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design.** London: Longman, 1974

KOLOKOTRONI, M; SANTAMOURIS, M. **Ventilation for cooling.** In: Advances in passive cooling. SANTAMOURIS, M. (org.) Buildings, Energy, Solar Techonolgy, Londres, 2007.

LAMAS, J. M. R. G. **Morfologia urbana e desenho da cidade.** Orgal: Porto, 2007.

LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura.** 2 ed. São Paulo: Prolivros, 2004.

LANDSBERG, H. E. **The urban climate.** Academic Press, New York, 1981.

LEFEVBRE, H. **O direito à cidade.** São Paulo: Centauro, 2001.

LEITE, C. G. **Alterações da ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da avenida litorânea de São Luís/MA.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Tecnologia da Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

LEITE, R. C. V. **Estudo das condições microclimáticas urbanas – o caso das Avenidas Treze de Maio e Pontes Vieira em Fortaleza, Ceará.** Monografia (Especialização em Tecnologia do Ambiente Construído) Instituto Federal de Educação, Tecnologia e Cultura do Ceará, Fortaleza, 2008.

LOPES, A. M. S. **Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano: vento, ilha de calor de superfície e balanço energético.** Tese (Doutorado em Geografia Física). Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003.

MACEDO, S. S. **São Paulo, Paisagem e Habitação Verticalizada: os espaços livres como elementos de desenho urbano.** 1988. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

MALVEIRA, E. C. H. **Variações de parâmetros climáticos urbanos em Fortaleza – CE no contexto da ‘ilha de calor’: sua importância para o desenvolvimento sustentável.** Monografia. (Curso de graduação em Geografia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1998.

_____. **Estudo de mudanças climáticas num ambiente urbano: evolução da “ilha de calor” na região metropolitana de Fortaleza.** Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geografia). Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2003.

MARCONDES, M.; UMAKOSI, E. **Ferramentas computacionais para avaliação ambiental de áreas urbanas: estudo de caso em São Paulo.** Anais do IX Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto, 2007.

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). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

MASCARÓ, J. L. **Cidade: energia, arborização urbana e impacto ambiental.** In: Ciência e ambiente. n. 22, Universidade Federal de Santa Catarina: Santa Maria, 2001.

_____. **Loteamentos urbanos.** 2ed. Porto Alegre: Masquatro, 2005.

MASCARÓ, L. R. **Energia na edificação: estratégia para minimizar seu consumo.** São Paulo: Projeto, 1985.

_____. **Ambiência Urbana.** Porto Alegre: D.C. Luzzatto, 1996.

MELAGRANO, M. G. **Wind in architectural and environmental design.** Scarborough, Canada: Van Nostrand Reinhold, 1982.

MENDONÇA, F. **Clima e planejamento urbano: proposição metodológica e sua aplicação à cidade de Londrina/PR.** Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

MENDONÇA, R. S. R. de, ASSIS, E. S. de. **Conforto térmico urbano - estudo de caso do bairro Floresta - Belo Horizonte.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO, 6, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO 2001, São Pedro. Anais... São Pedro: ANTAC, 2001.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano.** Série Teses e Monografias nº 25. São Paulo: Instituto de Geografia/USP, 1976.

_____. **O estudo geográfico do Clima.** Cadernos Geográficos, Florianópolis, v. 1 n.1, 1999.

MONTEIRO, C. A. de F.; MENDONÇA, F. **Clima urbano.** São Paulo: Contexto, 2003.

MOREIRA, A. C. M. L. **Megaprojetos e ambiente urbano: parâmetros para elaboração do relatório de impacto de vizinhança.** Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas

Ambientais Urbanas). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MOREIRA, R. C. C. **A questão do gabarito na orla marítima de João Pessoa (bairros de Manaíra, Tambaú e do Cabo Branco)**. Vitruvius: arqtextos, São Paulo, jan. 2007. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp400.asp>. Acesso em julho de 2009.

MORENO, J. **O futuro das cidades**. ABDALA JUNIOR, B, ALEXANDRE, I. M. M. (org.) Série Ponto Futuro 11. São Paulo: SENAC, 2002.

MORENO, M. F. N. **Qualidade ambiental nos espaços livres de áreas verticalizadas da cidade de São Paulo**. Tese (Doutorado em Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MOURA, M. O. **O clima urbano de Fortaleza sob o nível do campo térmico**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Geografia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MUMFORD, L. **A cultura das cidades**. Belo Horizonte: Ed. Itatiaia, 1961.

OLGYAY, V. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism**. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1992.

_____. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

OLGYAY, V. OLGYAY, A. **Solar control and shading devices**. Princeton: Princeton University, 1957.

OLIVEIRA, P. M. **Cidade apropriada ao clima: a forma urbana como instrumento de controle do clima urbano**. (Dissertação). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 1988.

OKE, T.R. **Boundary Layer Climates**. 2 ed. London: Methuen, 1987.

OKE, T. R. **The urban energy balance**. Progress in Physical Geography, n. 12, 1988.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso Futuro Comum**. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1988.

PEREGRINO, P. S. A., SILVA, F. A. G. **Escoamentos de ventos e padrões de ocupação do solo em João Pessoa/PB**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2007, Ouro Preto. Anais... Belo Horizonte: ANTAC, 2007.

PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. 2005. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

- PRATA-SHIMOMURA, A. R.; FROTA, A. B.; CELANI, G. **Modelos físicos na análise de ventilação urbana: o uso do túnel de vento**. FÓRUM - Clima Urbano e Planejamento das Cidades; vol. 3, n. 2, 2009.
- PRATA-SHIMOMURA, A. R. **Relatório 3**. FAPESP. Programa de Pós-Doutoramento. São Paulo, 2010.
- ROMERO, M. A. B. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 2001.
- PROCEL. **Relatório de resultados de 2007**. Disponível em: <http://www.eletrobras.com/elb/procel>. Acesso em 08 de setembro de 2009.
- RIVERO, R. **Arquitectura y clima**. Montevideo: Universidad de la Republica, Facultad de Arquitectura, 1988.
- ROGERS, R. **Cities for a small planet**. London: Faber and Faber, 1997.
- ROMERO, M. A. B. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 2001.
- ROSSI, A. **A arquitetura da cidade**. São Paulo: Martins Fontes, 1995.
- SANTAMOURIS, M. **Energy in the urban built environment: the role of natural ventilation**. In: Natural Ventilation in the urban environment: Assesment and Design.
- GRUPO DE PERITOS SOBRE O AMBIENTE URBANO (GPAU). **Relatório Cidades Européias Sustentáveis**. Comissão Européia, Bruxelas, 1996.
- GHIAUS, F.; ALLARD, C. (org.). **Buildings, Energy, Solar Techonolgy**: Londres, 2005.
- SANTAMOURIS, M; WOUTERS, P. **Building ventilation: the state of the art**. James and James, 2006.
- SANT'ANNA, D. O. **Clima, percepção e arquitetura**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- SANTOS, Milton. **Por uma geografia nova: da crítica da geografia a uma geografia crítica**. São Paulo: Hucitec/ Edusp, 1978.
- SARAIVA, J. A. G. **Aerodinâmica dos edifícios altos: característica do escoamento e resposta a turbulência de formas prismáticas**. Tese. Concurso de especialista do LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Núcleo de Dinâmica Aplicada, Lisboa, 1983.
- SARAIVA, J. A. G.; SILVA, F. M.; SILVA, F. A. G. **O vento, a cidade e o conforto**. Anais do IV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Salvador, 1997.

- _____. **Condições climáticas e anos típicos.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2005, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2005.
- SEINFRA – SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA DO GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Estado do Ceará: atlas do potencial eólico.** 2001.
- SERRA, R. **Arquitectura y climas.** Barcelona. Editora Gustavo Gili. 1999.
- SILVA, F. A. G. **O vento como ferramenta de desenho do ambiente construído: uma aplicação ao nordeste do Brasil.** 1999. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- SILVA, J. B. **Discutindo a cidade e o urbano.** In: SILVA, J.B., COSTA, M.C.L., DANTAS, E.W.C. (org.). A cidade e o urbano: temas para debates. Fortaleza: EDUFC, 1997.
- SOUZA, V. M. B. de. **A influência da ocupação do solo no comportamento da ventilação natural e na eficiência energética em edificações. Estudo de caso em Goiânia – Clima tropical de altitude.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Departamento de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- SPIRN, A. W. **O jardim de granito.** São Paulo: EDUSP, 1995.
- STULL, R. **An Introduction to boundary layer meteorology.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- TOLEDO, A. M. **Os sucessivos enfoques nos códigos de obras e edificações brasileiros e as questões emergentes de conforto ambiental e conservação de energia.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1999, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ANTAC, 1999.
- TOLEDO, A.; PEREIRA, F. O. R. **O potencial da mesa d'água para a visualização analógica da ventilação natural em edifícios.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2003, Curitiba. Anais... Curitiba: ANTAC, 2003.
- TOLEDO, A.; PEREIRA, F. O. R. **Métodos e técnicas de visualização para a avaliação da ventilação natural pela ação do vento em edifícios.** In: NUTAU – NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO, 2004, São Paulo. Anais... São Paulo, 2004.
- UNFPA – United Nations Population Fund. **World urbanization prospects: the 1999 revision.** New York, 1999.
- _____. **State of world population 2007: unleashing the potential of urban growth.** New York, 2007.

URBVENT Brochure. **Natural ventilation in urban areas – potential assessment and optimal façade design.** Summary of the project and description of the main results. Brochure prepared by the Belgian Building Research Institute, 2004.

VIANNA, N. S. **O estado da arte em ensino e pesquisa na área de conforto ambiental no Brasil.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Tecnologia da Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

VILLAS BOAS, M. **Considerações sobre urbanização e meio ambiente físico.** Módulo de Ensino 2. Curso de especialização sobre controle de ambiente em arquitetura, Brasília, CAPES-MEC, 1983.

VIOLA, E. J. **A problemática ambiental do Brasil (1971 – 1991): da proteção ambiental ao desenvolvimento sustentável.** Polis n. 3. São Paulo: POLIS, 1991.

VITRUVIO, M. **Da arquitetura.** Tradução e notas de Marco Aurélio Lagonegro. São Paulo: Hucitec, 1999.

XAVIER, T. de M. B. S. **Alterações climáticas urbanas em Fortaleza – CE.** In: IX Congresso Brasileiro de Meteorologia. Campos do Jordão: SBMET, 1996.

_____. **Alterações climáticas urbanas em Fortaleza-Ceará: 1974 – 1995.** In: Tempo de chuva – Estudos climáticos e previsão para o Ceará e nordeste setentrional. Fortaleza: ABC Editora, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE

A1. Condições climáticas durante o período de medições *in loco*

No início das medições, entre os dias 16 a 22 de janeiro, os boletins técnicos do CPTEC⁴⁴ destacavam a presença de Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) no norte do Maranhão e do Piauí, causando convecção nestes estados e de forma mais localizada, porém menos intensa entre CE, RN, PB e centro-leste de PE. O VCAN atuou, deixando esses primeiros dias de medições nublados – formação característica deste período. Em toda a região Nordeste, a presença de um cavado que se prolongou desde o Atlântico Norte, favoreceu a atividade convectiva, fazendo com que as chuvas na faixa norte do Nordeste ocorressem de forma anômala no decorrer dos dias que se seguiram a esse período (figura 268). Sobre a região, os ventos de leste convergiram umidade para esta área, o que deixou o tempo instável.

Figura 268 - Anomalia de precipitação
Fonte: CPTEC, 2009.

Posteriormente, nos dias 29 e 30 observou-se a presença do vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN) sobre o norte do litoral do Nordeste. O fenômeno transportou umidade para esta região com forte movimento convectivo, o que provocou nebulosidade sobre sua área de atuação. O transporte de umidade pelos ventos de nordeste entre Atlântico norte e continente e o deslocamento de uma área de baixa pressão (VCAN) causaram pancadas de chuva em grande parte do nordeste ao final de janeiro e início de fevereiro.

Analisando as anomalias de temperaturas máximas e mínimas ao longo dos dias 16 a 31 de janeiro de 2009, verifica-se que comportamento espacial desta variável aponta uma relação inversamente proporcional à distribuição mensal das precipitações. Isto implica em anomalias positivas de temperaturas máximas (figura 269) nas regiões onde houve déficit de chuva e

⁴⁴ Material disponível em http://tempo1.cptec.inpe.br/bol_tecnico.shtml acessado entre os dias 15 de janeiro e 20 de fevereiro de 2009.

anomalias negativas de temperaturas mínimas (figura 270) em áreas com quantidade excessiva de chuvas (CPTEC, 2009).

Figura 269 – Anomalia de Temperatura Máxima
Fonte: CPTEC (2009).

Figura 270 – Anomalia de Temperatura Mínima
Fonte: CPTEC (2009).

A circulação atmosférica em 250 hPa predominante ao longo do mês de janeiro assinala, sobre o Oceano Atlântico, a presença de um cavado próximo da região Nordeste (figura 271). A presença do Vórtice do Nordeste favoreceu a intensificação das chuvas em parte do norte da região, sobretudo durante a segunda quinzena do mês (figura 272) quando ficou mais ativo.

Figura 271 - Linha de corrente e anomalia durante janeiro 2009

Figura 272 – Linha de corrente e anomalia entre os dias 16 e 31 de janeiro 2009
Fonte: CPTEC (2009).

A partir do início de fevereiro observou-se o estabelecimento do VCAN ao norte da região nordeste com forte atividade convectiva, favorecendo a instabilidade do tempo e ocorrências de pancadas de chuva em meio a episódios de temperatura elevada e nebulosidade.

A2. Resultados das simulações para o segundo semestre

Figura 273 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário atual com vento a leste durante o segundo semestre.

Figura 274 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o segundo semestre.

Figura 275 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste durante o segundo semestre.

Figura 276 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de atual com vento a leste durante o segundo semestre.

Figura 277 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o segundo semestre.

Figura 278 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste durante o segundo semestre.

Figura 279 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário atual com vento a leste durante o segundo semestre.

Figura 280 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a leste durante o segundo semestre.

Figura 281 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a leste durante o segundo semestre.

Figura 282 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste durante o segundo semestre.

Figura 283 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste durante o segundo semestre.

Figura 284 - Contornos de velocidades do ar a 1,5 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste durante o segundo semestre.

Figura 285 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste durante o segundo semestre.

Figura 286 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste durante o segundo semestre.

Figura 287 - Contornos de velocidades do ar a 10 m do solo no cenário de ocupação intermediária com vento a sudeste durante o segundo semestre.

Figura 288 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário da situação atual com vento a sudeste durante o segundo semestre.

Figura 289 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste durante o segundo semestre.

Figura 290 - Contornos de velocidades do ar a 36 m do solo no cenário de ocupação máxima com vento a sudeste durante o segundo semestre.

ANEXOS

ANEXOS

DIÁRIO OFICIAL DO MUNICÍPIO

FORTALEZA, 13 DE MARÇO DE 2009

SEXTA-FEIRA - PAGINA 14

sórios; II - IPTU progressivo no tempo; III - desapropriação mediante pagamento por títulos da dívida pública; IV - direito de preempção; V - direito de superfície; VI - operação urbana consorciada; VII - consórcio imobiliário; VIII - estudo de impacto de vizinhança (EIV); IX - estudo ambiental (EA); X - Zona Especial de Interesse Social (ZEIS); XI - instrumentos de regularização fundiária; XII - outorga onerosa de alteração de uso. Parágrafo Único - A aplicação dos instrumentos indicados nos incisos I, II e III está condicionada à disponibilidade de infraestrutura na presente zona.

Seção VII

Da Zona de Ocupação Moderada 1 (ZOM 1)

Art. 99 - A Zona de Ocupação Moderada 1 (ZOM 1) caracteriza-se pela insuficiência ou inadequação de infraestrutura, carência de equipamentos públicos, presença de equipamentos privados comerciais e de serviços de grande porte, tendência à intensificação da ocupação habitacional multifamiliar e áreas com fragilidade ambiental; destinando-se ao ordenamento e controle do uso e ocupação do solo, condicionados à ampliação dos sistemas de mobilidade e de implantação do sistema de coleta e tratamento de esgotamento sanitário. Art. 100 - São objetivos da Zona de Ocupação Moderada 1 (ZOM 1): I - controlar e ordenar os processos de transformações e ocupações urbanas e a densidade populacional de modo a evitar inadequações urbanísticas e ambientais; II - promover a requalificação urbanística e ambiental, com investimentos para complementar a infraestrutura, principalmente de saneamento ambiental; III - ampliar a disponibilidade e conservar espaços de uso coletivo, equipamentos públicos, áreas verdes, espaços livres voltados à inclusão para o trabalho, esportes, cultura e lazer; IV - promover a integração e a regularização urbanística e fundiária dos núcleos habitacionais de interesse social existentes; V - tornar adequadas as condições de mobilidade urbana, em especial nos pontos de congestionamento, insuficiência de consolidação da malha viária e concentração de equipamentos geradores de inadequações relativas ao tráfego e de saturação do sistema viário; VI - conter a ocupação urbana em áreas ambientalmente sensíveis e de interesse ambiental, com ações de recuperação nos assentamentos de interesse social, a fim de garantir a qualidade ambiental desta zona; VII - incentivar a valorização, a preservação, a recuperação e a conservação dos imóveis e dos elementos característicos da paisagem e do patrimônio. Art. 101 - São parâmetros da ZOM 1: I - índice de aproveitamento básico: 2,0; II - índice de aproveitamento máximo: 2,5; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,1; IV - taxa de permeabilidade: 40%; V - taxa de ocupação: 50%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 50%; VII - altura máxima da edificação: 72m; VIII - área mínima de lote: 150m²; IX - testada mínima de lote: 6m; X - profundidade mínima do lote: 25m; XI - fração do lote: 140m². Art. 102 - Serão aplicados na Zona de Ocupação Moderada 1 (ZOM 1), especialmente, os seguintes instrumentos: I - parcelamento, edificação e utilização compulsórios; II - IPTU progressivo no tempo; III - desapropriação mediante pagamento por títulos da dívida pública; IV - direito de preempção; V - direito de superfície; VI - outorga onerosa do direito de construir; VII - transferência do direito de construir; VIII - operação urbana consorciada; IX - consórcio imobiliário; X - estudo de impacto de vizinhança (EIV); XI - estudo ambiental (EA); XII - Zona Especial de Interesse Social (ZEIS); XIII - instrumentos de regularização fundiária; XIV - outorga onerosa de alteração de uso. Parágrafo Único - A aplicação dos instrumentos indicados nos incisos I, II e III está condicionada à disponibilidade de infraestrutura na presente zona.

Seção VII

Da Zona de Ocupação Moderada 2 (ZOM 2)

Art. 103 - A Zona de Ocupação Moderada 2 (ZOM 2) caracteriza-se pela insuficiência ou ausência de infraestrutura, carência de equipamentos públicos, tendência à intensificação da implantação de equipamentos privados comerciais e de serviços de grande porte e áreas com fragilidade ambiental,

destinando-se ao ordenamento e controle do uso e ocupação do solo condicionados à ampliação dos sistemas de mobilidade e de implantação do sistema de coleta e tratamento de esgotamento sanitário. Art. 104 - São objetivos da Zona de Ocupação Moderada 2 (ZOM 2): I - controlar e ordenar os processos de transformações e ocupações urbanas e a densidade populacional, de modo a evitar inadequações urbanísticas e ambientais; II - promover a requalificação urbanística e ambiental, com investimentos para complementar a infraestrutura básica, principalmente de saneamento ambiental; III - ampliar a disponibilidade e conservar espaços de uso coletivo, equipamentos públicos, áreas verdes, espaços livres voltados à inclusão para o trabalho, esportes, cultura e lazer; IV - promover a integração e a regularização fundiária dos núcleos habitacionais de interesse social existentes; V - tornar adequadas as condições de mobilidade urbana, em especial nos pontos de congestionamento, insuficiência de consolidação da malha viária e concentração de equipamentos geradores de inadequações relativas ao tráfego e de saturação do sistema viário; VI - conter a ocupação urbana em áreas ambientalmente sensíveis e de interesse ambiental; VII - incentivar a valorização, a preservação, a recuperação e a conservação dos imóveis e dos elementos característicos da paisagem e do patrimônio. Art. 105 - São parâmetros da ZOM 2: I - índice de aproveitamento básico: 1,0; II - índice de aproveitamento máximo: 1,5; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,1; IV - taxa de permeabilidade: 40%; V - taxa de ocupação: 50%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 50%; VII - altura máxima da edificação: 48m; VIII - área mínima de lote: 150m²; IX - testada mínima de lote: 6m; X - profundidade mínima do lote: 25m. Parágrafo Único - A área que compreende os bairros Messejana e Parque Iracema, formada pelo

perímetro que se inicia no cruzamento da BR-116 com uma via localizada a leste da BR-116, a cerca de 800m (oitocentos metros) ao sul da Avenida Oliveira Paiva, no bairro Parque Iracema, segue por essa via, no sentido nordeste, até a Rua Pedro Hermano Vasconcelos, quando essa se encontra com o prolongamento da Rua Fausto Aguiar, segue por esse prolongamento e por essa rua, no sentido sudeste, até encontrar-se com a Rua Ministro José Américo (ou Rua Pires da Mota), segue por essa rua, no sentido nordeste, até atingir a avenida que se constitui no limite oeste da Área Institucional do Centro Administrativo Governador Virgílio Távora, segue por esse limite, no sentido sul, até a avenida de limite sul dessa Área Institucional, segue pelo prolongamento dessa avenida, no sentido oeste, até a confluência das ruas Silveira Mota (ou Rua Alberto Torres) e Nicolau Coelho, segue pela Rua Nicolau Coelho, no sentido sul, até atingir um ponto situado a 110m (cento e dez metros) ao norte da Rua Coronel João Oliveira; a partir desse ponto, segue, no sentido sudeste, perpendicularmente à Rua Nicolau Coelho, numa reta paralela à Rua Coronel João Oliveira, até atingir a Rua Washington Soares; a partir desse ponto, segue por essa rua, no sentido norte, até a Rua Ozélla Pontes, segue por essa rua, no sentido nordeste, até a confluência com a Avenida Odilon Guimarães (ou Avenida Água Fria); a partir desse ponto, segue por essa avenida, no sentido sudeste, até a Rua Elieir, segue por essa rua, no sentido sudeste, até a Rua Porfírio Costa, segue por essa rua, no sentido sudoeste, até a Rua Professor José Henrique, segue por essa rua, no sentido noroeste, até a Rua Joaquim Pereira, segue por essa rua, no sentido sudoeste, até a Rua Manoel Castelo Branco (ou Rua Juarez Alencar), segue por essa rua, no sentido noroeste, até a Rua Coronel Dionísio Alencar, segue por essa rua, no sentido sudoeste, até a Rua José Hipólito (Estrada do Fio), segue por essa rua, no sentido sudeste, até a Rua José Cavalcante Sobrinho (Tamandaré), segue por essa rua, no sentido sul, até a Rua Barão de Aquiraz, segue por essa rua, no sentido sudeste, até um ponto correspondente ao prolongamento da Rua Mirian, segue por esse prolongamento e por essa rua, no sentido sudoeste, até um ponto que dista 50m (cinquenta metros) ao sul da Rua Eunice; a partir desse ponto, segue por uma perpendicular à Rua Padre Pedro de Alencar até encontrá-la, segue por essa rua, no sentido sul, até sua confluência com a BR-116, segue por essa BR, no sentido noroeste, até a Rua Gentilândia, segue por essa rua, no senti-

do noroeste, até a Rua Joselito Parente, segue por essa rua, no sentido nordeste, até a Rua Pedro Camelo, segue por essa rua, no sentido noroeste, até atingir o limite norte da Área de Preservação do Açude Jangurussu, segue por esse limite, no sentido noroeste, até a Travessa Maria Alves Ribeiro, segue por essa travessa, no sentido norte, até a Rua Antônio Alves Ribeiro, segue por essa rua, no sentido noroeste, até a Rua Rita Arruda; segue por essa rua, no sentido nordeste, até a Avenida Presidente Costa e Silva (Perimetral), segue por essa avenida, no sentido noroeste, até a Rua Paulina de Arruda, segue por essa rua, no sentido nordeste, até a Rua Augusto Calheiros, segue por essa rua, no sentido nordeste, até o prolongamento da Rua Capitão Waldemar Paula Lima, segue por esse prolongamento e por essa rua, nos sentidos nordeste e noroeste, até a Via Paranjana, segue por essa via, no sentido sudeste, até atingir a BR-116; a partir desse ponto, segue pela BR-116, nos sentidos nordeste e noroeste, até o ponto inicial, tem parâmetros urbanísticos diferenciados no que se refere aos Índices de Aproveitamento Básico e Máximo que são iguais a 2,0 e a altura máxima da construção que equivale a 72m. Art. 106 - Serão aplicados na Zona de Ocupação Moderada 2 (ZOM 2), especialmente, os seguintes instrumentos: I - parcelamento, edificação e utilização compulsórios; II - IPTU progressivo no tempo; III - desapropriação mediante pagamento por títulos da dívida pública; IV - direito de preempção; V - direito de superfície; VI - outorga onerosa do direito de construir; VII - transferência do direito de construir; VIII - operação urbana consorciada; IX - consórcio imobiliário; X - estudo de impacto de vizinhança (EIV); XI - estudo ambiental (EA); XII - Zona Especial de Interesse Social (ZEIS). Parágrafo Único - A aplicação dos instrumentos indicados nos incisos I, II e III deste artigo está condicionada à disponibilidade de infraestrutura da presente zona.

Seção IX Da Zona de Ocupação Restrita (ZOR)

Art. 107 - A Zona de Ocupação Restrita (ZOR) caracteriza-se pela ocupação esparsa, carência ou inexistência de infraestrutura e equipamentos públicos e incidência de glebas e terrenos não utilizados. Art. 108 - São objetivos da Zona de Ocupação Restrita (ZOR): I - inibir, controlar e ordenar os processos de transformações e ocupações urbanas de modo a evitar inadequações urbanísticas e ambientais; II - implantar ou complementar a infraestrutura básica apenas nas áreas ocupadas; III - conter a expansão e a ocupação urbanas. Art. 109 - São parâmetros da ZOR: I - índice de aproveitamento básico: 1,0; II - índice de aproveitamento máximo: 1,0; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,0; IV - taxa de permeabilidade: 40%; V - taxa de ocupação: 45%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 45%; VII - altura máxima da edificação: 15m; VIII - área mínima de lote: 150m²; IX - testada mínima de lote: 6m; X - profundidade mínima do lote: 25m. Art. 110 - Serão aplicados na ZOR, especialmente, os seguintes instrumentos: I - direito de preempção; II - direito de superfície; III - estudo de impacto de vizinhança (EIV); IV - estudo ambiental (EA); V - Zona Especial de Interesse Social (ZEIS).

Seção X Zona da Orla (ZO)

Art. 111 - A Zona da Orla (ZO) caracteriza-se por ser área contígua à faixa de praia, que por suas características de solo, aspectos paisagísticos, potencialidades turísticas, e sua função na estrutura urbana, exige parâmetros urbanísticos específicos. Art. 112 - A Zona da Orla está dividida em 7 (sete) trechos: I - Barra do Ceará/Pirambu; II - Jacarecanga/Moura Brasil; III - Praia de Iracema; IV - Meireles/Mucuripe; V - late Clube; VI - Cais do Porto; VII - Praia do Futuro. Art. 113 - São parâmetros da ZO, Trecho I - Barra do Ceará/Pirambu: I - índice de aproveitamento básico: 1,0; II - índice de aproveitamento máximo: 1,0; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,25; IV - taxa de permeabilidade: 30%; V - taxa de ocupação: 50%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 50%; VII - altura máxima da

edificação: 15m; VIII - área mínima de lote: 125m²; IX - testada mínima de lote: 5m; X - profundidade mínima do lote: 25m. Art. 114 - São parâmetros da ZO, Trecho II - Jacarecanga/Moura Brasil: I - índice de aproveitamento básico: 1,5; II - índice de aproveitamento máximo: 1,5; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,25; IV - taxa de permeabilidade: 20%; V - taxa de ocupação: 50%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 50%; VII - altura máxima da edificação: 24m; VIII - área mínima de lote: 125m²; IX - testada mínima de lote: 5m; X - profundidade mínima do lote: 25m. Art. 115 - AZO, Trecho III - Praia de Iracema -, corresponde aos limites delimitados na área de interesse urbanístico pela Lei Municipal nº 7.814, de 30 de outubro de 1995. Art. 116 - São parâmetros da ZO, Trecho III: I - índice de aproveitamento básico: 2,0; II - índice de aproveitamento máximo: 2,0; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,25; IV - taxa de permeabilidade: 25%; V - taxa de ocupação: 60%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 60%; VII - altura máxima da edificação: 48m. Parágrafo Único - Permanecem em vigor os parâmetro e indicadores urbanos para os setores 1.1, 1.2 e 1.3 da Área de Interesse Urbanístico, definidos pela Lei Municipal nº 7.814, de 1995. Art. 117 - São parâmetros da ZO, Trecho IV - Meireles/Mucuripe: I - índice de aproveitamento básico: 3,0; II - índice de aproveitamento máximo: 3,0; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,25; IV - taxa de permeabilidade: 20%; V - taxa de ocupação: 60%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 60%; VII - altura máxima da edificação: 72m; VIII - área mínima de lote: 125m²; IX - testada mínima de lote: 5m; X - profundidade mínima do lote: 25m. Parágrafo Único - O índice de aproveitamento máximo será acrescido de 1,0 (hum) para o subgrupo de uso Hospedagem, devendo o excedente ser compensado através do instrumento da "outorga onerosa do direito de construir". Art. 118 - São parâmetros da ZO, Trecho V - late Clube: I - índice de aproveitamento básico: 3,0; II - índice de aproveitamento máximo: 3,0; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,25; IV - taxa de permeabilidade: 20%; V - taxa de ocupação: 60%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 60%; VII - altura máxima da edificação: 72m; VIII - área mínima de lote: 125m²; IX - testada mínima de lote: 5m; X - profundidade mínima do lote: 25m. Art. 119 - São parâmetros da ZO, Trecho VI - Cais do Porto: I - índice de aproveitamento básico: 1,0; II - índice de aproveitamento máximo: 1,0; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,1; IV - taxa de permeabilidade: 30%; V - taxa de ocupação: 60%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 60%; VII - altura máxima da edificação: 48m; VIII - área mínima de lote: 300m²; IX - testada mínima de lote: 12m; X - profundidade mínima do lote: 25m. Art. 120 - São parâmetros da ZO, Trecho VII - Praia do Futuro: I - índice de aproveitamento básico: 2,0; II - índice de aproveitamento máximo: 2,0; III - índice de aproveitamento mínimo: 0,1; IV - taxa de permeabilidade: 40%; V - taxa de ocupação: 50%; VI - taxa de ocupação de subsolo: 50%; VII - altura máxima da edificação: 36m; VIII - área mínima de lote: 200m²; IX - testada mínima de lote: 8m; X - profundidade mínima do lote: 25m. Parágrafo Único - O índice de aproveitamento máximo será acrescido de 1,0 (hum) para o subgrupo de uso Hospedagem, devendo o excedente ser compensado através do instrumento da "outorga onerosa do direito de construir". Art. 121 - Serão aplicados na Zona da Orla (ZO), especialmente, os seguintes instrumentos: I - parcelamento, edificação e utilização compulsórios; II - IPTU progressivo no tempo; III - desapropriação mediante pagamento por títulos da dívida pública; IV - direito de preempção; V - direito de superfície; VI - operação urbana consorciada; VII - consórcio imobiliário; VIII - estudo de impacto de vizinhança (EIV); IX - estudo ambiental (EA); X - Zona Especial de Interesse Social (ZEIS); XI - instrumentos de regularização fundiária; XII - outorga onerosa de alteração de uso; XIII - outorga onerosa do direito de construir.

CAPÍTULO IV Das Zonas Especiais

Seção I Da Classificação das Zonas Especiais

Art. 122 - As Zonas Especiais compreendem áreas do território que exigem tratamento especial na definição