

LORENA D'ARC TORK DA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DO USO E DA APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS CFD PARA ESTUDO E ANÁLISE
DE VENTILAÇÃO NATURAL POR AÇÃO DOS VENTOS EM ESPAÇOS URBANOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S624i
2015
Silva, Lorena D'Arc Tork da, 1987-
Investigação do uso e da aplicação das técnicas CFD para estudo e análise de ventilação natural por ação dos ventos em espaços urbanos / Lorena D'Arc Tork da Silva. – Viçosa, MG, 2015.

xii, 104f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Antônio Cleber Gonçalves Tibiriçá.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Ventilação. 2. Fluidodinâmica computacional.
3. Arquitetura e clima . I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. II. Título.

CDD 22. ed. 697.92

LORENA D'ARC TORK DA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DO USO E DA APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS CFD
PARA ESTUDO E ANÁLISE DE VENTILAÇÃO NATURAL POR AÇÃO DOS VENTOS
EM ESPAÇOS URBANOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de junho de 2015.



Túlio Márcio de Salles Tibúrcio



Emani Simplicio Machado



Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá
(COORIENTADOR)



Antônio Cleber Gonçalves Tibiriçá
(ORIENTADOR)

DEDICATÓRIA

Aos meus avós João Ribeiro e Tacelina, e ao meu primo Maclovy
(*In memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Agradeço infinitamente a Deus pela oportunidade de aprendizado e força.

Aos meus pais, João e Diana, pelo apoio incondicional.

À minha irmã, Laryssa, pelas palavras de encorajamento e incentivo.

Aos meus irmãos Ludmila, Marcus e Júnior, que mesmo distante sempre se fizeram presentes.

Ao Ricardo pelo carinho e apoio incessante.

Ao meu orientador, Prof. Tibiriçá, pela competência, orientação, presença constante e revisão do trabalho escrito.

Ao meu coorientador, Prof. Álvaro, pela colaboração imprescindível através de discussões e resolução de problemas.

Aos amigos de Viçosa, em especial ao Alexandre e Liliane, pela ajuda e apoio mútuo imprescindíveis. Agradeço também a Layla Talin, Jucilene, Zoleni, Tamyres Lopes, Adrieli, Nico, Carla Paim, Carlos Mota, Sandro, Thamires Righi, Esther, Ana Caudal, Adíverson, Carla Coura, Cibele Braga, Deiri e pastor Marlos.

Aos funcionários e alunos do curso de mecânica da UFV, Priscila, Mahyhaly, Talles, Lucas, Henrique, Nathane, Renata e Rafael.

Aos professores da UFV, Aline, Regina, Joyce, Rogério, Paulo e Douglas.

Aos meus familiares e amigos de Belém, Augusto, Pedrinho, Clara, Elisabeth, Edilson, Álvaro, Michelle, Eduardo pelas informações e esclarecimentos.

Aos professores da UNAMA, Marco Aurélio, Mariano, Adolfo e Marcela, fontes de inspiração.

À CODEM pela atenção e concessão de informações valiosas à construção da pesquisa.

À CAPES pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE QUADROS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA.....	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Geral.....	3
1.2.2 Específicos	3
1.3 PREMISSAS E RESTRIÇÃO DA PESQUISA.....	4
1.3.1 Premissas.....	4
1.3.2 Restrição	4
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	5
2. ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO MUNDO E NO BRASIL SOBRE VENTILAÇÃO NATURAL EM MEIO URBANO COM USO DE TÉCNICAS CFD.....	7
2.1 INTRODUÇÃO	7
2.2 OBJETIVO	8
2.3 VENTILAÇÃO NATURAL EM MEIO URBANO COM O USO DE TÉCNICAS CFD	8
2.3.1 Estudo da ventilação urbana: o uso de técnicas CFD em outros países.....	9
2.3.2 Estudo da ventilação urbana: o uso de técnicas CFD no Brasil	13
2.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ESTUDOS DE VENTILAÇÃO URBANA COM O USO DE TÉCNICAS CFD NO BRASIL E EM OUTROS PAÍSES.....	19
2.4.1 Principais objetivos das pesquisas	19
2.4.2 Principais aspectos metodológicos adotados.....	19
2.4.3 <i>Software</i> utilizado para as simulações.....	20
2.4.4 Principais conclusões obtidas	20
2.5 DISCUSSÃO	21
2.6 CONCLUSÃO	21
2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
3. USO DE TÉCNICAS CFD PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE OCUPAÇÃO DE QUADRAS NA VENTILAÇÃO URBANA POR AÇÃO DOS VENTOS	25
3.1 INTRODUÇÃO	25
3.2 OBJETIVO	27
3.3 MODELAGEM CFD APLICADA À VENTILAÇÃO URBANA	27
3.3.1 Geometrias e domínios	29

3.3.2	Geração de malha.....	31
3.3.3	Equações governantes	33
3.3.4	Condições de contorno	34
3.4	METODOLOGIA.....	37
3.4.1	Descrição dos modelos e condições de contorno.....	38
3.4.2	Método de análise de resultados	44
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
3.5.1	Análise do comportamento do vento através planos horizontais em cenários isolado e agrupado com uso da técnica CFD	44
3.5.2	Comparação dos resultados de velocidade de vento diante do efeito de adensamento urbano em cenários isolado e agrupado	49
3.6	CONCLUSÃO	51
3.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
4.	ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL POR AÇÃO DOS VENTOS DE QUADRAS LOCALIZADAS EM UM SETOR DA REGIÃO CENTRAL DE BELÉM/PA, UTILIZANDO TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO CFD	55
4.1	INTRODUÇÃO	55
4.2	OBJETIVO	58
4.3	METODOLOGIA.....	58
4.3.1	Método de seleção da quadra e cenários simulados	58
4.3.2	Método de caracterização do vento em Belém	61
4.3.3	Método para simulação computacional com CFD.....	62
4.3.4	Método de análise dos resultados	70
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.4.1	Análise do comportamento do vento a partir dos efeitos das prescrições urbanísticas nos cenários retrospectivo, atual e prospectivo através de planos horizontais, verticais e valores de velocidade do vento	70
4.5	CONCLUSÃO	83
4.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
5.	CONCLUSÕES GERAIS DA PESQUISA	87
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	ANEXO A - VENTOS: ASPECTOS GERAIS	90
	ANEXO B - ESCALAS CLIMÁTICAS	92
	ANEXO C - VENTILAÇÃO NATURAL URBANA POR AÇÃO DOS VENTOS	96
	ANEXO D - ESCALA DE BEAUFORT	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DOS ANEXOS	103

LISTA DE ABREVIATURAS

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*

BPG - *Best Practice Guideline*

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

CLA - Camada Limite Atmosférica

CLP - Camada Limite Planetária

CODEM - Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém

CTMBelém - Cadastro Técnico Multifinalitário de Belém

CWE - *Computational Wind Engeneering*

EDP - Equações Diferenciais Parciais

EVC - Engenharia Computacional do Vento

GBP - Guia de Boas Práticas

PDU - Plano Diretor Urbano

RANS - *Reynolds-Averaged Navier Stokes*

RMS - *Residual Mean Square*

TRY - *Test Reference Year*

ZAU - Zona Ambiental Urbana

ZCI - Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 Exemplo de domínio retangular com indicação do local de aplicação das distâncias: entrada (frontal), saída (posterior) e laterais	30
Figura 3-2 Exemplo de malha: células tetraédricas com refino na região de interesse	32
Figura 3-3 Exemplo de refinamento de malha local	33
Figura 3-4 Condições de fronteira: indicação da entrada, saída, lateral, simetria, topo, bloco e piso	36
Figura 3-5 Geometria da quadra-modelo construída	38
Figura 3-6 Cenários construídos: quadra isolada leste (a), quadras agrupadas leste (b), quadra isolada nordeste/sudeste (c) e quadras agrupadas nordeste/sudeste (d).....	40
Figura 3-7 Cenários unitários com incidência frontal do vento ($\alpha = 0^\circ$).....	45
Figura 3-8 Cenários unitários com incidência lateral do vento ($\alpha = 45^\circ$).....	46
Figura 3-9 Cenários agrupados com incidência frontal do vento ($\alpha = 0^\circ$)	47
Figura 3-10 Cenários agrupados com incidência lateral do vento ($\alpha = 45^\circ$)	48
Figura 3-11 Localização dos pontos de obtenção dos valores de velocidade com 2m de distância da(s) quadra(s).....	49
Figura 4-1 Localização de Belém/PA	56
Figura 4-2 Cenários verticalizados em função dos Planos Diretores para a quadra selecionada ...	61
Figura 4-3 Rosa dos ventos com frequência de ocorrência de vento (a) e Rosa dos ventos com predominância de velocidade do vento (b) m Belém	62
Figura 4-4 Cenários de simulação com a implantação contendo os gabaritos, e sujeito à orientação do vento perpendicular a quadra, 0° , e oblíquo à quadra, 45°	64
Figura 4-5 Exemplo de aplicação de condições de contorno aplicadas nas fronteiras do domínio computacional	66
Figura 4-6 escoamento de vento no cenário retrospectivo com vento orientado a leste [0°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte	73
Figura 4-7 escoamento de vento no cenário atual com vento orientado a leste [0°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte.....	74
Figura 4-8 escoamento de vento no cenário prospectivo com vento orientado a leste [0°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte	77

Figura 4-9 Escoamento de vento no cenário retrospectivo com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte.....	78
Figura 4-10 Escoamento de vento no cenário atual com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte.....	81
Figura 4-11 Escoamento de vento no cenário prospectivo com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 Classificação de rugosidades Davenport.....	34
Tabela 3-2 Dimensão dos domínios na escala 1/4 em condições de simetria.....	41
Tabela 3-3 Dimensão dos refinamentos globais e locais aplicados nas malhas para cada cenário simulado.....	42
Tabela 3-4 Números de elementos gerados pelo refinamento de malha para cada cenário.....	43
Tabela 3-5 Valores de velocidade de vento coletados em pontos a barlavento e sotavento, afastados 2m das faces externas das quadras.....	51
Tabela 4-1 Dimensões frontal (F), lateral (L), topo (T) e posterior (P) dos domínios construídos na escala 1/5.....	65
Tabela 4-2 Refinamento de malha aplicado em cada geometria.....	68
Tabela 4-3 Refinamentos aplicados em cada cenário e o número de elementos gerados.....	69
Tabela 4-4 Valores de velocidade de vento obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário retrospectivo com vento orientado a leste [0°].....	71
Tabela 4-5 Valores de velocidade de vento obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário atual com vento orientado a leste [0°].....	72
Tabela 4-6 Valores de velocidade de vento [m/s] obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário prospectivo com vento orientado a leste [0°].....	75
Tabela 4-7 Valores de velocidade de vento [m/s] obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário prospectivo com vento orientado a leste.....	76
Tabela 4-8 Valores de velocidade de vento [m/s] obtidos em três pontos a barlavento e em três pontos a sotavento na quadra miolo do cenário atual com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°].....	79
Tabela 4-9 Valores de velocidade de vento [m/s] obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário prospectivo com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°].....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1 Compilação de estudos sobre o incômodo e conforto em nível de pedestre por escoamento de vento.....	10
Quadro 2-2 Compilação de estudos sobre investigação dos parâmetros computacionais aplicados na modelagem CFD da ventilação urbana.....	11
Quadro 2-3 Compilação de estudos sobre implicações das disposições das edificações e urbanização na ventilação	12
Quadro 2-4 Compilação de estudos sobre análise da influência das prescrições urbanísticas na ventilação urbana.....	14
Quadro 2-5 Compilação de estudos sobre os mecanismos de aproveitamento da ventilação natural para conforto térmico	17
Quadro 2-6 Compilação de estudos sobre a importância dos parâmetros de configuração da modelagem da ventilação urbana.....	17
Quadro 2-7 Compilação de estudos sobre conforto térmico em nível de pedestre.....	18
Quadro 3-1 Dimensão dos domínios para entrada, laterais, topo e saída à região simulada.....	30
Quadro 3-2 Recomendações gerais para a construção e refino de malha na modelagem CFD de ventilação urbana.....	32
Quadro 3-3 Recomendações gerais para as condições de fronteira (contorno) aplicadas nas faces do domínio.....	36
Quadro 3-4 Descrição dos cenários isolado e agrupado nas direções de vento leste e nordeste/sudeste.....	39
Quadro 4-1 Etapas para seleção da quadra simulada.....	59
Quadro 4-2 Condições de contorno aplicadas	67

RESUMO

SILVA, Lorena D'Arc Tork, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2015. **Investigação do uso e aplicação das técnicas CFD para estudo e análise de ventilação natural por ação dos ventos em espaços urbanos.** Orientador: Antônio Cleber Gonçalves Tibiriçá. Coorientador: Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá.

A ventilação por ação dos ventos é um agente interveniente na qualidade do ar e nas trocas de calor nos espaços urbanos, sendo a velocidade do escoamento um fator decisivo para determinar as trocas de calor e de renovação do ar. Dentre as ferramentas disponíveis para a análise do escoamento de ar no espaço urbano, destacam-se as técnicas CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Na modelagem CFD para problemas de ventilação urbana, é importante investigar alguns parâmetros de configuração. Por isso, a pesquisa investigou o uso e aplicação das técnicas CFD para estudo e análise da ventilação urbana por ação dos ventos em uma cidade de grande porte, tendo como objeto de investigação a capital paraense, Belém/PA. Para isto, foi realizada uma revisão de literatura sobre o escoamento do ar em meio urbano com o uso de técnicas CFD no Brasil e no mundo, além da investigação de diretrizes e parâmetros de configuração que são aplicados em simulação CFD para modelagem de ventilação natural urbana. E, por fim, o uso e a aplicação desses parâmetros em modelos de quadras existentes em Belém/PA, segundo os cenários de consolidação dos Planos Diretores Urbanos e a análise qualitativa e quantitativa do escoamento de ar. Dentre as conclusões, a simulação CFD foi uma ferramenta útil por seu potencial em fornecer informações quantitativas e qualitativas. Entretanto, faz-se necessária uma aplicação criteriosa dos parâmetros de simulação voltados à ventilação natural em escala urbana para resultados confiáveis. Quanto às simulações, identificou-se que o adensamento urbano e a redução dos recuos entre as edificações são fatores importantes para contribuição da redução da velocidade do vento e o seu potencial de ventilação. E em situações onde existem altos gabaritos, a aplicação de maiores afastamentos pode colaborar para a melhoria da circulação de ar entre construções. A partir dos resultados obtidos, ratifica-se a potencialidade da ferramenta CFD para estudos de ventilação urbana através da inserção criteriosa das diretrizes de configuração e salienta-se a necessidade de maior atenção às legislações pelos urbanistas na configuração do tecido urbano para se melhorar as condições de escoamento do vento.

ABSTRACT

SILVA, Lorena D'Arc Tork, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2015. **Investigation of the use and application of CFD-techniques for study and analysis of natural ventilation by wind action in urban spaces.** Adviser: Antônio Cleber Gonçalves Tibiriçá. Co-adviser: Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá.

The ventilation by wind action is an intervening agent in the air quality and heat exchanges in urban areas, and the flow velocity is a decisive factor in determining the heat and air exchange rates. Among the tools available for airflow analysis of in the urban space, the CFD (Computational Fluid Dynamics) technique can be highlighted. In CFD modeling of urban ventilation problems, it is important to investigate some setting parameters. Therefore, the research investigated the use and application of CFD techniques for study and analysis of urban ventilation by wind action in large cities, being the object of this investigation the city of Belém/PA. For this, it was conducted a literature review on the air flow in urban areas using CFD techniques in Brazil and worldwide. In addition the guidelines and setting parameters for modeling of urban natural ventilation. Finally, it was investigated the application of these parameters in models of existing blocks in Belém/PA, according to the consolidation scenarios of the Urban Master Plans and the qualitative and quantitative analysis of the air flow. Among the findings, the CFD simulation is useful tool due to its potential to provide quantitative and qualitative information. However, it is necessary to carefully apply the simulation parameters of natural ventilation in urban scale for achieving reliable results. About the simulations, it is stated that the urban density and reducing setbacks between buildings are important factors in the contribution of wind speed reduction and its potential for ventilation. And in situations where there are high buildings, the application of greater distance can collaborate to improve the air flow between buildings. From the above results, it is confirmed the potential use of CFD techniques for urban ventilation studies supported by the careful application of the setting parameters, and emphasizes the need for greater attention to legislation by planners in the city configuration for to improve wind flow conditions.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A ventilação natural por ação dos ventos é uma estratégia bioclimática que fornece renovação de ar e trocas de calor. Além disso, promove o resfriamento fisiológico em períodos quentes e alívio em elevadas umidades, através do movimento do ar (OLGYAY, 2010). Para Asfour (2010) e Al-Sallal e Al-Rais (2012), a ventilação é a principal estratégia passiva para se adquirir conforto térmico em recintos urbanos, principalmente em clima quente e úmido, pois além de reduzir o desconforto gerado pelo calor através do movimento do ar, pode contribuir para a redução do consumo energético.

Em áreas adensadas, o escoamento dos ventos é afetado pelas formas e disposições das construções, como uma decorrência de fatores das normas urbanísticas como afastamentos, gabaritos, orientações, implantação etc., determinantes para o comportamento ambiental dos espaços construídos. Essas interferências, sentidas em mudanças na velocidade, intensidade e sentido do vento, produzem repercussões no microclima local (CORBELLA; YANNAS, 2009). Nos espaços de uso coletivo podem ser observadas alterações na velocidade de escoamento do ar, provocadas pela porosidade, rugosidade e distribuição das volumetrias arquitetônicas. Em edificações, variáveis como localização de aberturas e geometria das construções são essenciais para potencializar a ventilação cruzada em edifícios (Anexo C).

Existe uma complexidade ao se estudar a ventilação urbana, devido à dificuldade de controle de variáveis e de fatores que causam interferência como temperatura, sentido e velocidade do vento, rugosidade, porosidade das áreas urbanas, etc. Dentre as ferramentas aplicadas para investigação e análise de ventilação natural urbana, vale destacar as técnicas de simulação Dinâmica dos Fluidos Computacional, conhecida como *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Entre os estudos nacionais e internacionais que exploram a predição do escoamento de ar em espaços urbanos e os parâmetros de configurações aplicados ao CFD para pesquisa de ventilação urbana, destacam-se as pesquisas de Prata (2005), Cóstola (2006), Brandão (2009), Leite (2008), Trindade, Pedrini e Duarte (2010), Asfour (2010), Reiter (2010), Leite e Frota (2011), Cóstola e Alucci (2011), Cheung e Liu (2011), Blocken, Janssen e van Hooff (2012), Chao e Ng (2012), entre outros.

Na literatura, encontram-se diferentes temas investigados tendo como subsídio esta ferramenta para predição, análise e desempenho de cenários urbanos. São enfoques nessas pesquisas a avaliação dos efeitos da urbanização e predição de novos cenários urbanos, o incômodo, o conforto e a segurança em nível de pedestre, a investigação da influência de diferentes disposições de edifícios no potencial de ventilação natural, a análise da influência de

edifícios e seus afastamentos no deslocamento do vento em áreas urbanas assim como investigação das diretrizes de configuração aplicadas ao CFD para estudos de ventilação urbana.

Tendo em vista o uso da ferramenta CFD para auxílio na pesquisa e análise de fenômenos de escoamento de vento, acredita-se que com esse estudo se poderá melhor investigar as metodologias de aplicação de CFD em ventilação urbana, em particular com a aplicação de parâmetros urbanísticos da cidade de Belém/PA, e as potenciais implicações da conformação urbana no comportamento ambiental dos espaços construídos.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

O adensamento nos centros urbanos, resultante da substituição de massas vegetais por massas edificadas, impõe mudanças no escoamento dos ventos em áreas urbanas. Essas modificações, provocadas pelo uso e ocupação do solo urbano e por altos gabaritos e intensificação de construções, alteram a velocidade, o sentido e a intensidade da distribuição da ventilação no espaço urbano. Considerando-se o caso de cidades de maior porte, que possuem legislação urbana consolidada e atualizada, a investigação da ventilação urbana requer um aprofundamento dos efeitos das transformações provocadas na malha urbana devidas ao processo de uso e ocupação do solo e da verticalização, com vistas ao aperfeiçoamento das legislações urbanísticas. Nessa linha de raciocínio, percebeu-se a oportunidade e a necessidade de se realizar estudos de análise e evolução da ventilação natural no tecido urbano.

Em particular, em função do seu porte, da sua localização geográfica e do seu relevo, entendeu-se que Belém, a capital paraense, poderia ser um caso referenciado neste trabalho por apresentar 99,2% das horas do ano em desconforto térmico. E como uma recomendação de estratégia adequada para esta cidade, a ventilação, é indicada em 89% das horas (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998). Nesse sentido, a variável climática, vento, é necessária quase que em tempo integral na capital paraense, para atenuar as condições de desconforto térmico sentidas durante todo o ano, seja por remoção de carga térmica da edificação e/ou resfriamento fisiológico dos usuários.

Em convergência com os fatos citados, fenômenos relacionados à ventilação urbana são objetos de diversas pesquisas, nas quais, dentre as técnicas aplicadas para investigação, destacam-se as ferramentas de CFD. De modo geral, seu uso possibilita a solução numérica de escoamentos de fluidos. Sua aplicação abrange diferentes áreas como a indústria automobilística, aeronáutica, oceanografia, meteorologia, estudos de ventilação de ambientes coletivos e edificações, entre outros.

Essa ferramenta permite certa economia de tempo em estudos de engenharia de ventos. Isso se deve ao fato de não precisar de maquetes físicas, mas de modelos tridimensionais computacionais para as suas simulações. Na condição de recurso técnico que viabiliza estudos fenomenológicos, proporciona uma representação qualitativa e quantitativa multidimensional do fluxo de vento, como um todo, possibilitando-se reduzir o emprego de pontos previamente escolhidos para a realização de medições. Esse potencial recurso computacional pode gerar informações para análise de desempenho de áreas urbanas, antes e após a inserção de novos elementos arquitetônicos, funcionando como um instrumento para a visualização de detalhes do escoamento de vento (PRATA, 2005). Dessa forma, pode ser aplicada em diferentes etapas do projeto e gerar informações para análise de desempenho.

Por outro lado, a técnica CFD pode demandar alta capacidade de processamento computacional e cuidado na inserção das configurações pelo usuário quanto a sua utilização, visto que a falta de preparo no seu uso pode levar a resultados equivocados (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). De outro lado, do ponto de vista dos resultados que gera, em especial os de visualização, o conhecimento de mecânica dos fluidos, a solução numérica de equações diferenciais e a definição dos parâmetros de configuração aplicados a estudos de Ventilação Urbana são fundamentais para o estabelecimento de condições de contorno, dimensões de domínios, construção e refino de malha, modelos de turbulência etc. Ressalta-se a importância desses parâmetros para a condução das simulações em termos de confiabilidade dos resultados. Certamente, o uso de bibliografias que discutam esses aspectos e a aplicação de configurações já testadas por outros autores se faz importante para aplicação das técnicas.

Considerando-se a atualidade do tema e o que se faz necessário para aperfeiçoamento das legislações urbanísticas, tomou-se como ponto de partida para a investigação a seguinte pergunta: Como o uso de técnicas de CFD pode contribuir para estudos de fluxo de vento em espaços urbanos?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GERAL

Investigar o uso e aplicação das técnicas CFD para estudo e análise de ventilação urbana por ação dos ventos em cidades de grande porte.

1.2.2 ESPECÍFICOS

1. Estudar a ventilação natural em meio urbano com o uso das técnicas CFD.

2. Investigar diretrizes e parâmetros de configuração aplicados em simulação CFD para modelagem de ventilação natural urbana.
3. Identificar, com base em modelagens computacionais, como padrões de implantação, orientação, coeficiente de aproveitamento máximo, gabaritos e afastamentos, podem influenciar nos contornos de velocidades, segundo os cenários de consolidação de leis urbanas.

1.3 PREMISSAS E RESTRIÇÃO DA PESQUISA

1.3.1 PREMISSAS

1. Validação do estudo, tendo-se para base de referência um setor urbano da cidade de Belém/PA.
2. Criação de um cenário prospectivo, a partir da seleção de lotes para remembramento.
3. Uso de um modelo de quadra para a criação de cenários agrupados.
4. Aplicação de similaridade para interpretação dos resultados das simulações.
5. Utilização das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento (*Navier-Stokes*) e modelo de turbulência k-ε.

1.3.2 RESTRIÇÃO

1. Modelagem computacional somente de um modelo de quadras da área urbana de Belém/PA.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é composta de 5 capítulos, sendo 3 em formato de artigo, estruturados com introdução, objetivo, metodologia, discussão, resultados, conclusão e referências bibliográficas.

O primeiro capítulo, de espectro geral, consiste na introdução geral da dissertação com justificativa e relevância do tema, objeto da investigação, objetivos geral e específicos, premissas e restrições adotadas, além da estrutura do trabalho e as referências bibliográficas.

O segundo, de revisão de literatura, trata do estudo da ventilação natural em meio urbano com aplicação da técnica CFD. Apresenta: 1) revisão de literatura sobre pesquisas envolvendo ventilação natural em meio urbano no mundo e no Brasil com a ferramenta CFD, destacando-se os objetivos, aspectos metodológicos relevantes adotados e as principais conclusões dos trabalhos e, 2) a comparação entre os estudos desenvolvidos nacional e internacionalmente com uso do CFD.

O terceiro capítulo investiga o efeito do adensamento urbano no escoamento do vento e as potencialidades da modelagem computacional CFD para esse tipo de estudo. Apresenta uma revisão bibliográfica de procedimentos aplicados à simulação CFD para ambientes urbanos, e a aplicação das técnicas em quadras com características similares as encontradas na região central de Belém/PA, com os parâmetros de configuração CFD para ambientes urbanos levantados na literatura. Como resultados, tem-se a análise do efeito do adensamento na ventilação urbana e o potencial das técnicas de CFD para estudos de ventilação urbana.

O quarto capítulo foca-se na modelagem computacional de cenários retrospectivos, atuais e prospectivos, até a condição de ocupação máxima, simuladas tomando-se como referência quadras localizadas em Belém/PA. São apresentadas as simulações da área objeto de estudo, conforme os Planos Diretores de 1993 e 2008. Para isto, foi realizado um método de seleção para a escolha da quadra e dos cenários simulados, caracterização do vento e simulação computacional. E por fim, a análise dos resultados é apresentada.

O quinto capítulo contém as principais conclusões da pesquisa.

1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASFOUR, O. S. Prediction of wind environment in different grouping patterns of housing blocks. **Energy and Building**, v. 42, p. 2061-2069, 2010.

AL-SALLAL, K. A.; AL-RAIS, L. Outdoor airflow analysis and potential for passive cooling in the modern urban context of Dubai. **Renewable Energy**, 38, p. 40-49, 2012.

BLOCKEN, B.; JANSSEN, W. D.; VAN HOOFF, T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: general decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environment Modelling and Software**, 30, p. 15-34, 2012.

BRANDÃO, R. S. **As interações espaciais urbanas e o clima**. São Paulo, FAUUSP, 2009. Tese de Doutorado.

CHAO, Y.; NG, E. Building porosity for better urban ventilation in high-density cities – a computational parametric study. **Building and Environment**, 2012.

CHEUNG, J. O. P.; LIU, C. CFD simulations of natural ventilation behavior in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings. **Energy and Buildings**, 43, p. 1149-1158, 2011.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental**. 2a. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Revan, 2009.

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

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

GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, A. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2ªed. Florianópolis, Grupo de Pesquisa em Construção/ UFSC, 1998.

LEITE, C. G. **Alterações na ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da Avenida Litorânea de São Luís/MA**. São Paulo, FAUUSP, 2008. Dissertação de Mestrado.

LEITE, R. C. V.; FROTA, A. B. **Designing the city according to the wind: using a CFD to minimize the impacts of city growth on natural ventilation**. Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gili, 1ª edição, 6ª tirada, 2010.

PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. São Paulo: FAUUSP, 2005. Tese de doutorado.

REITER, S. Assessing wind comfort in urban planning. **Environment and Planning: Planning and Design** 37, 857-873, 2010.

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

2. ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO MUNDO E NO BRASIL SOBRE VENTILAÇÃO NATURAL EM MEIO URBANO COM USO DE TÉCNICAS CFD

Resumo

Na literatura sobre CFD (*Computational Fluid Dynamics*), é possível encontrar diversas pesquisas internacionais sobre ventilação natural em meio urbano com uso de Dinâmica dos Fluidos Computacional, conhecida como CFD. Estes estudos versam sobre condições de ventilação em nível de pedestre, escoamento de vento com edifícios em diferentes orientações, disposições, além dos parâmetros que são utilizados na modelagem CFD, como dados de entrada, modelo de turbulência, convergência, dimensões de domínios e refinamento de malha. Na literatura nacional, trabalha-se com a mesma técnica e as pesquisas geralmente investigam escoamento de vento ao redor dos edifícios, análise da ventilação através de prospecção de simulação de cenários construtivos em áreas adensadas, relação entre verticalização e a interferência desta no vento. Como propósito, este artigo tem o objetivo de destacar e comparar aspectos abordados nas pesquisas internacionais e brasileiras sobre ventilação natural em meio urbano com uso do CFD. Como conclusão, as publicações brasileiras trabalham na melhoria das suas simulações, na tentativa de reproduzir as diretrizes e os resultados encontrados na literatura mundial. Entretanto há um descompasso das pesquisas brasileiras no que concerne à investigação de parâmetros e aplicação de configurações computacionais em relação à produção internacional que precisam ser aprimorados.

Palavras-chave: Ventilação Natural, Espaço Urbano, CFD.

2.1 INTRODUÇÃO

O vento é considerado uma variável climática extremamente vulnerável a mudanças devido à movimentação de massas de ar. Nos grandes centros urbanos, esta interferência é percebida mais claramente, devido às construções e disposições das massas arquitetônicas (singularidade do local), rugosidade e porosidade, advindas do desenho urbano e das edificações verticalizadas, aspectos climáticos, velocidade do vento, entre outros (ROMERO, 2001; ASFOUR, 2010).

Dentre as ferramentas disponíveis para investigação do vento em ambientes urbanos, merece destaque a técnica baseada na dinâmica dos fluidos computacional, conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Essa permite simular espaços urbanos, em substituição às maquetes físicas, através da construção tridimensional do objeto a ser simulado. A partir desta etapa, são inseridas na modelagem condições representativas do ambiente urbano como rugosidade, temperatura, perfis de vento, pressão etc. Na literatura internacional, destacam-se os trabalhos de Blocken e Persoon (2009), Asfour (2010), Reiter (2010), Cheung e Liu (2011), Blocken, Janssen e van Hooff (2012), Ramponi e Blocken (2012). Estes, em sua maioria, trabalham com predição de ventilação natural urbana, através da técnica CFD. Em geral,

investigam condições de ventilação em nível de pedestre, escoamento de vento com edifícios em diferentes orientações, disposições, além dos parâmetros utilizados na modelagem, como dados de entrada, modelo de turbulência, convergência, rugosidade, dimensões de domínios e refinamento de malha. No Brasil merece destaque o trabalho com CFD de Bittencourt, Cruz e Lôbo (1997), Prata (2005), Leite (2008), Brandão (2009), Trindade, Pedrini e Duarte (2010), Leite e Frota (2011), Cóstola e Alucci (2011), que investigaram a ventilação natural em meio urbano, com estudos versando sobre escoamento de vento ao redor dos edifícios, análise da ventilação através de prospecção de simulação de cenários construtivos em áreas adensadas, relação entre verticalização e a interferência desta no vento.

Nas simulações CFD, alguns parâmetros como refinamento de malha, modelo de turbulência e condições de contorno precisam ser observados para que se possa ter resultados satisfatórios. A partir da revisão de literatura é possível comparar informações quanto aos parâmetros citados e as principais semelhanças e diferenças encontradas nas publicações sobre o tema no mundo e no Brasil. Para responder a estes questionamentos, o artigo traz uma revisão de pesquisas pertinentes, desenvolvidas no mundo e no Brasil sobre aplicação do CFD na ventilação em meio urbano, com identificação dos objetivos, métodos e conclusões alcançados. E realiza uma comparação dos aspectos abordados nas pesquisas internacionais e brasileiras sobre CFD para ventilação natural em meio urbano.

2.2 OBJETIVO

Este artigo tem por objetivo apresentar uma análise comparativa entre pesquisas internacionais e brasileiras sobre ventilação natural em meio urbano com uso de técnicas CFD, destacando e comparando os principais objetivos, métodos e conclusões alcançados.

2.3 VENTILAÇÃO NATURAL EM MEIO URBANO COM O USO DE TÉCNICAS CFD

Importantes pesquisas nacionais e internacionais envolvendo o uso de CFD foram realizadas como alternativa de estudo e análise de escoamento de vento ao redor de edifícios (PRATA, 2005; CÓSTOLA, 2006; LEITE, 2008; BRANDÃO, 2009; ASFOUR, 2010; REITER, 2010; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011; CHEUNG; LIU, 2011; BLOCKEN; JANSSEN; VAN HOOFF, 2012; BLOCKEN, 2014). O uso de modelos computacionais permite realizar análises qualitativa e quantitativa do escoamento do ar em meio urbano. Além disso, por não necessitar de maquete física, realiza a

simulação de diferentes projetos, o que proporciona a análise de diversas etapas do projeto com custo e tempo reduzidos (PRATA, 2005).

Na modelagem da ventilação urbana, algumas diretrizes devem ser consideradas para que se tenham resultados confiáveis, como: as simplificações aplicadas nas geometrias, o modelo de turbulência adotado, o refinamento da malha, o refino na interface sólido-fluido, as dimensões de domínio para ambientes urbanos, além de conhecimentos em mecânica dos fluidos e equações diferenciais parciais. Na seção a seguir, apresenta-se a compilação de estudos sobre escoamento de vento com aplicação de CFD, levantando as diretrizes citadas acima e características como:

1. principais objetivos das pesquisas;
2. principais aspectos metodológicos adotados;
3. *software* utilizado para as simulações;
4. principais conclusões obtidas.

2.3.1 ESTUDO DA VENTILAÇÃO URBANA: O USO DE TÉCNICAS CFD EM OUTROS PAÍSES

No quadro a seguir, é apresentado um levantamento por tema das publicações internacionais que utilizaram técnicas CFD para investigação de escoamento de vento urbano. Os estudos, organizados por temas, são:

- incômodo e conforto em nível de pedestre por escoamento de vento (Quadro 2.1);
- investigação dos parâmetros computacionais aplicados na modelagem CFD da ventilação urbana (Quadro 2.2);
- implicações das disposições das edificações e urbanização no escoamento do vento em ambientes internos e meio urbano (Quadro 2.3).

Quadro 2-1 Compilação de estudos sobre o incômodo e conforto em nível de pedestre por escoamento de vento

Tema: Incômodo e conforto em nível de pedestre por escoamento de vento				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
Amsterdam/ Holanda – Blocken e Persoon (2009)	Avaliar o incômodo por ventilação no nível de pedestres, antes e depois da adição de novos arranha-céus.	Fluent 6.3.	A validação CFD foi desempenhada pela comparação de médias de velocidade de vento simuladas no <i>deck</i> do estádio com as coletadas <i>in loco</i> . Os autores modelaram a geometria do estádio em detalhes e priorizaram uma boa qualidade da malha computacional. Foram realizadas especificações do comprimento de rugosidade aerodinâmica e perfil de velocidade de entrada de ar na Camada Limite Atmosférica (CLA).	Comparando-se os dados obtidos nas simulações com uma norma que dispõe sobre o incômodo por vento na Holanda e a diretriz prática NPR 6097, conclui-se que a norma e a diretriz possuem informações muito úteis para estudos de conforto por vento. Entretanto, a precisão desses estudos pode melhorar se os comprimentos de rugosidade incorporados na NPR 6097 forem colocados à disposição do usuário para a construção de perfis de entrada de CLA mais apropriados.
Amsterdam/ Holanda - Blocken, Janssen e van Hooff (2012)	Apresentar um quadro geral de simulações e decisões, para questões que envolvem conforto e segurança dos pedestres, no que concerne ao vento, tendo como estudo de caso <i>Eindhoven University of Technology</i> .	Fluid 6.3.	Neste trabalho, simulou-se o campus da universidade em nível de pedestre. Os autores procuraram integrar em suas simulações as recomendações do <i>Best Practice Guideline</i> (BPG), que funciona como um guia de boas práticas aplicadas ao CFD, pois a precisão e confiabilidade de simulações podem ser comprometidas em função dos parâmetros de configuração adotados. Utilizaram uma alta resolução de malha e análise de convergência, além de uma geometria representada com detalhes.	Ao final, os resultados das simulações foram comparados com medições de velocidade de vento feitas <i>in loco</i> , encontrando uma concordância entre os dados simulados e os medidos.
Dubai/ Emirados Árabes Unidos – Al-Sallal e Al-Rais (2012)	Investigar o potencial do escoamento do vento para arrefecimento passivo em clima quente e úmido na cidade de Dubai.	Phoenix.	Foram simulados três casos para a localidade de Al-Mankhool. Os autores analisaram os resultados visando ao arrefecimento passivo por ventilação natural e seu impacto no conforto humano, segundo o modelo adaptativo da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers - ASHRAE</i>).	O fluxo de ar é canalizado mais intensamente quando está entre edifícios. Essa característica melhora as condições de circulação do vento, potencializando o conforto térmico. Entretanto, gera vórtices nos cantos dos edifícios, causando desconforto aos pedestres. Outra conclusão é que a velocidade do vento é mais confortável em ruas com cânions mais largos, principalmente em áreas abertas como estacionamento e terrenos livres. Como recomendação, os autores relatam a importância do projeto das ruas no planejamento dos espaços com foco bioclimático, e a sua contribuição como mecanismo de auxílio para o conforto dos pedestres, especialmente em períodos de verão.

Quadro 2-2 Compilação de estudos sobre investigação dos parâmetros computacionais aplicados na modelagem CFD da ventilação urbana

Tema: Investigação dos parâmetros computacionais aplicados na modelagem CFD da ventilação urbana				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
Estudo genérico - Reiter (2010)	Tratar dos avanços realizados com técnicas CFD para avaliação do conforto por vento nos espaços urbanos.	<i>Fluent.</i>	O autor comparou três configurações diferentes de construção: uma com um único prédio, outra com duas edificações e a última correspondeu a uma área urbana adensada. Testou diferentes modelos de turbulência. Comparou os resultados obtidos da modelagem computacional com testes em túnel de vento.	Como conclusão geral, chegou-se a um alto grau de precisão entre as velocidades média de vento no entorno dos edifícios utilizando modelos computacionais, mas este precisa de uma malha suficientemente fina para capturar de forma adequada os resultados. Desenvolveu-se ainda uma metodologia para quantificar as velocidades de vento consideradas críticas no entorno das edificações, servindo de apoio a prática projetual urbana, voltada a espaços públicos confortáveis.
Estudo genérico - Ramponi e Blocken (2012)	Analisar o impacto que os parâmetros computacionais inseridos pelo usuário podem ter sobre os resultados das simulações CFD.	<i>Fluent 6.3.26.</i>	Utilizaram um edifício genérico isolado em situação de ventilação cruzada para estudos de análise dos impactos dos parâmetros computacionais. Foram realizadas diversas simulações baseadas em revisão de literatura, aplicando diferentes parâmetros e verificando-se a influência que estes apresentavam. As simulações foram validadas em ensaios em túnel de vento. Entre os parâmetros computacionais analisados, foi estudado o tamanho do domínio computacional, refinamento de malha, perfil de entrada da camada limite, modelos de turbulência e convergência.	Os autores concluíram que há carência de estudos que abordem a sensibilidade dos parâmetros inseridos para simulação CFD de ventilação cruzada para edifício isolado genérico e forneceram uma análise detalhada do impacto dos parâmetros computacionais nos resultados das simulações.
Estudo genérico - Blocken (2014)	Realizar uma revisão geral das publicações relevantes publicadas sobre CFD nos últimos 50 anos.	-----	Este artigo fornece uma visão das simulações CFD no passado, presente e o seu futuro. O trabalho aborda as boas práticas adotadas nas simulações, a relação entre túnel de vento e CFD, simulações CFD em nível de pedestre e ventilação em edifícios, precisão de CFD, entre outros. Traz uma contribuição muito valiosa sobre técnicas CFD e a sua trajetória.	Realizou um documento relatando os avanços e evolução da Engenharia Computacional do Vento (EVC) ou <i>Computational Wind Engineering (CWE)</i> nos últimos 50 anos.

Quadro 2-3 Compilação de estudos sobre implicações das disposições das edificações e urbanização na ventilação

Tema: Implicações das disposições das edificações e urbanização no escoamento do vento em ambientes internos e no meio urbano				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
Faixa de Gaza/ Palestina - Asfour (2010)	Investigar o efeito de diferentes disposições de blocos de edifícios no potencial de ventilação na faixa de Gaza.	<i>Gambit 2.2,</i> <i>Fluent 6.3.</i>	Realizou a simulação de seis tipos diferentes de configuração de edificações hipotéticas, formadas por quatro blocos retangulares, submetidas a três orientações de vento. Foram estabelecidas dimensões de domínio e de malha, condições de contorno e o modelo de turbulência, além do critério de convergência. O estudo focou na geometria, no espaçamento e na orientação do edifício em relação ao vento. A partir das simulações, fez-se a análise do comportamento da ventilação para cada bloco e em cada orientação, através da medição da pressão média na fachada dos edifícios e o potencial de ventilação em cada apartamento, além dos contornos da magnitude da velocidade do ar.	Edifícios agrupados orientados ao vento predominante e que possuem um espaço central apresentam melhores condições de ventilação. Essa configuração propicia maior entrada e contenção do fluxo de ar.
Hong Kong/ China - Cheung e Liu (2011)	Pesquisar os efeitos de interferência que edifícios em Hong Kong provocam na ventilação de ambientes internos por meio de técnicas CFD.	<i>Fluent 6.3.26;</i> <i>Gambit 2.2.30.</i>	Foi analisada a taxa de ventilação cruzada de apartamentos hipotéticos agrupados, variando a direção do vento, o afastamento e disposição dos edifícios. O perfil de vento foi aplicado no domínio de entrada; as condições de não escorregamento com funções de parede foram aplicadas nas fronteiras sólidas e recorreu-se ao refino de malha. Os autores testaram 25 blocos de edifícios idênticos e alinhados com domínio retangular que foram discretizados usando gerador de malha.	Edifícios mais distantes um do outro promovem taxas de ventilação melhores, podendo ser a separação ótima cerca de três vezes a largura do edifício, se considerada a disposição das edificações. Portanto a disposição dos edifícios pode ser uma das soluções, para melhorar o desempenho da ventilação natural nas cidades.
Hong Kong/ China - Yuan e Ng (2012)	Avaliar o efeito da urbanização na ventilação natural e prever o desempenho desta em um cenário futuro, além do desenho e planejamento de estratégias que promovam a melhoria da eficiência da ventilação natural no nível de pedestre para a área de Mong Kok em Hong Kong.	<i>Fluent 6.3.</i>	Foram realizados testes com configurações genéricas, baseados em morfologia do passado, do presente e do futuro, orientados em três diferentes direções, por modelagem CFD e em experimentos com túnel de vento. O objetivo foi o fluxo de ar nas diferentes configurações, disposições e a velocidade do vento como critério de conforto térmico.	A orientação de rua é um parâmetro importante no desempenho da ventilação urbana. A diminuição da taxa de cobertura contribui para o aumento do desempenho no nível de pedestre, e a separação e porosidade nas construções são muito úteis para a melhoria da circulação de ar.

Além dessas pesquisas, existem outras que tratam de aspectos como configuração e análise de sensibilidade das condições de contorno, problemas com funções de parede e representação da homogeneidade horizontal da CLA (Camada Limite Atmosférica) (Anexo B), além da inserção de rugosidade no terreno em simulações urbanas. Existem também documentos intitulados de Boas Práticas do CFD, que funcionam como recomendações gerais para modelagem computacional do meio urbano e em nível de pedestre (BLOCKEN; STATHOPOULOS; CARMELIET, 2007; BLOCKEN; JANSSEN; VAN HOOFF, 2012; FRANKE *et al.*, 2004; FRANKE, 2006; FRANKE *et al.*, 2007; ZHANG, 2009).

2.3.2 ESTUDO DA VENTILAÇÃO URBANA: O USO DE TÉCNICAS CFD NO BRASIL

A seguir, é apresentado o levantamento por tema de algumas publicações nacionais que utilizaram técnicas CFD para estudos do escoamento de vento em ambientes urbanos. Os temas investigados pelas pesquisas são:

- análise da influência das prescrições urbanísticas na ventilação natural urbana (Quadro 2.4);
- mecanismos de aproveitamento da ventilação natural para conforto térmico de espaços internos e urbanos (Quadro 2.5);
- importância dos parâmetros de configuração na modelagem computacional de ventilação urbana (Quadro 2.6);
- conforto térmico em nível de pedestre (Quadro 2.7).

Quadro 2-4 Compilação de estudos sobre análise da influência das prescrições urbanísticas na ventilação urbana

Tema: Análise da influência das prescrições urbanísticas na ventilação natural urbana				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
Maceió/AL - Bittencourt, Cruz e Lôbo (1997)	Analisar duas alternativas de implantação de um edifício localizado na orla marítima e o desempenho destas ao aproveitamento da ventilação natural como forma de resfriamento passivo.	<i>Phoenixs.</i>	Foi feita a avaliação da relação entre os valores das taxas de ocupação e o gabarito admitido no potencial de ventilação natural. Os modelos foram orientados a 45° e 90° em relação à fachada leste e depois simulados computacionalmente. O artigo não apresenta as configurações introduzidas na modelagem.	Recuos são mais importantes que a altura dos edifícios para um melhor aproveitamento da ventilação natural no tecido urbano, ao contrário do que dizia a legislação de Maceió.
Natal/RN - Costa e Araújo (2001)	Estudar a ventilação natural e a sua relação com as prescrições urbanísticas para a cidade.	<i>Phoenixs 3.2.</i>	Desenvolveram uma análise de prescrições urbanísticas dos últimos três Planos Diretores (1984, 1994 e 1999) e da ocupação atual correspondente ao ano de 2001 por simulação computacional e os seus efeitos sobre a ventilação natural em uma porção urbana da cidade. Para isso, foram construídos quatro modelos de ocupação das quadras, considerando os valores máximos de ocupação que poderiam ser adotados nos lotes, conforme as prescrições urbanísticas. Foram introduzidas configurações de domínio, condições de contorno, controle de convergência da solução e turbulência baseadas em entrevista com o coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico de Portugal.	Confirmou-se a hipótese de que a redução dos afastamentos eleva o gradiente de ventilação e reduz a velocidade no plano mais baixo das edificações, o que aumenta a probabilidade de formação de ilhas de calor.
Natal/RN - Marques (2003)	Analisar a influência que os parâmetros urbanísticos e as tipologias adotadas em uma porção da Orla da Praia do Meio têm sobre a ventilação natural.	<i>Phoenixs 3.2.</i>	O autor recorreu à simulação computacional de uma porção da área de estudo e reproduziu cinco modelos de ocupação permitidos pela legislação. Foram inseridas configurações de domínio, refinamento de malha e modelo de turbulência.	Verificou-se que a redução dos recuos e o aumento do gabarito reduzem a velocidade do vento.
Santos/SP - Prata (2005)	Verificar as alterações do campo de vento frente às alterações de gabaritos das edificações e a influência sobre o conforto dos pedestres na área objeto de estudo.	<i>Ansys CFX.</i>	Utilizou um método experimental e exploratório com simulação em túnel de vento, medidas <i>in loco</i> e simulação computacional. Como parâmetros para a simulação, a autora definiu a dimensão do domínio e valores para o refinamento de malha. Foram inseridas condições de contorno, definindo as superfícies com atrito e sem atrito.	Constatou que a posição e altura dos edifícios interferem significativamente na distribuição das correntes de vento em perímetro urbano.

(Continuação)

Tema: Análise da influência das prescrições urbanísticas na ventilação natural urbana				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
Goiânia/GO - Souza (2006)	Investigar a influência da ocupação no solo nas condições de ventilação natural e eficiência energética de edificações.	O simulador MicroFlo do software <i>Integrated Environmental Solutions Limited – Virtual Environment</i> (IES – VE).	Analisaram-se os efeitos do vento em um bairro de Goiânia/GO, apontando as possíveis possibilidades de uso do solo para a área. Foram inseridas configurações de domínio e dimensões de malha, além de modelo de turbulência.	Foi possível identificar quais propostas de ocupação do solo apresentaram as velocidades mais baixas para o setor em estudo e que possivelmente prejudicariam o conforto térmico na região.
São Luís/MA - Leite (2008)	Investigar a relação entre a verticalização de áreas litorâneas e a ventilação natural para a cidade de São Luís/MA.	<i>Ansys CFX 5.7.</i>	Foram modelados computacionalmente cinco cenários com possíveis gabaritos, afastamentos e tipologias de edifícios em setor localizado nas proximidades de uma avenida litorânea conforme legislação vigente, sendo os dados comparados com a situação atual. Recorreu a medições em 24 pontos distribuídos em quadras circundantes ao objeto de estudo, observando a influência nos padrões de velocidade, direção e pressão do vento em nível de pedestre. Quanto ao método de simulação, foram definidos modelos de simulação, construção da geometria, definição do domínio, refinamento de malha, condições de contorno e critérios de convergência.	Como conclusão, pôde-se afirmar que os cenários de verticalização alteram os padrões de ventilação natural.
Campinas/SP - Oliveira (2009)	Avaliar a ventilação exterior em casas autoconstruídas localizada em Campinas/SP, que foram submetidas a modificações construtivas.	<i>Phoenics 3.2.</i>	A autora simulou a ventilação natural em uma quadra típica com diferentes disposições das habitações. Inseriu informações de domínio, modelo de turbulência, refinamento de malha e condições de entrada e valores de rugosidade.	Pode-se concluir que essas alterações nas residências modificaram a velocidade e fluxo do vento.

(Continua)

(Continuação)

Tema: Análise da influência das prescrições urbanísticas na ventilação natural urbana				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
São Paulo/SP - Brandão (2009)	Gerar uma metodologia de avaliação da ambiência térmica urbana, em que os resultados pudessem fornecer orientações quanto a projeto e gestão do ambiente urbano. E recomendações quanto à confecção de modelos de simulação para ambientes externos, relações de dimensão e formato de domínio, parâmetros para a criação de malha, parâmetros para condições de entrada e de contorno e convergência.	<i>Envi-met, CFX 5.7 e Ansys Icem CFD.</i>	No que diz respeito às simulações computacionais, o autor recorreu a simulações experimentais com Envi-met e CFX 5.7 em uma área urbana de São Paulo/SP, a fim de avaliar a relação entre a ocupação da área e aspectos ambientais.	O autor afirma que outras variáveis devem ser incorporadas ao planejamento urbano e as legislações de uso e ocupação do solo para a determinação da interferência que uma área pode imprimir em relação aos aspectos térmicos.
Fortaleza/CE - Leite (2010)	Estudar a influência que os padrões de ocupação do solo têm sobre a ventilação natural na cidade de Fortaleza/CE.	<i>Ansys CFX 11.0, Ansys Icem CFD.</i>	Simulação de três cenários correspondentes à situação atual, à ocupação máxima e uma proposta intermediária. Utilizou-se o <i>software Ansys Icem CFD</i> para modelagem da malha e o <i>Ansys CFX 11.0</i> para a solução das equações, além de medições <i>in loco</i> . Quanto às configurações computacionais, foram definidos parâmetros de domínio, malha, rugosidade e convergência.	Salienta as interferências negativas que a ocupação máxima do solo traz as condições de ventilação no local, como o aumento do gradiente de vento.

Quadro 2-5 Compilação de estudos sobre os mecanismos de aproveitamento da ventilação natural para conforto térmico

Tema: Mecanismos de aproveitamento da ventilação natural para conforto térmico de espaços internos e urbanos				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
Aracaju/SE - Costa (2009)	Aproveitar o vento como mecanismo de ventilação natural em habitação residencial multifamiliar para Aracaju/SE.	Ansys CFX.	Realizou a modelagem computacional de um apartamento e da quadra onde este estava inserido. Fez a análise das simulações e recomendações de projeto para melhor aproveitamento da ventilação natural. A autora teve preocupação com o método aplicado às simulações, definindo questões de geometria e domínio, refinamento de malha, condições de entrada e contorno e critérios de convergência referentes à simulação da quadra.	Como conclusão, têm-se recomendações de projeto que permitem verificar a influência da ventilação.

Quadro 2-6 Compilação de estudos sobre a importância dos parâmetros de configuração da modelagem da ventilação urbana

Tema: Importância dos parâmetros de configuração na modelagem computacional de ventilação urbana				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
Estudo genérico - Cóstola e Alucci (2011)	Investigar a viabilidade do uso do CFD para obtenção de coeficientes de pressão (C_p) em edifícios e a importância de alguns aspectos de configuração.	Ansys CFX.	Os autores realizaram a simulação computacional de um edifício de cinco pavimentos caracterizado como habitação de interesse social. Mesmo tratando-se de um estudo que simula um edifício isolado, o trabalho apresenta relevantes informações quanto a configurações de densidade de malha, perfil do vento, rugosidade do piso no domínio, simulação da camada limite e independência dos resultados de malha.	Os autores ressaltam a importância da correta configuração das simulações para a geração de resultados confiáveis e de qualidade, visto que desvios consideráveis podem ser obtidos, se dados de entrada pouco confiáveis forem utilizados. E, por fim, propõem algumas recomendações como utilizar ordem de discretização das equações preferencialmente de segunda ordem, teste de independência de malha com pelo menos três malhas, dimensões do domínio em relação ao objeto de simulação, descrever as condições de fronteiras sólidas, especificar as condições de contorno nas fronteiras fluidas, utilizar resíduos de 10^{-4} , entre outras recomendações.

(Continua)

(Continuação)

Tema: Importância dos parâmetros de configuração na modelagem computacional de ventilação urbana				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
Guarulhos/SP - Cóstola (2006)	Formular um procedimento de quantificação da vazão de ar por ação do vento no interior de um edifício.	Ansys CFX.	Mesmo se tratando de uma pesquisa com ênfase em ambiente interno, o autor oferece importantes contribuições quanto às configurações de simulação computacional para CFD e apresenta relevante fundamentação teórica sobre diversos aspectos da predição de ventilação natural. No que diz respeito ao uso do CFD, realizou a simulação de um edifício-tipo situado num conjunto habitacional localizado em Guarulhos/SP, com o objetivo de determinar os coeficientes de pressão no centro das janelas do prédio. Na simulação, apontou recomendações e qualidade de malha, modelos de turbulência e os seus graus de hierarquia, tipos de domínios, condições de contorno para diferentes formas de domínio, representação dos fenômenos na camada limite e convergência.	Conclui que existe um amplo conjunto de ferramentas computacionais para predição de ventilação natural, mas é necessário um uso criterioso para a aplicação destas em projetos arquitetônicos.

Quadro 2-7 Compilação de estudos sobre conforto térmico em nível de pedestre

Tema: Conforto térmico em nível de pedestre				
Local do estudo - Autores	Objetivos	Software	Metodologia	Principais conclusões
Vitória/ES - Silva (2014)	Avaliar a importância do vento para conforto térmico em nível de pedestre em um trecho da orla de Camburi, através do Método Integrado de Avaliação de Ventilação.	Método Integrado de Avaliação de Ventilação.	Foram analisados aspectos relativos às configurações urbanas, percepção térmica de transeuntes e análise de legislação urbana para a localidade. A pesquisa não trata de aspectos voltados a simulação urbana por CFD, mas apresenta e descreve conceitos relativos à ventilação urbana como vento atmosférico, rugosidade, porosidade, escalas climáticas urbanas, efeitos do vento em edificações, entre outros.	A pesquisa constata que há maior redução de velocidade de vento em edificações de até seis metros de altura e com poucos afastamentos. Por outro lado, em edifícios altos, a velocidade se mantém constante quando há afastamentos consideráveis entre as edificações. Dessa forma, pode-se afirmar que a porosidade é o elemento que mais influencia nas condições de conforto térmico no nível de pedestre para climas quente e úmido.

2.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ESTUDOS DE VENTILAÇÃO URBANA COM O USO DE TÉCNICAS CFD NO BRASIL E EM OUTROS PAÍSES

Nesta seção, encontra-se uma análise comparativa entre as pesquisas internacionais e brasileiras, com informações sobre principais objetivos, aspectos metodológicos, *software* utilizados e conclusões, conforme os Quadros 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 mostrados anteriormente.

2.4.1 PRINCIPAIS OBJETIVOS DAS PESQUISAS

PRINCIPAIS OBJETIVOS	
Nacionais	Internacionais
São relacionados ao escoamento de vento no entorno das edificações e análise de conforto em nível do pedestre.	No exterior, as pesquisas discutem sobre avaliação do incômodo, segurança e conforto em nível de pedestre e nos espaços urbanos.
Pesquisam estudos de caso e os efeitos das prescrições urbanísticas, efeito aerodinâmico do vento no entorno de edificações, análise de recuos, aumento de gabaritos, disposição de edificações e propostas de ocupação e uso do solo.	Analizam as implicações das disposições e efeitos da urbanização no escoamento do vento.
Alguns estudos ressaltam a importância de parâmetros de configuração confiáveis aplicados à modelagem computacional de vento e propõem recomendações gerais.	Dissertam sobre potencial de ventilação para arrefecimento passivo, desempenho de configurações e disposições de edifícios e taxas médias de ventilação cruzada.
	Desenvolvem pesquisas específicas para investigar os impactos e implicações da inserção de parâmetros de configuração aplicados em modelagem computacional para estudos de ventilação urbana.

2.4.2 PRINCIPAIS ASPECTOS METODOLÓGICOS ADOTADOS

PRINCIPAIS ASPECTOS METODOLÓGICOS	
Nacionais	Internacionais
Utilizam dinâmica dos fluidos computacional para obtenção de dados de natureza qualitativa e quantitativa.	Utiliza-se o modelo de dinâmica dos fluidos, medições <i>in loco</i> com instrumentos específicos.
Fazem uso de medições <i>in loco</i> para avaliar e comparar com o comportamento dos dados obtidos nas simulações CFD.	Empregam também protótipos em escala reduzida submetidos a ensaios em túneis aerodinâmicos, onde confrontam as informações obtidas nas medições com os simulados para aferição dos

(Continuação)

PRINCIPAIS ASPECTOS METODOLÓGICOS	
Nacionais	Internacionais
Alguns trabalhos mostram preocupação com a confiabilidade e qualidade dos resultados, além de ressaltarem a importância da correta configuração das simulações para obtenção de informações confiáveis quanto à simulação CFD.	Investem esforços para avaliar os impactos de parâmetros computacionais inseridos pelos usuários e a forma que esses repercutem nos resultados, na qualidade, na confiabilidade e precisão das informações.
Poucos trabalhos aplicam fontes bibliográficas que abordam aspectos relativos a parâmetros de configuração para modelagem da ventilação urbana ou GBP.	Realizam estudos de sensibilidade dos parâmetros inseridos nos programas e fazem usos de pesquisas que compilam informações e recomendações aplicadas nas simulações CFD, conhecido como Guia de Boas Práticas (GBP).

2.4.3 SOFTWARE UTILIZADO PARA AS SIMULAÇÕES

SOFTWARE UTILIZADO	
Nacionais	Internacionais
Os softwares utilizados são <i>Phoenix</i> e <i>Ansys CFX</i> , sendo este último mais aplicado.	Os softwares comumente utilizados são o <i>Fluent</i> e <i>Ansys CFX</i> . Sendo o primeiro, utilizado frequentemente.
Em alguns casos, usa-se o <i>Ansys Icem CFD</i> ou <i>Ansys Meshing</i> para geração de malha.	Utiliza-se também o programa <i>Gambit</i> para geração de malha.

2.4.4 PRINCIPAIS CONCLUSÕES OBTIDAS

PRINCIPAIS CONCLUSÕES	
Nacionais	Internacionais
A simulação CFD é usada no Brasil para obtenção de dados que possibilitem a análise do espaço construído, a implementação de medidas ou recomendações para melhores condições de conforto térmico em meio urbano, conforme particularidade climática do local da pesquisa.	Possuem o intuito de se beneficiar das condições ambientais para o melhoramento do ambiente construído. São relativas à avaliação quanto à disposição de edificações e efeitos da urbanização ou estudos de previsão de cenários futuros e proposição de melhorias.
Tratam de redução de recuos, controle de gabaritos, interferência da disposição das edificações e formação de esteiras de vento ou áreas estagnadas.	Propõem recomendações quanto à ventilação em nível de pedestre, através de estratégias para redução ou aumento de vento em áreas desejadas.
	Apresentam recomendações quanto às práticas aplicadas a modelagem CFD para ventilação urbana.

2.5 DISCUSSÃO

A aplicação da ferramenta CFD é relativamente nova no Brasil, quando comparado ao tempo de estudo que se tem desta em outros países. Das pesquisas investigadas, muitas trabalham com modelagem computacional e/ou recorrem a medições *in loco*. Em alguns casos, a literatura internacional possui o diferencial de aplicarem testes em túneis de vento aerodinâmicos.

As pesquisas internacionais dedicam suas pesquisas a estudos de predição de ventilação natural por CFD, e, além disso, buscam averiguar a confiabilidade e qualidade dos resultados obtidos. Para isso, autores como Blocken, Stathopoulos e Carmeliet (2007), Blocken, Janssen e van Hooff (2012), Franke *et al.* (2004), Franke (2006), Franke *et al.* (2007), Zhang (2009) destinaram suas pesquisas a investigação de inserção de configurações como condições de contorno, rugosidade, modelos de turbulência, homogeneidade da CLA (Camada Limite Atmosférica) aos *software* utilizados etc. Constam nas pesquisas internacionais, materiais com compilações e recomendações gerais e específicas para simulação da ventilação urbana, conhecido como Guia de Boas Práticas (GBP), que funciona como um orientador sobre as práticas mais adotadas em simulações em meio urbano.

Nas pesquisas brasileiras há uma inclinação para estudos de predição de ventilação, no sentido de analisar cenários existentes e propor recomendações quanto a cenários futuros, através da avaliação da ventilação e do conforto em nível de pedestre em áreas que apresentam processo de verticalização. Em alguns casos, encontram-se referências que retratam a importância e aplicação de parâmetros de configuração específicos a modelagem computacional da ventilação urbana, mas não se tem um aprofundamento sobre o tema.

Sendo assim, constata-se que as simulações brasileiras têm apresentado trabalhos relevantes, com investigações pertinentes e passíveis de aplicabilidade na cidade, contudo estas pesquisas caminham de forma lenta, quando comparada aos avanços encontrados nas simulações internacionais. Para isso, é necessário um esforço maior, no sentido de aplicar GBP e referências relevantes que tratem de questões relativas às configurações aplicadas as simulações de ventilação natural de espaços urbanos.

2.6 CONCLUSÃO

Entre as pesquisas levantadas e analisadas, constatou-se grande ênfase em estudos de caso, onde publicações nacionais abordam questões relacionadas ao conforto térmico, enquanto pesquisas internacionais investigam além desta questão, aspectos voltados ao incômodo causado pelo vento. Quanto às principais diferenças encontradas nos trabalhos, é possível citar: os estudos

internacionais dão ênfase em pesquisas voltadas à investigação de parâmetros de configurações adotados nos programas, como os modelos de turbulência mais adequados, a importância e os parâmetros de refinamento de malha, as configurações para representação adequada das condições de fronteira, correto dimensionamento de domínios computacionais, enquanto uma minoria das pesquisas brasileiras analisadas adota de forma mais abrangente e consistente recomendações quanto a refinamento de malha, configurações de condições de fronteira, parâmetros que garantam a homogeneidade horizontal da camada limite atmosférica, entre outros.

Dessa forma, as publicações brasileiras trabalham no avanço quanto aos aspectos de modelagem computacional da ventilação urbana, na tentativa de reproduzir as diretrizes e os resultados encontrados na literatura mundial. Entretanto há um descompasso no que concerne à investigação de parâmetros e aplicação de configurações computacionais em relação à produção internacional que precisam ser aprimorados.

2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-SALLAL, K. A.; AL-RAIS, L. Outdoor airflow analysis and potential for passive cooling in the modern urban context of Dubai. **Renewable Energy**, 38, p. 40-49, 2012.

ASFOUR, O. S. Prediction of wind environment in different grouping patterns of housing blocks. **Energy and Building**, v. 42, p. 2061-2069, 2010.

BITTENCOURT, L. S.; CRUZ, J. M.; 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, 4º, 1997. Artigo Técnico, 1997. Salvador, BA, 1997. p. 102-106.

BLOCKEN, B. 50 years of Computational Wind Engineering: past, present and future. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2014.

BLOCKEN, B.; JANSSEN, W. D.; VAN HOOFF, T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: general decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environment Modelling and Software**, 2012.

BLOCKEN, B.; PERSON, J. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2009.

BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. **Atmospheric Environment**, 2007.

BRANDÃO, R. S. **As interações espaciais urbanas e o clima**. São Paulo, FAUUSP, 2009. Tese de Doutorado.

CHEUNG, J. O. P.; LIU, C. CFD simulations of natural ventilation behavior in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacing. **Energy and Buildings**, 2011.

COSTA, F. J. M.; ARAUJO, V. M. D. **Ventilação e prescrições urbanísticas – uma aplicação simulada no bairro de Petrópolis, em Natal/ RN**. In: VI Encontro Nacional e III Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, Anais... São Pedro, SP: s/e, 2001.

- COSTA, L. C. N. **Aproveitamento da ventilação natural nas habitações: um estudo de caso na cidade de Aracaju – SE.** São Paulo, FAUUSP, 2009. Dissertação de Mestrado.
- CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação.** São Paulo, FAUUSP, 2006. Dissertação de mestrado.
- CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 145-158, jan./ mar. 2011.
- FRANKE, J. **Recommendations of the COST action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment.** The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006), Yokohama, 2006.
- FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLÜNZEN, H.; CARISSIMO, B. **Best Practice Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment.** COST 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models. COST Office Brussels, ISBN 3-00-018312-4, 2007.
- FRANKE, J.; HIRSCH, C.; JENSEN, A. G.; KRUS, H. W.; SCHATZMANN, M.; WESTBURY, P. S.; MILES, S. D.; WISSE, J. A.; WRIGHT, N. G. **Recommendations on the use of CFD in wind engineering**, 2004.
- LEITE, C. G. **Alterações na ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da avenida litorânea de São Luís/MA.** São Paulo, FAUUSP, 2008. Dissertação de Mestrado.
- LEITE, R. C. V.; FROTA, A. B. **Designing the city according to the wind: using a CFD to minimize the impacts of city growth on natural ventilation.** Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.
- LEITE, R. C. V. **A influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido.** São Paulo: FAUUSP, Tecnologia da Arquitetura. 2010. Dissertação de mestrado.
- MARQUES, R. S. **Ventilação e prescrições urbanísticas: uma aplicação simulada para a orla da praia do Meio em Natal/ RN.** Natal: UFRN, PPGAU, 2003. Dissertação de Mestrado.
- OLIVEIRA, M. C. A. **Simulação computacional para avaliação dos efeitos das modificações em casas autoconstruídas sobre a ventilação.** São Paulo, UNICAMP, 2009. Tese de Doutorado.
- PRATA, A. R. **Impacto da altura de edificios nas condições de ventilação natural do meio urbano.** São Paulo: FAUUSP, 2005. Tese de doutorado.
- RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: Validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 408–18, 2012.
- REITER, S. Assessing wind comfort in urban planning. **Environment and Planning B: Planning and Design** 37, 857-873, 2010.
- ROMERO, M. A. B. **A arquitetura bioclimática do espaço público.** Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2001.

SOUZA, V. M. B. **A influência da ocupação do solo no comportamento da ventilação natural e na eficiência energética em edificações: estudo de caso em Goiânia – clima tropical de altitude**. Brasília: UNB, 2006. Dissertação de mestrado.

SILVA, F. T. **Conforto térmico do transeunte: a porosidade urbana como condicionante da ventilação**. Vitória: UFES/ PPGAU, 2014. Dissertação de mestrado.

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

YUAN, C.; NG, E. Building porosity for better urban ventilation in high-density cities – a computational parametric study. **Building and Environment**, 2012.

ZHANG, X. **CFD simulation of neutral ABL flows**. Risø National Laboratory for Sustainable Energy. Technical University of Denmark. Roskilde, Denmark. April 2009.

3. USO DE TÉCNICAS CFD PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE OCUPAÇÃO DE QUADRAS NA VENTILAÇÃO URBANA POR AÇÃO DOS VENTOS

Resumo

A ventilação por ação dos ventos é um agente interveniente na qualidade do ar e nas trocas de calor nos espaços urbanos, sendo a velocidade do escoamento fator decisivo para determinar as trocas de calor e de renovação do ar. Dentre as ferramentas disponíveis para a análise do escoamento de ar no espaço urbano, destacam-se as técnicas CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Na modelagem CFD para problemas de Ventilação Urbana, é importante destacar alguns parâmetros de configuração que devem ser observados. Neste artigo, recorre-se ao uso da dinâmica dos fluidos computacional para analisar o efeito do adensamento urbano na ventilação por ação de ventos, entre quadras vizinhas e nas ruas adjacentes, e a potencialidade de técnicas de modelagem e simulação CFD neste tipo de estudo. A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é uma ferramenta útil por seu potencial em fornecer informações quantitativas e qualitativas. Entretanto, é necessária aplicação criteriosa dos parâmetros de simulação voltados à escala urbana para resultados confiáveis. Ao se compararem cenários de estudos de unidades isoladas e agrupadas, as primeiras predizem menos obstruções à circulação das correntes de ar, uma vez que o agrupamento de quadras representa um obstáculo à permeabilidade do ar, principalmente em nível de pedestre. O estudo evidenciou que a incidência do vento na quadra a 45° induz melhor circulação do ar, sendo recomendada para se obter melhores condições de ventilação em nível de pedestre entre quadras e ruas. Isto demanda maior atenção e a devida importância às legislações pelos urbanistas na configuração do tecido urbano para se melhorar o escoamento do vento em espaços urbanos. Como conclusão, salienta-se a importância das condições de configuração para a modelagem computacional CFD no caso da ventilação natural em escala urbana.

Palavras-chave: Modelagem CFD, Ventilação natural, Adensamento urbano.

3.1 INTRODUÇÃO

Com mais da metade da população mundial vivendo em meio urbano, o adensamento e a verticalização das cidades têm sido uma realidade com ativa influência na dinâmica de circulação dos ventos nas áreas urbanizadas, qualidade do ar e trocas de calor. Soma-se a isso o incremento na geração de poluentes e as alterações nos processos de trocas de calor nos espaços urbanos. Este último exerce papel fundamental no transporte de ar entre regiões pouco adensadas (campos, florestas, mares etc.) e as cidades, com repercussão na manutenção da qualidade do ar e nas condições de conforto térmico.

A circulação de ar no ambiente urbano ocorre em espaços de uso coletivo, como ruas, praças e parques, entre edificações e, no interior destas. No primeiro caso, a velocidade do escoamento é decisiva para determinar o grau das trocas de calor e de renovação do ar. No segundo caso, além da velocidade de escoamento, a geometria das construções e o posicionamento das suas aberturas são essenciais para a estimativa dos potenciais de ventilação cruzada nas edificações.

Pela diferença entre o coeficiente de pressão de duas fachadas, pode-se avaliar a vazão interna. De modo geral, tem-se a velocidade do escoamento nos diversos pontos da malha urbana e o valor do coeficiente de pressão nas fachadas das edificações como indicadores do potencial de ventilação por ação dos ventos.

O tema “Ventilação Urbana” tornou-se objeto de investigação de diversas pesquisas. Dentre as ferramentas disponíveis para a análise do escoamento de ar no espaço urbano, destacam-se as técnicas CFD (*Computational Fluid Dynamics*) (CÓSTOLA; ALLUCI, 2011). Esses procedimentos permitem simular, por meio de modelos computacionais, os mais diversos tipos de escoamentos, entre eles o que ocorre por ação dos ventos na malha urbana.

Na literatura, é possível encontrar considerável quantidade de trabalhos sobre esse tema. As pesquisas que exploram a ventilação urbana por ação dos ventos com uso de CFD, pode-se destacar: Blocken e Persoon (2009); Asfour (2010); Cheung e Liu (2011); Blocken e Gualtieri (2012); Blocken, Janssen e van Hooff (2012) e Chao e Ng (2012). Os temas abordados nesses estudos versam sobre: 1) avaliação de incômodos, conforto e segurança causado por ventilação em nível de pedestre em áreas urbanas; 2) avaliação dos efeitos da urbanização e predição de cenários futuros; 3) investigação da influência de diferentes tipos de configurações de edificações no potencial de ventilação até a análise dos efeitos de interferência que edifícios altos podem provocar nas taxas de ventilação cruzada.

As técnicas CFD baseiam-se nos princípios de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia. Esses princípios são representados por equações diferenciais parciais (EDP) não-lineares de segunda ordem. Essas equações são funções do tempo e do espaço (tridimensional), sendo por sua vez discretizadas, isto é, transformadas em equações algébricas passíveis de serem resolvidas numericamente. Na discretização, as derivadas são substituídas por operações de divisão com quocientes diferenciais espaciais (Δx , Δy e Δz) e temporal (Δt). Para que as equações possam ser resolvidas no espaço e no tempo, o problema precisa ser decomposto nos menores elementos possíveis. Dessa forma, a solução das equações algébricas se aproximará mais da solução das EDPs originais. A decomposição do espaço em elementos menores é feita através da geração de uma malha espacial. Quanto mais elementos essa malha tiver, ou menores eles forem, melhor é a aproximação das equações algébricas às EDPs. No entanto, mais elementos na malha causam maior demanda computacional, inviabilizando algumas vezes o uso de CFD.

De modo geral, CFD é uma ferramenta que auxilia a resolução de problemas fluidodinâmicos por métodos numéricos. É aplicada em engenharia de aeronaves, automobilismo, meteorologia,

oceanografia, entre outros (SIMÕES, 2009). Permite realizar simulações representativas com informações quantitativas e qualitativas do fluxo do escoamento de todo o volume simulado, com um custo baixo devido à redução de tempo, quando comparado aos métodos experimentais (REITER, 2010). Esta economia de tempo deve-se à possibilidade de construir diferentes projetos em escala computacional sem a necessidade da maquete física.

Dessa forma, CFD torna-se um recurso que pode ser aplicado em todas as etapas de um projeto, desde a fase inicial até a avaliação e reformulação de projetos existentes, pois proporciona informações para análise de desempenho (PRATA, 2005). Mas deve-se ressaltar a alta demanda de capacidade computacional e a necessidade de usuários bem treinados para a inserção dos parâmetros computacionais. Muitas vezes, obtêm-se resultados equivocados pela falta de preparo do usuário quanto à técnica (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Nesse sentido, destaca-se a necessidade de conhecimento de mecânica dos fluidos, assim como diretrizes relacionadas à dimensão de domínio, condições de contorno, resolução de malha e modelo de turbulência (BOTTEMA, 1999 *apud* REITER, 2010).

Para as diferentes aplicações de CFD, observam-se particularidades nos parâmetros de configuração. Na modelagem CFD para problemas de ventilação urbana, é importante destacarem-se alguns parâmetros que devem ser observados, como: geometrias e suas simplificações, dimensões do domínio computacional, perfis de vento, condições de contorno das fronteiras, tratamento de parede, modelos de turbulência, além de tipos e dimensões dos elementos da malha. A bibliografia relacionada à aplicação de CFD à ventilação urbana possui trabalhos que discutem como os parâmetros anteriores podem ser aplicados em simulações nesta área. A possibilidade de usar parâmetros já testados por outros autores colabora para que o tempo despendido em testes com modelos computacionais seja reduzido substancialmente. As próximas seções tratam deste assunto, relacionando considerações de vários autores sobre o tema.

3.2 OBJETIVO

Neste artigo recorre-se ao uso da dinâmica dos fluidos computacional para se analisar o efeito de adensamento urbano na ventilação por ação de ventos em grandes cidades, observando-se a influência do adensamento na ventilação de quadras vizinhas e nas ruas adjacentes, e a potencialidade de técnicas de modelagem e simulação CFD neste tipo de estudo.

3.3 MODELAGEM CFD APLICADA À VENTILAÇÃO URBANA

Na modelagem CFD, precisam ser cumpridas etapas para a construção e simulação do modelo. Alguns programas CFD podem exigir a inserção de parâmetros de configuração mais específicos, porém, de modo geral, os passos a seguir mostrados são fundamentais para a modelagem aplicada à ventilação urbana em *software* CFD. O primeiro passo é a **criação da geometria**. Nos problemas de ventilação natural, o interesse está no escoamento que ocorre ao redor e através da área urbana. Deste modo, a geometria que deve ser construída representa o volume de ar que envolve o espaço de interesse. Os limites desse volume precisam ser ampliados para que o escoamento possa “se desenvolver” no espaço entre a região de interesse e as fronteiras do volume modelado. Na região de interesse, a geometria das edificações e os detalhes da malha urbana podem ser incluídos. No entanto, a inserção de detalhes geométricos demanda tempo e maior capacidade computacional. Cabe, em cada caso, verificar quais simplificações podem ser feitas na geometria para reduzir a complexidade geométrica com a mínima interferência possível nas condições do escoamento sob consideração.

O passo seguinte é a **geração da malha** na geometria estabelecida. Essa é uma decomposição do espaço em volumes menores (elementos), nos quais as equações governantes são resolvidas. Neste processo, é importante que em regiões onde (se espera que) haja maior gradiente das grandezas relevantes ao fenômeno considerado, a malha tenha um grau de refinamento maior. Regiões próximas a paredes rugosas são um dos locais onde é comum haver grandes variações de grandezas como velocidade, e, portanto, necessitam de refinamento local na malha. No caso da ventilação urbana, as regiões que necessitam de maior refino estão, em geral, perto de paredes, do solo e entre edificações.

Após a geração da malha, precisa-se determinar quais **equações governantes e condições de contorno** serão utilizadas. De modo geral, as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento (*Navier-Stokes*) são comumente utilizadas. Em problemas que envolvem trocas de calor, que não é o caso desta pesquisa, a equação de conservação de energia também deve ser usada. Há ainda as equações relacionadas ao **modelo de turbulência** escolhido. É necessário o uso de um modelo de turbulência para que não haja necessidade de refinamento excessivo da malha computacional, já que os fenômenos relacionados à turbulência nos escoamentos ocorrem em microescala. Para descrever os fluxos turbulentos, são utilizados modelos RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) (FRANKE *et al.*, 2007; ZHANG, 2009; RAMPONI; BLOCKEN, 2012).

Esses modelos inserem os efeitos de turbulência na solução de “escoamento médio” obtida pelas equações de conservação. Entre os modelos de turbulência, o mais utilizado é o $k-\epsilon$,

composto por duas equações: uma para cálculo da energia cinética turbulenta (k) e outra para taxa de dissipação de energia (ϵ) (COSTÓLA; ALUCCI, 2011). Nos estudos de ventilação urbana por ação dos ventos, usam-se as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento e, em geral, as equações de turbulência do modelo k - ϵ . Devem ser determinadas também as condições de contorno das fronteiras do domínio, incluindo-se os perfis de velocidade para vento e as rugosidades de parede.

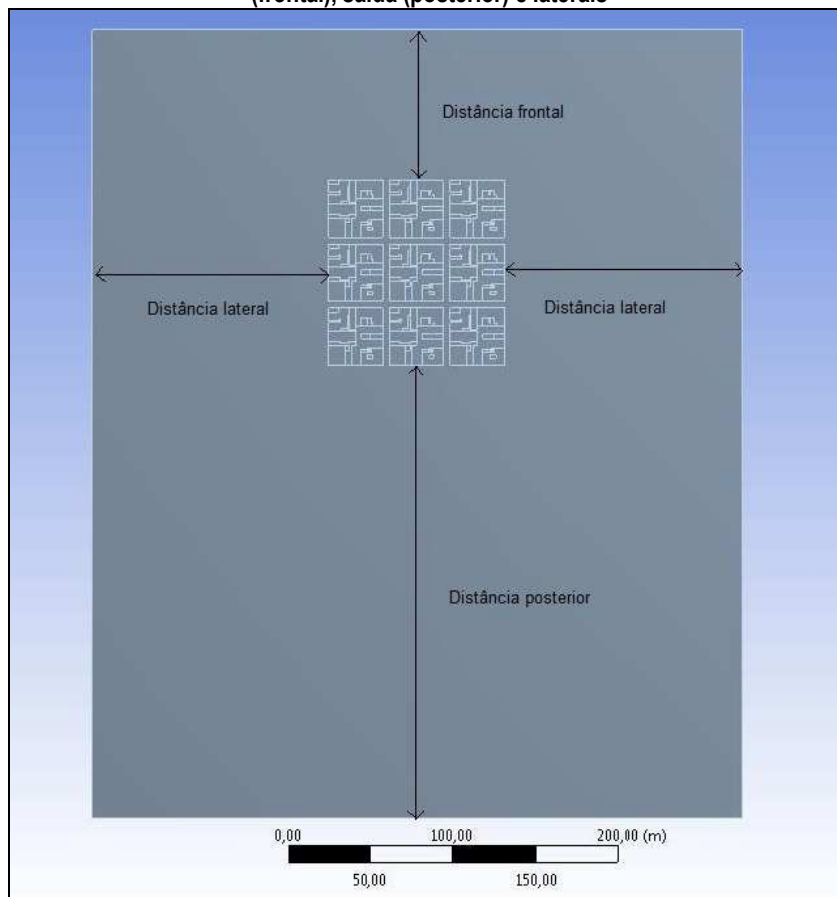
Finalmente, a partir do modelo construído anteriormente, pode-se começar a **simulação**. Como os algoritmos de CFD utilizam métodos numéricos iterativos, a solução converge quando um determinado erro médio ou máximo é atingido. É comum, após a simulação, o uso de alguma ferramenta específica de visualização. Nos problemas relacionados à ventilação natural, é usual a pressão, coeficientes de pressão e no caso dessa pesquisa, a visualização dos contornos de velocidade, que é a velocidade do vento expressa por meio de graduação de cores que indicam sua intensidade e direção.

3.3.1 GEOMETRIAS E DOMÍNIOS

Em simulações de ventilação natural, o interesse está em simular o entorno das edificações. Isto quer dizer que a geometria é construída para modelar o escoamento do ar ao redor do objeto de interesse. Quanto mais próxima a representação estiver da realidade, melhor será a reprodução das condições reais existentes. Essa aproximação com o modelo original tem um custo computacional, pois quanto mais detalhes geométricos, maior o número de elementos resolvidos pelos algoritmos numéricos (FRANKE *et al.*, 2007). Entretanto, Hensen e Lamberts (2011) concordam ser impreciso afirmar que o aumento da complexidade do modelo produz diminuição das incertezas dos resultados.

O tamanho do domínio computacional tem influência direta nas dimensões da área a ser simulada, tanto que repercutem para um bom ou mal resultado das simulações (FRANKE *et al.*, 2004; FRANKE *et al.*, 2007). Sendo assim, é necessária uma distância suficiente à montante e a jusante do objeto simulado, para que não ocorram interferências nos resultados (Figura 3-1).

Figura 3-1 Exemplo de domínio retangular com indicação do local de aplicação das distâncias: entrada (frontal), saída (posterior) e laterais



Fonte: Autora, 2015.

Quanto ao formato do domínio, os modelos comumente usados são o retangular, o circular ou o octogonal. Segundo Cóstola e Alucci (2011), o domínio retangular exige menos capacidade computacional e tempo de processamento, enquanto o octogonal admite simular diversas orientações de vento. Assim como o octogonal, o domínio circular também simula diferentes orientações de vento.

Franke *et al.* (2004) e Franke (2006) aconselham que, em áreas urbanas, as dimensões do domínio sejam tomadas em função da altura do edifício mais alto ($H_{m\acute{a}x}$) a ser simulado. No Quadro 3-1, são apresentadas as recomendações para domínio retangular. São apontadas as dimensões de entrada, laterais, topo (superior) e saída (posterior) para áreas urbanas.

Quadro 3-1 Dimensão dos domínios para entrada, laterais, topo e saída à região simulada

Distância	Referência bibliográfica	O que é recomendado?
Entrada	Franke <i>et al.</i> (2004) e Franke (2006).	Distância de pelo menos cinco vezes a altura do edifício mais alto ($5H_{m\acute{a}x}$).
Lateral	Franke <i>et al.</i> (2004) e Franke (2006).	Distância de pelo menos cinco vezes a altura do edifício mais alto ($5H_{m\acute{a}x}$).

(Continua)

(Continuação)

Distância	Referência bibliográfica	O que é recomendado?
Topo (superior)	Franke <i>et al.</i> (2004), Franke (2006) e Franke <i>et al.</i> (2007).	Distância de pelo menos cinco vezes a altura do edifício mais alto ($5H_{m\acute{a}x}$). Franke (2006) recomenda que se a secção transversal desses edifícios agrupados for muito maior que a altura do edifício mais alto, a distância entre o limite de altura desta edificação e o topo do domínio computacional pode ser seis vezes maior que este edifício mais alto ($6H_{m\acute{a}x}$). Franke <i>et al.</i> (2004) e Franke (2006) recomendam relação de bloqueio ¹ entre a parte superior do domínio computacional e o edifício seja inferior a 3% para evitar uma aceleração artificial do fluxo ao longo do edifício.
Posterior (fundo)	Franke <i>et al.</i> (2004) e Franke (2006).	Dimensão seja pelo menos quinze vezes a altura do edifício mais alto ($15H_{m\acute{a}x}$), para que permita o desenvolvimento da região de esteira ² atrás dos edifícios, o que facilitaria a convergência das simulações.

Fonte: Autora, 2015.

Nota: (1) 'Relação de bloqueio ou distância de bloqueio': é a razão entre a área projetada dos edifícios na direção do fluxo pela secção transversal livre do domínio computacional (FRANKE *et al.*, 2007).

(2) 'Região de esteira': corresponde à área posterior a incidência de vento e é gerada pela recirculação do fluxo advindo da camada limite. O fluxo é turbulento e apresenta vórtices e refluxos de baixa velocidade (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

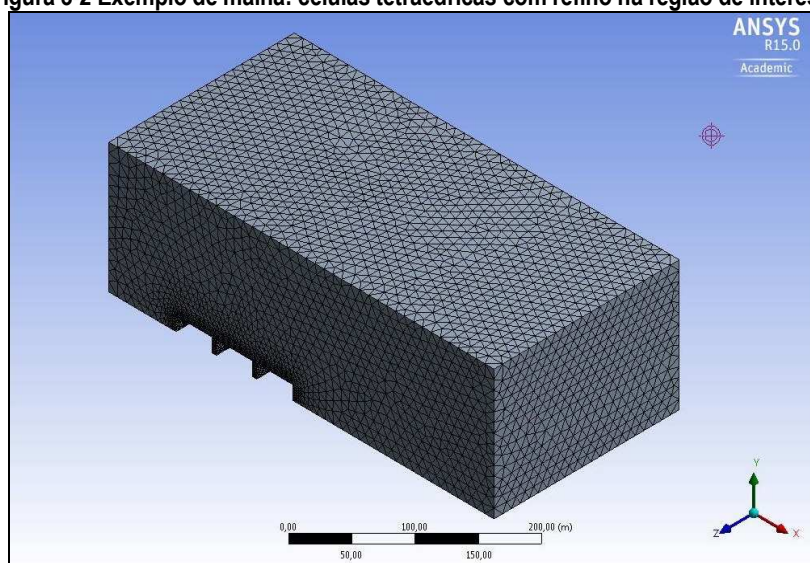
3.3.2 GERAÇÃO DE MALHA

A malha computacional corresponde a uma divisão do espaço em pequenos volumes (elementos/ células) que serão calculados por equações diferenciais parciais (Figura 3-2). Essa malha pode ser do tipo hexaédrica, tetraédrica, prismática ou piramidal. Os resultados das simulações computacionais dependem fundamentalmente da malha (*grid*) usada para a discretização do domínio. Segundo Franke *et al.* (2004) e Franke *et al.* (2007), a malha deve possuir elevada qualidade, ou seja, alto refino para que possa capturar fenômenos como camadas de cisalhamento¹ e vórtices², principalmente na região de interesse. Deve-se atentar também para a capacidade computacional e o tempo disponível de investigação. Os autores afirmam que não é possível fazer recomendações específicas sobre o refinamento da malha, pois esta varia em função do problema.

¹ Camada de cisalhamento: tensão ou força provocada pela componente do vento paralela à superfície (SILVA, 2013, p. 14).

² Vórtices: escoamentos com trajetórias circulares e estrutura organizada (redemoinhos) (SILVA, 2013, p. 26).

Figura 3-2 Exemplo de malha: células tetraédricas com refino na região de interesse



Fonte: Autora, 2015.

Entretanto, apresentam algumas recomendações gerais quanto ao tipo de elemento e refinamento (Quadro 3-2).

Quadro 3-2 Recomendações gerais para a construção e refino de malha na modelagem CFD de ventilação urbana

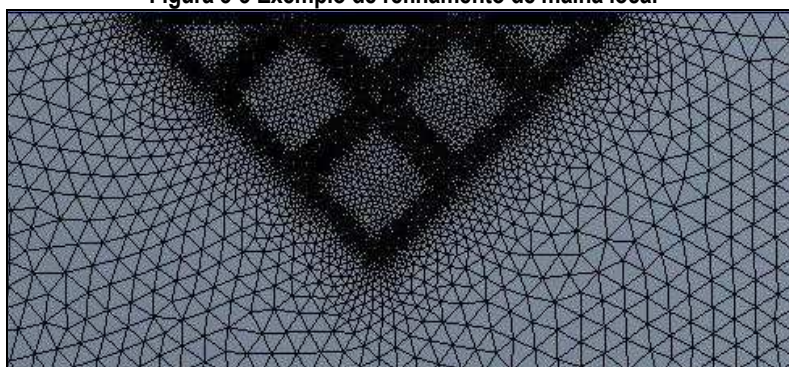
Referência bibliográfica	O que é recomendado?
Franke <i>et al.</i> (2004), Franke (2006), Franke <i>et al.</i> (2007) e Blocken, Janssen e van Hooff (2012).	Uso preferencial de células hexaédricas em vez de tetraédricas, pois o formato hexaédrico exhibe melhor convergência iterativa. Entretanto, não exclui a possibilidade do uso de células tetraédricas, recomendando a utilização dessas em conjunto com células prismáticas. Blocken, Janssen e van Hooff (2012) recomendam o uso de células prismáticas ou hexaédricas próximas às paredes (interface sólida com rugosidade).
Franke <i>et al.</i> (2004), Franke <i>et al.</i> (2007) e An, Fung e Yim (2013).	Que o coeficiente de expansão entre duas células sucessivas, na vertical e horizontal, tenha um valor inferior a 1,2.
Franke <i>et al.</i> (2004) e Franke (2006).	Nas áreas de interesse, devem ser estabelecidas inicialmente pelo menos dez células por raiz cúbica de volume de edificação, e aconselha-se o uso de pelo menos dez células no espaço que separa as edificações.

Fonte: Autora, 2015.

3.3.2.1 Refinamentos locais

Os refinamentos locais são recomendados em áreas onde se deseja observar mais claramente os fenômenos relacionados ao comportamento do fluido, como vórtices e camadas de cisalhamento. Locais, como faces das edificações e espaçamento entre construções, são regiões onde ocorrem grandes variações de fluxo de ar, portanto, necessitam de maior refino da malha. Entretanto, esse refinamento aumenta o número de elementos, que são os volumes onde se resolvem as equações governantes, o que exige maior capacidade de processamento computacional e tempo de simulação (Figura 3-3).

Figura 3-3 Exemplo de refinamento de malha local



Fonte: Autora, 2015.

3.3.2.2 Independência de malha

A independência de malha é quando os resultados encontrados nas simulações não dependem da densidade da malha adotada (CÓSTOLA; ALLUCI, 2011). Para que se garanta essa independência, é recomendável aplicar pelo menos três testes de refino com diferentes tamanhos de malha na simulação (FRANKE *et al.*, 2004; FRANKE *et al.*, 2007). O ideal é que o refino da malha não cause interferência significativa nos resultados encontrados. Essa independência pode ser estimada na parte da malha que contém refinamento local e não em toda a malha, baseado em algum critério como as variações que ocorreram no fluxo (FRANKE *et al.*, 2004). Um fator sinalizador da qualidade da malha é a solução numérica. Quando uma simulação não apresenta convergência (não atingiu uma solução numérica); isto pode ser um indicativo de que a malha está 'grosseira', ou seja, não apresenta boa qualidade e que necessita de maior refino (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Entretanto este procedimento requer tempo e capacidade computacional.

3.3.3 EQUAÇÕES GOVERNANTES

3.3.3.1 Modelo de turbulência: modelo k- ϵ padrão

Após a criação da malha, as equações governantes precisam ser resolvidas numericamente. Além disso, são usadas equações para descrever os fluxos turbulentos, necessárias para exibir os escoamentos que acontecem em microescala. Esses fluxos turbulentos são calculados por modelos RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) conhecidos por sua simplicidade e economia computacional (ZHANG, 2009; RAMPONI; BLOCKEN, 2012). Entre os modelos de turbulência ou de fechamentos mais usados está o modelo de turbulência k- ϵ . Ele é composto de duas equações: (k) que é responsável pelo cálculo da energia cinética e (ϵ) que calcula a taxa de dissipação de energia que inserem os efeitos de turbulência no escoamento médio adquirido das equações de conservação.

3.3.3.2 Critério de convergência

O critério de convergência existe para que as equações de conservação de momento e massa, resultantes da discretização da malha, sejam resolvidas dentro de cada célula (elemento). Pode-se afirmar que a solução converge quando atinge um determinado erro médio ou máximo estabelecido previamente (FRANKE, 2004). A diferença entre a massa e momento que entra e que sai de cada célula é chamada de resíduo de cálculo, que corresponde ao que não foi distribuído entre a entrada e saída da célula (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Se essa iteração é interrompida cedo demais, o erro de convergência iterativo é a diferença entre essa solução intermediária e a solução exata do sistema de equações (FRANKE *et al.*, 2007). Dessa forma, pode-se afirmar que a convergência funciona como um critério de parada ao esquema iterativo da solução numérica. Esse cálculo é realizado também para a turbulência (CÓSTOLA, 2006). Pesquisadores como Franke (2006) e An, Fung e Yim (2013) sugerem que dimensionamento dos resíduos (RMS, MÁX) seja de pelo menos 10^{-4} .

3.3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

3.3.4.1 Perfil de velocidade do vento

Na fronteira ou face de entrada do fluido é imposta a condição de velocidade de entrada do fluxo (*inlet*). A velocidade do vento é modelada por um perfil logarítmico, que considera o comprimento de rugosidade do terreno (z_0)³ (FRANKE *et al.*, 2004; FRANKE *et al.*, 2007; ZHANG, 2009; BLOCKEN, JANSSEN, VAN HOOFF, 2012). A Tabela 3-1 fornece uma classificação de comprimentos de rugosidades, conforme o tipo de terreno.

Tabela 3-1 Classificação de rugosidades Davenport

Tipo de superfície	z_0 [cm]	Tipo de superfície	z_0 [cm]
Superfície do mar	0,02	Campo de arbustos	35 - 45
Deserto plano; cimento	0,02 - 0,05	Pinhal	80 - 160
Campo de neve plano	0,01 - 0,07	Floresta tropical	170 - 230
Erva cortada	0,1 - 1	Casas dispersas	20 - 40
Erva, estepe	1 - 4	Subúrbios densos "baixos"	80 - 120
Campo arado	2 - 3	Cidade	70 - 120
Erva alta	4 - 10	Centro de cidade (edifícios altos)	200 - 300
Campo de cereal	10 - 30		

Fonte: Wieringa (1992) *apud* Silva (2013).

³ O comprimento de rugosidade do terreno é a condição de não escorregamento (*no slip*) entre a camada de ar em contato com a superfície, o que gera uma redução da velocidade do vento pelas forças de atrito com a superfície (BROWN; DEKAY, 2004, p. 40).

As equações utilizadas para descrever o perfil de velocidade média do vento consideram a Camada Limite Atmosférica (CLA)⁴ em condição de estratificação neutra⁵ (BLOCKEN; JANSSEN; VAN HOOFF, 2012). Richards e Roxey (1993) afirmam que para as simulações computacionais de vento em meio urbano, a camada superficial atmosférica, com aproximadamente 200m e está localizada dentro da CLA, é a camada que realmente importante para as simulações (Anexo B).

A Equação 1 mostra o perfil de entrada da velocidade média vertical do vento [Eq.1] (RAMPONI; BLOCKEN, 2012).

$$U = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad [\text{Eq.1}]$$

sendo:

- a) U = velocidade média do vento na altura z [m/s];
- b) u^* = velocidade de atrito [m/s];
- c) K = constante de von Kármán [≈ 0.4];
- d) z = altura em relação ao solo [m];
- e) z_0 = comprimento de rugosidade aerodinâmica [m], tendo seu valor definido em função das características do terreno (Tabela 3-1);

sendo a velocidade de atrito calculada a partir da velocidade especificada (U_h) para a altura de referência h [Eq. 2] (RICHARDS; ROXEY, 1993).

$$u^* = \frac{k \cdot U_h}{\ln \left(\frac{h + z_0}{z_0} \right)} \quad [\text{Eq.2}]$$

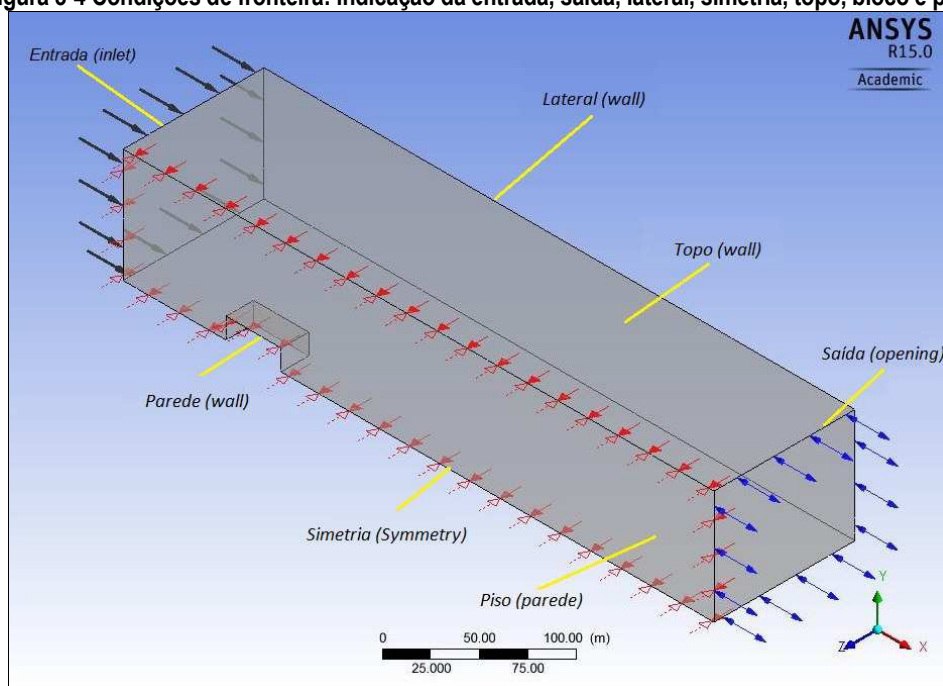
3.3.4.2 Fronteiras e rugosidade em superfícies de parede

As condições de fronteiras representam o limite do domínio computacional e são aplicadas nas faces do domínio. Devem estar a uma distância suficiente da região de interesse, pois influenciam diretamente no escoamento do fluido. No presente trabalho, foram classificadas em sete categorias: entrada, saída, lateral, simetria, topo, bloco e piso (Figura 3-4).

⁴ Camada Limite Atmosférica (CLA) é a parte mais baixa da atmosfera diretamente influenciada pela superfície terrestre.

⁵ "Nesta situação, influência da distribuição da temperatura pode ser negligenciável, o fluxo de calor é próximo de zero e não há convecção, sendo a turbulência essencialmente gerada pelas tensões de cisalhamento (tensão ou força provocada pela componente do vento paralela a superfície) devido aos gradientes de velocidade e viscosidade do ar" (ZHANG, 2009 apud SILVA, 2013, p. 14).

Figura 3-4 Condições de fronteira: indicação da entrada, saída, lateral, simetria, topo, bloco e piso



Fonte: Autora, 2015.

A fronteira de entrada foi descrita na seção 3.3.4.1. As outras condições de fronteiras estão descritas no Quadro 3-3.

Quadro 3-3 Recomendações gerais para as condições de fronteira (contorno) aplicadas nas faces do domínio

Fronteira	Referência bibliográfica	O que é recomendado?
Saída	Franke <i>et al.</i> (2004), Ramponi e Blocken (2012) e An, Fung e Yim (2013).	Adotar condição de fronteira aberta (<i>opening</i>). O fluido deixa o domínio computacional, por isso a necessidade de se localizar as faces da fronteira longe das edificações simuladas. O fluido é forçado a desaparecer e representar o escoamento totalmente desenvolvido, ou seja, a espessura da camada limite atmosférica e perfil de velocidade não mudam no decorrer do fluxo. É aconselhável adotar pressão estática igual à zero.
Lateral	Cóstola e Alucci (2011), Franke (2006), Blocken, Carmeliet e Stathopoulos (2007).	As condições de fronteiras laterais são aplicadas nas faces laterais do domínio computacional. Essas correspondem ao plano de passagem do fluido dentro do domínio. Para Cóstola e Alucci (2011) é recomendável a condição de fronteira aberta (<i>opening</i>) quando o domínio é circular. E, condição de fronteira parede (<i>wall</i>), quando o domínio é retangular, portanto não permite entrada e nem saída do fluido. Franke (2006), Blocken, Carmeliet e Stathopoulos (2007) recomendam aplicar a condição de fronteira simetria (<i>symmetry</i>) quando o fluxo de abordagem é paralelo a esta superfície.
Simetria	Franke (2006), Blocken, Carmeliet e Stathopoulos (2007).	A condição de fronteira simetria (<i>symmetry</i>) contribui para a redução do número de elementos, portanto melhora a capacidade computacional de processamento. É necessário que a geometria a ser simulada esteja 'cortada' ao meio para a aplicação dessa condição.

(Continua) 36

(Continuação)

Topo	Blocken, Stathopoulos e Carmeliet (2007), Brandão (2009), Blocken, Persoon (2009), Cóstola e Alucci (2011).	Para Blocken, Persoon (2009), Blocken, Stathopoulos e Carmeliet (2007) e Brandão (2009) na fronteira de topo é aplicada a condição de fronteira parede (<i>wall</i>). Para Cóstola e Alucci (2011) é recomendável à condição de fronteira aberta (<i>opening</i>) no topo quando o domínio é circular.
Bloco	Brandão (2009), Cóstola e Alucci (2011).	Representa o objeto simulado, sendo aplicada a condição de fronteira parede (<i>wall</i>).
Piso	Brandão (2009), Cóstola e Alucci (2011).	No piso é aplicada a condição de fronteira parede (<i>wall</i>).

Fonte: Autora, 2015.

As superfícies sólidas são configuradas com condições de fronteira parede (*wall*). Podem ser classificadas como: tipo *free slip*, quando o fluido não encontra resistência da superfície, ou tipo *no slip*, situação em que há uma condição de não escorregamento à passagem do fluido, havendo redução da velocidade devido à rugosidade da superfície (BROWN; DEKAY, 2004). É possível classificar a condição *no slip* como *smooth wall*, em que há a representação da rugosidade com uma ordem de grandeza inferior ao elemento em si, ou ainda, *rough wall*, em que é determinado um valor para o coeficiente de atrito das superfícies. No teto e nas laterais é aplicada a condição *free slip*. Em outras superfícies, como no piso e bloco, é inserida a condição de não escorregamento ou *no slip* (BRANDÃO, 2009; LEITE, 2010).

3.4 METODOLOGIA

As etapas metodológicas foram divididas em duas partes: 1. Descrição dos modelos e condições de contorno com geometrias e domínios construídos, condições de contorno aplicadas aos cenários, criação, refino e independência de malha, equações governantes e critério de convergência; e, 2. Aplicação do método de análise dos resultados através dos contornos de velocidade em planos horizontais e pontos de obtenção de velocidade de vento em diferentes alturas.

Como parâmetro para modelagem, quadras com características similares às encontradas em Belém/PA, com alta verticalização, foram utilizadas como referência. O interesse na capital paraense justifica-se por esta ter legislação urbana consolidada e recentemente atualizada, entendendo-se que há potencial para desenvolver estudos de ventilação natural urbana na referida cidade. Além desse fator, a cidade tem passado por expressivas transformações da malha urbana, como o processo de verticalização e adensamento do solo urbano.

As simulações computacionais foram elaboradas conforme investigação dos parâmetros adotados em modelagem CFD para espaços urbanos. Para isso, foram definidos parâmetros de

configuração para as geometrias simuladas e suas dimensões, as equações governantes e o modelo de turbulência, o critério de convergência, as dimensões do domínio computacional, as condições de contorno adequadas, a inserção do perfil de velocidade e as configurações de rugosidade do terreno e, por fim, a confecção e o refino da malha. Após a criação e modelagem computacional, os resultados foram analisados: qualitativamente, interpretando-se os contornos de velocidade e o comportamento do vento através de planos horizontais em diferentes alturas e, quantitativamente, por comparação entre os valores de velocidade do vento coletados nos cenários simulados. Dessa forma, tornou-se possível verificar as influências do adensamento urbano na ventilação natural entre quadras vizinhas e nas ruas adjacentes pela modelagem CFD.

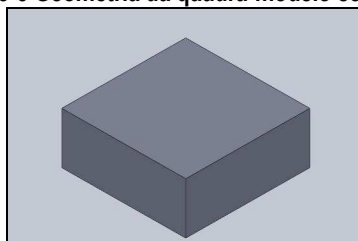
Para a pesquisa, foi utilizado o *software Solidworks 10.0* para a construção das geometrias e o *Ansys Meshing 15.0* para a geração de malha e resultados. Esses programas foram selecionados devido à aquisição de licença e treinamento prévio. A seguir são apresentadas as decisões tomadas quanto às práticas e diretrizes aplicadas em simulação CFD.

3.4.1 DESCRIÇÃO DOS MODELOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

3.4.1.1 Geometrias construídas

A geometria utilizada como referência corresponde às quadras com características similares às encontradas em Belém/PA e em situação de alta verticalização. Sendo assim, a quadra-modelo constitui-se de um bloco sólido com as dimensões de 160m x 160m. Para reproduzir a condição de alta verticalização, adotou-se o comprimento do edifício existente mais alto da quadra, que corresponde a um prédio de 25 pavimentos com pé-esquerdo de 2,85m, portanto 71,25m de altura. Entretanto, para efeitos de cálculos, considerou-se a altura do bloco com 60m (Figura 3-5).

Figura 3-5 Geometria da quadra-modelo construída



Fonte: Autora, 2015.

Para reproduzir a condição de adensamento, utilizou-se como premissa que a área da quadra construída estava ocupada completamente, o que reproduziria a condição de ocupação máxima. A escolha por analisar um modelo em condição máxima, ou seja, maior ocupação da quadra e maior gabarito existente baseiam-se na proposição de que se criariam parâmetros para avaliar qualquer

situação similar ou simplificada. Como estratégia para reduzir o custo computacional do modelo, foram aplicadas simplificações geométricas. Portanto, afastamentos, espécies arbóreas, detalhes arquitetônicos das construções, sacadas, varandas, inclinação de coberturas, jardins etc. foram desconsiderados na construção da geometria.

Definida a quadra-modelo, foram estabelecidos quatro cenários para a simulação, sendo dois cenários isolados e dois cenários agrupados, com propósito de investigar o comportamento do escoamento de vento entre as quadras e nas ruas adjacentes. Ambos foram orientados conforme as direções predominantes de vento para Belém/PA (leste [$\alpha = 0^\circ$] e nordeste/sudeste [$\alpha = 45^\circ$]), como sintetizado no Quadro 3-4.

Quadro 3-4 Descrição dos cenários isolado e agrupado nas direções de vento leste e nordeste/sudeste

Cenários isolados	Cenários agrupados
Cenário isolado leste ($\alpha = 0^\circ$): orientado a leste, possuindo uma quadra nas dimensões da quadra modelo.	Cenário agrupado leste ($\alpha = 0^\circ$): orientado a leste, composto por nove quadras nas dimensões da quadra-modelo. As quadras, afastadas entre si 20m (dimensão de uma via de mão dupla com acostamentos laterais e calçadas em ambos os lados).
Cenário isolado nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$): orientado a nordeste/sudeste, possuindo uma quadra nas dimensões da quadra modelo.	Cenário agrupado nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$): orientado a nordeste/sudeste, composto por nove quadras nas dimensões da quadra-modelo. As quadras, afastadas entre si 20m (dimensão de uma via de mão dupla com acostamentos laterais e calçadas em ambos os lados).

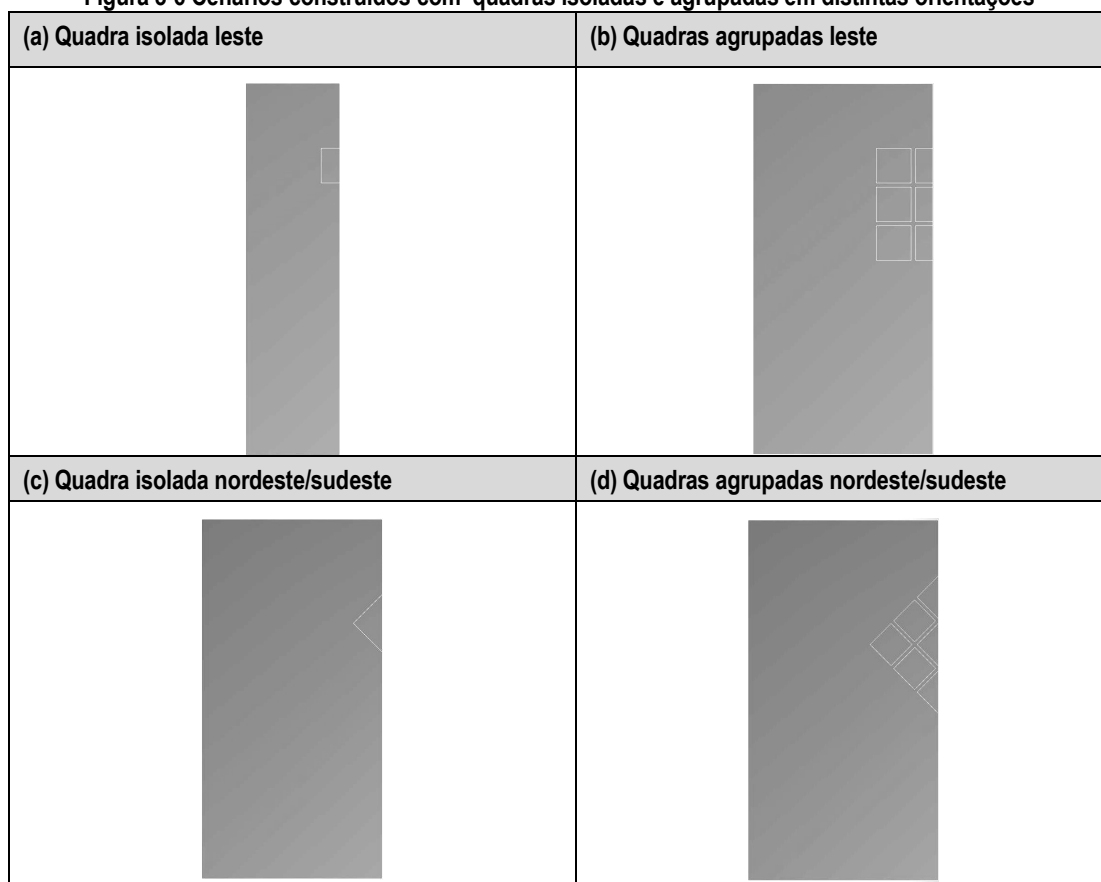
Fonte: Autora, 2015.

Os cenários isolado e agrupado foram confeccionados em condição de simetria, isto é, as suas dimensões foram reduzidas pela metade como se tivessem sido cortadas ao meio. A condição de simetria foi aplicada para reduzir o número de elementos da malha e reduzir o custo computacional.

Considerando-se que o *software Solidworks* 10.0 possui a limitação de não construir comprimentos maiores que 500m, as dimensões das quadras foram convertidas para a escala de redução 1/4. Isto significa que os comprimentos de 160m x 160m passaram a ser 20m x 20m (considerando a simetria), a altura de 60m para 15m e a distância de 20m, que corresponde às vias de fluxo de veículos e calçadas para 5m (Figura 3-6).

Com essa alteração de escala, testaram-se preliminarmente possíveis interferências que estas mudanças poderiam provocar na interpretação do comportamento de escoamento do vento nas simulações. Constatou-se que as pequenas alterações no escoamento do vento derivadas da redução da escala poderiam ser qualitativamente desconsideradas ou de baixo impacto nos resultados globais.

Figura 3-6 Cenários construídos com quadras isoladas e agrupadas em distintas orientações



Fonte: Autora, 2015.

3.4.1.2 Domínios construídos

A partir da investigação de parâmetros adotados na literatura, foram tomadas as seguintes decisões para as construções dos domínios para cenários isolados e agrupados (FRANKE *et al.*, 2004; FRANKE, 2006; FRANKE *et al.*, 2007):

1. aplicação de formato retangular, orientado a leste e nordeste/sudeste;
2. distância de entrada para todos os cenários: foi adotado o comprimento de $5H_{m\acute{a}x}$, ou seja, o afastamento frontal entre o objeto simulado e a entrada do domínio computacional é cinco vezes a altura do edifício mais alto. Esta condição é válida para ambas as orientações;
3. distância lateral e de topo do domínio para os blocos isolados: foi adotado $9,46H_{m\acute{a}x}$ para orientação leste e $6,49H_{m\acute{a}x}$ para orientação nordeste/sudeste. Para os blocos agrupados, os valores foram $5,50H_{m\acute{a}x}$ para orientação leste e $10,95H_{m\acute{a}x}$ para orientação nordeste/sudeste;
4. distância posterior: aplicou-se no fundo o comprimento de $15H_{m\acute{a}x}$. A utilização dessa dimensão deve-se à possibilidade de visualizar a extensão da esteira de vento formada na região a jusante do domínio computacional.

Calculando-se os valores citados acima em função da altura do edifício mais alto, têm-se os comprimentos apresentado na Tabela 3-2. Assim como nas geometrias, as dimensões do domínio foram adaptadas à escala 1/4 e as condições de simetria.

Tabela 3-2 Dimensão dos domínios na escala 1/4 em condições de simetria

Frontal x Lateral x Topo x Posterior	Quadra isolada [m]	Quadras agrupadas [m]	Relação de Bloqueio ² [%]
Vento na orientação leste ($\alpha = 0^\circ$) (F x L x T x P ¹)	75 x 82,53 x 82,53 x 225	75 x 142 x 142 x 225	3.0
Vento na orientação nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$) (F x L x T x P ¹)	75 x 97,45 x 97,45 x 225	75 x 164,34 x 164,34 x 225	3.0

Fonte: Autora, 2015

Nota:(1) Corresponde aos afastamentos da geometria em relação as faces do domínio, sendo F = afastamento frontal; L = afastamento lateral; T = afastamento topo e P = afastamento posterior.

(2) 'Relação de bloqueio ou distância de bloqueio': é a razão entre a área projetada dos edifícios na direção do fluxo pela secção transversal livre do domínio computacional (FRANKE *et al.*, 2007).

3.4.1.3 Condições de contorno aplicadas aos cenários

A condição de contorno de entrada do escoamento foi denominada de *inlet*, e foi inserido o perfil de velocidade do vento constante e parabólico com comprimento de rugosidade de 2m e velocidade de referência de 3m/s (considerada velocidade média do vento nas orientações de vento leste [0°] e nordeste/sudeste [45°] para Belém/PA), conforme as Equações 1 e 2. Ao perfil de vento, foi associado o modelo de turbulência (k- ϵ) com intensidade de turbulência de 5% (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011).

$$U = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad [\text{Eq.1}]$$

A velocidade média do vento na altura z é representada por U, em m/s. O comprimento de rugosidade corresponde ao de centro de cidade (edifícios altos) no valor de 2m. A velocidade de atrito foi calculada pela Equação 2, a partir da velocidade especificada $U_h = 3\text{m/s}$ para a altura de 10m (RICHARDS; ROXEY, 1993).

$$u^* = \frac{k \cdot U_h}{\ln\left(\frac{h + z_0}{z_0}\right)} \quad [\text{Eq.2}]$$

A face de saída foi denominada aberta (*opening*), com pressão relativa nula. A face lateral e no topo foram definidas como parede (*wall*), com superfície *free slip wall*. À face com simetria foi aplicada a condição de simetria (*symmetry*). E na superfície do piso e no bloco (edifício) foram

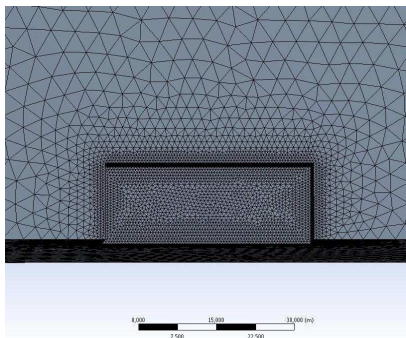
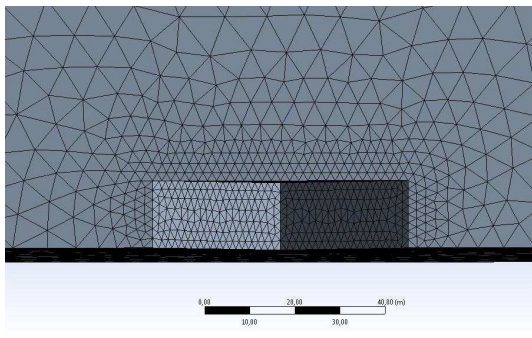
inseridas as condições de parede (*wall*) com superfície de rugosidade *smooth wall*. O escoamento foi considerado incompressível, isotérmico e com pressão de referência de 1atm, com temperatura do fluido de 25°C.

3.4.1.4 Malhas construídas, refino e independência de malha

Na literatura, autores como Franke *et al.* (2004), Franke (2006), Franke *et al.* (2007) e Blocken, Janssen e van Hooff (2012) recomendam a aplicação de malha hexaédrica como forma de melhorar as condições de convergência. Mas, durante a modelagem com aplicação desse tipo de malha, as simulações alcançaram a capacidade máxima do computador, não atingindo a convergência. Desta forma, optou-se por utilizar malha tetraédrica e coeficiente de expansão da célula igual a 1,2.

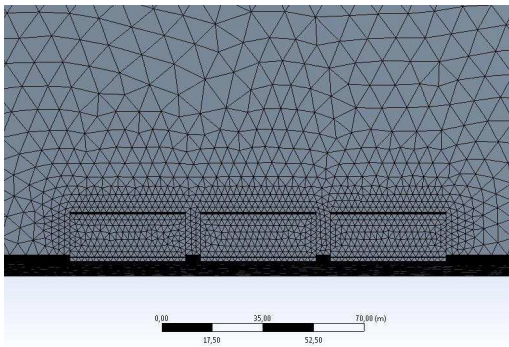
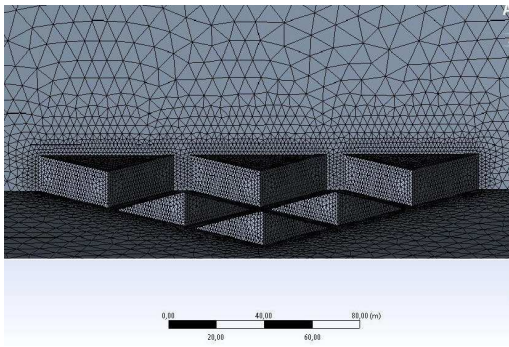
No refinamento, o dimensionamento da malha pode ser global e/ou local. No global, foram inseridas dimensões gerais no modelo simulado, com valores de tamanho mínimo (*proximity min size*), tamanho máximo da face (*max face size*) e tamanho máximo do elemento no volume de malha (*max size*). No refinamento local, o refino foi realizado nas faces (*face sizing*) e/ou bordas das edificações (*edge sizing*). A Tabela 3-3 mostra os tamanhos dos elementos em cada cenário simulado. Para se chegar a estes valores, foram realizados vários testes de malha com o objetivo de obter a menor dimensão ao tamanho do elemento. Entretanto, em alguns testes, as simulações atingiam a capacidade máxima computacional, não alcançando convergência.

Tabela 3-3 Dimensão dos refinos globais e locais aplicados nas malhas para cada cenário simulado

Quadra isolada com incidência de vento a leste ($\alpha = 0^\circ$)				Quadra isolada com incidência de vento a nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$)			
Proximity min size	5,0m	Face sizing	2,5m	Proximity min size	6,0m	Face sizing	3,0m
Max face size	10,0m	Edge sizing	2,0m	Max face size	12,0m	Edge sizing	2,0m
Max size	15,0m			Max size	18,0m		
							

(Continua)

(Continuação)

Quadras agrupadas com incidência de vento a leste ($\alpha = 0^\circ$)				Quadras agrupadas com incidência de vento a nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$)			
Proximity min size	1,0m	Face sizing	0,75m	Proximity min size	5,0m	Face sizing	2,0m
Max face size	5,0m	Edge sizing	0,50m	Max face size	2,0m	Edge sizing	1,5m
Max size	10,0m			Max size	1,5m		
							

Fonte: Autora, 2015.

Quanto à independência da malha, foram realizados testes com pelo menos três refinamentos diferentes para cada cenário simulado. Nesses testes, observou-se até que momento ocorria mudanças nos contornos de velocidade das simulações. A Tabela 3-4 mostra o número de elementos gerados nos refinamentos. É possível notar o aumento da quantidade de elementos conforme um maior refino da malha. Em alguns casos, as simulações foram limitadas pelo custo computacional demandado e não atingiram convergência.

Tabela 3-4 Números de elementos gerados pelo refinamento de malha para cada cenário

Cenário	Refino	Nº de elementos	Cenário	Refino	Nº de elementos
Quadra isolada com incidência de vento leste ($\alpha = 0^\circ$)	1ª refino	220219	Quadras agrupadas com incidência de vento leste ($\alpha = 0^\circ$)	1ª refino	112848
	2ª refino	267826		2ª refino	138257
	3ª refino	305119		3ª refino	163695
Quadra isolada com incidência de vento nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$)	1ª refino	Não convergiu	Quadras agrupadas com incidência de vento nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$)	1ª refino	Não convergiu
	2ª refino	Não convergiu		2ª refino	194407
	3ª refino	43906		3ª refino	257732

Fonte: Autora, 2015.

3.4.1.5 Equações governantes e critério de convergência

As equações governantes aplicadas foram as de conservação de massa (equação da continuidade) e da quantidade de movimento (equações de *Navier-Stokes*) por serem as mais usadas, junto ao modelo de turbulência $k-\varepsilon$. O critério de convergência adotado foi de 10^{-4} , conforme seção 3.3.3.

3.4.2 MÉTODO DE ANÁLISE DE RESULTADOS

3.4.2.1 Planos horizontais para visualização dos contornos de velocidade do vento

Na análise dos contornos de velocidade, que é a representação dos perfis de velocidade de vento em um plano horizontal por gradientes de cores, foram traçados planos horizontais em relação ao solo, conforme altura das quadras simuladas. Assim, traçaram-se planos nas alturas de 1m e 2m (escoamento de ar na altura de um pedestre); a 3m (representação de altura de edificações térreas); a 5m (correspondente às edificações com 2 pavimentos ou passarelas); 10m (altura na estação meteorológica); 30m (altura na metade da quadra) e 60m (altura máxima estabelecida para a quadra). Através dos planos horizontais foi possível analisar qualitativamente, por visualização, o comportamento do vento entre as quadras isoladas e agrupadas.

3.4.2.2 Pontos de obtenção de velocidade de vento no CFD

Foram definidos pontos em posições e alturas diferentes para obtenção dos valores de velocidade de vento nas simulações. Os pontos foram localizados no entorno das quadras, ou entre elas, a uma distância de 2m do limite externo da quadra em todas as suas faces, nas alturas de 2m (altura de pedestre), 10m (altura na estação meteorológica) e 30m (altura na metade da quadra). A obtenção destes dados quantitativos possibilitou comparar as prováveis mudanças no comportamento do vento, devidas ao adensamento urbano e as influências na ventilação de quadras vizinhas e ruas adjacentes.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO VENTO ATRAVÉS PLANOS HORIZONTAIS EM CENÁRIOS ISOLADO E AGRUPADO COM USO DA TÉCNICA CFD

Para análise da influência do efeito do adensamento no escoamento da ventilação natural, foram criados planos horizontais em diferentes alturas nos cenários isolado e agrupado.

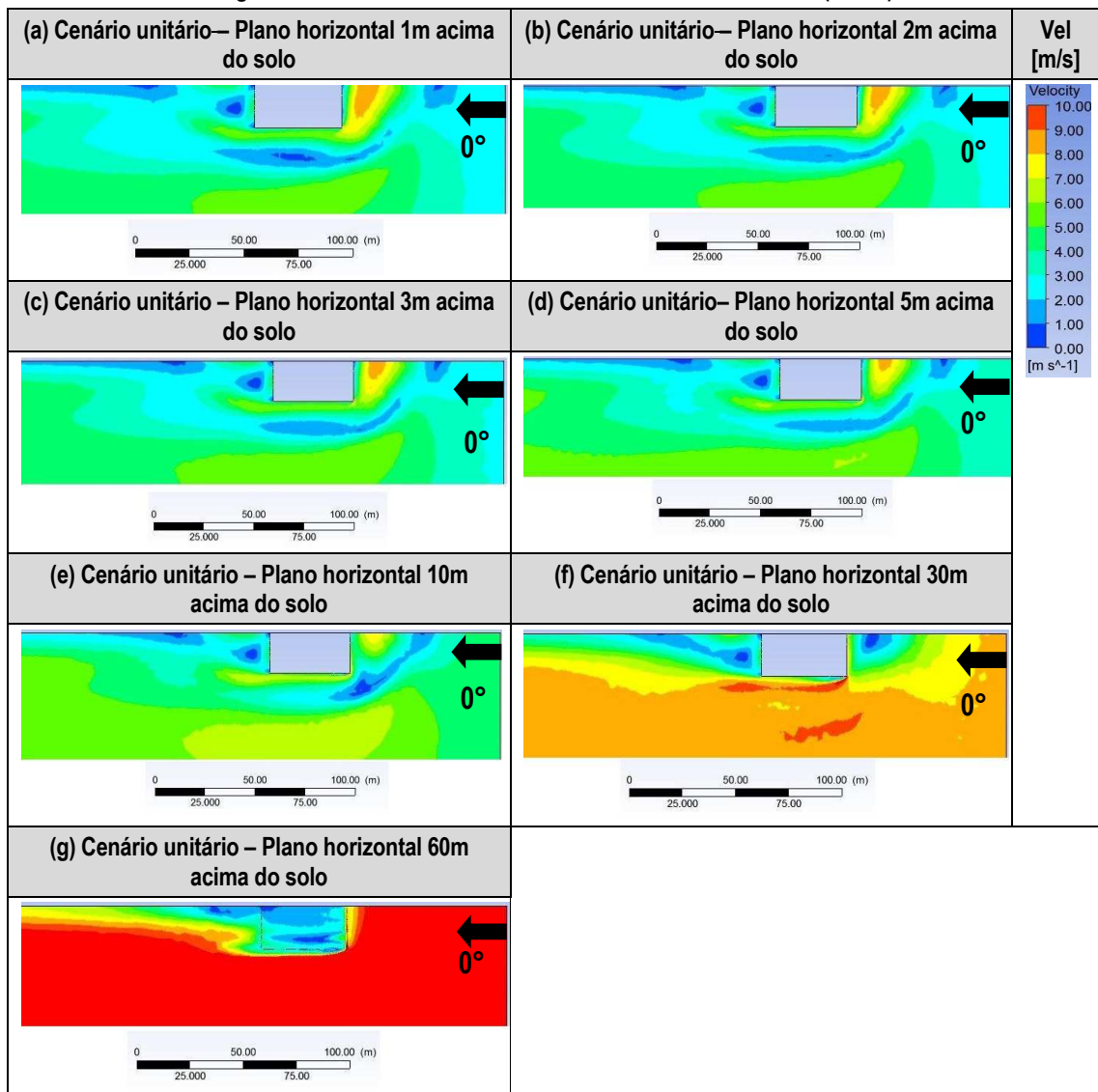
- Cenário isolado com vento orientado a leste ($\alpha = 0^\circ$)

Nos planos entre 1m e 2m (Figura 3-7a, b), visualiza-se uma aceleração da velocidade a barlavento da quadra, devida à proximidade do vento em relação ao solo e que diminui conforme o aumento a altura. Segundo a escala Beaufort (categorização efeitos de vento, Anexo D), a velocidade do ar nestes planos pode ser caracterizada como brisa forte, pois entre 8 a 9m/s o vento pode mover grandes galhos e árvores pequenas. A redução da velocidade a barlavento é

observada a partir do plano horizontal de 10m até chegar a 60m de altura (Figura 3-7e), que corresponde ao topo da quadra.

A sotavento ocorre situação inversa a da barlavento, a velocidade do ar é mais baixa nos planos próximos ao solo (Figura 3-7a, d), gerando regiões de esteira⁶ de vento. Este comportamento se deve a formação de vórtices⁷ gerados nas regiões próximas ao piso. A velocidade do ar tende a ser baixa até o plano de 30m (Figura 3-7f). Acima dessa altura, visualiza-se uma maior aceleração do vento concomitante ao distanciamento do plano em relação ao solo.

Figura 3-7 Cenários unitários com incidência frontal do vento ($\alpha = 0^\circ$)



Fonte: Autora, 2015.

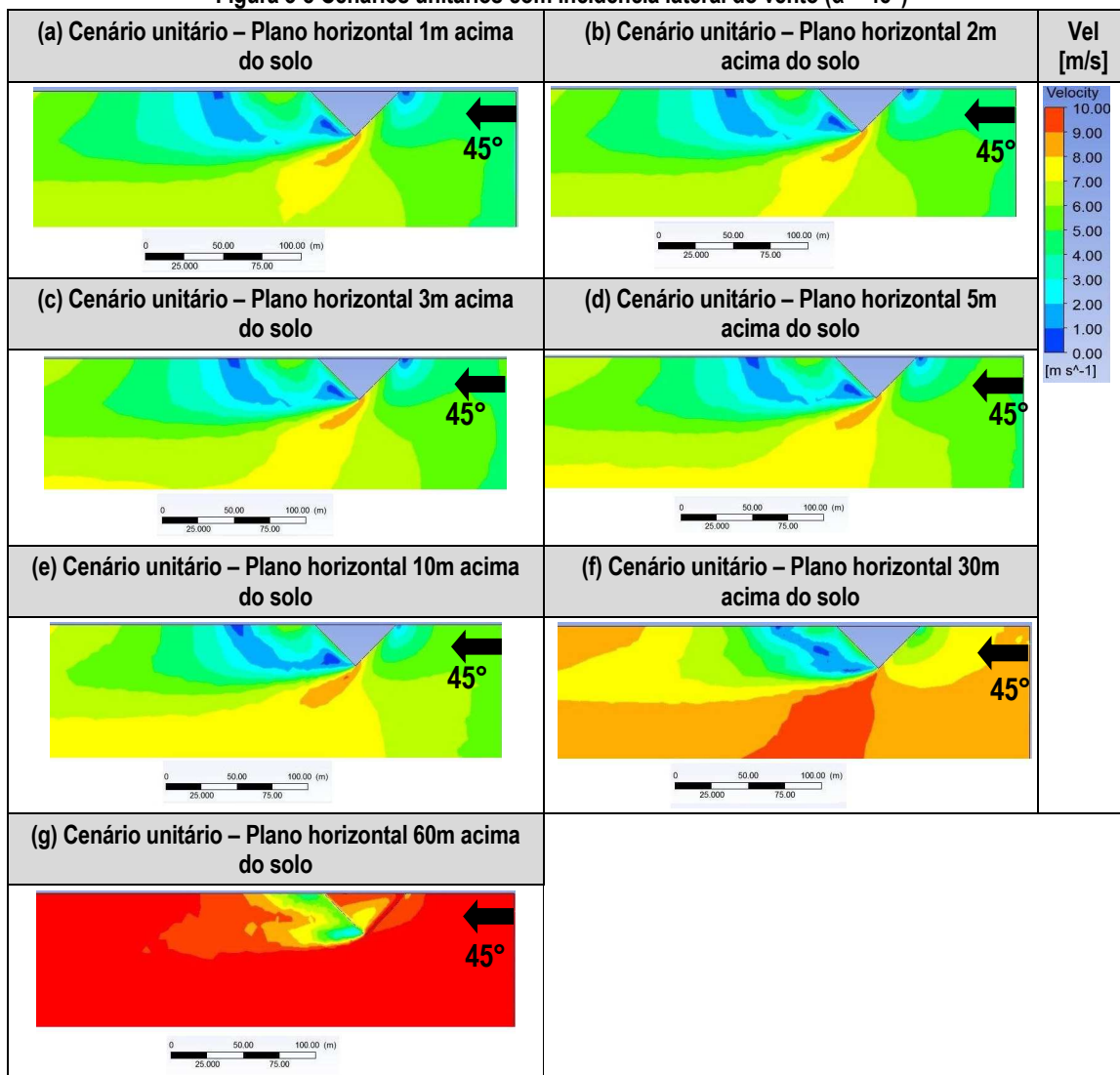
⁶ 'Região de esteira': corresponde à área posterior a incidência de vento e é gerada pela recirculação do fluxo advindo da camada limite. O fluxo é turbulento e apresenta vórtices e refluxos de baixa velocidade (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

⁷ Vórtices: escoamentos com trajetórias circulares e estrutura organizada (redemoinhos) (SILVA, 2013, p. 26).

- Cenário isolado com vento na orientação nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$)

Na região a barlavento, há uma redução de velocidade do vento (de 0 a 4m/s), possivelmente devida à angulação acentuada da quadra. Na face lateral, ocorre a aceleração do vento (entre 2 a 8m/s), pois a angulação da quadra redireciona o fluxo de ar para os lados. No canto lateral da quadra ocorre o efeito de canto, que é o escoamento elevado nas esquinas das edificações. Na área posterior, entre os planos horizontais de 1m até 10m (Figura 3-8a, e), é identificada uma extensa área de baixas velocidades (entre 0 a 6m/s), devido à proximidade com o piso. Nos locais a sotavento, há aceleração de velocidade pela recirculação do ar. A partir dos 30m de altura a sotavento, a velocidade do ar começa a acelerar novamente como consequência do distanciamento do solo.

Figura 3-8 Cenários unitários com incidência lateral do vento ($\alpha = 45^\circ$)

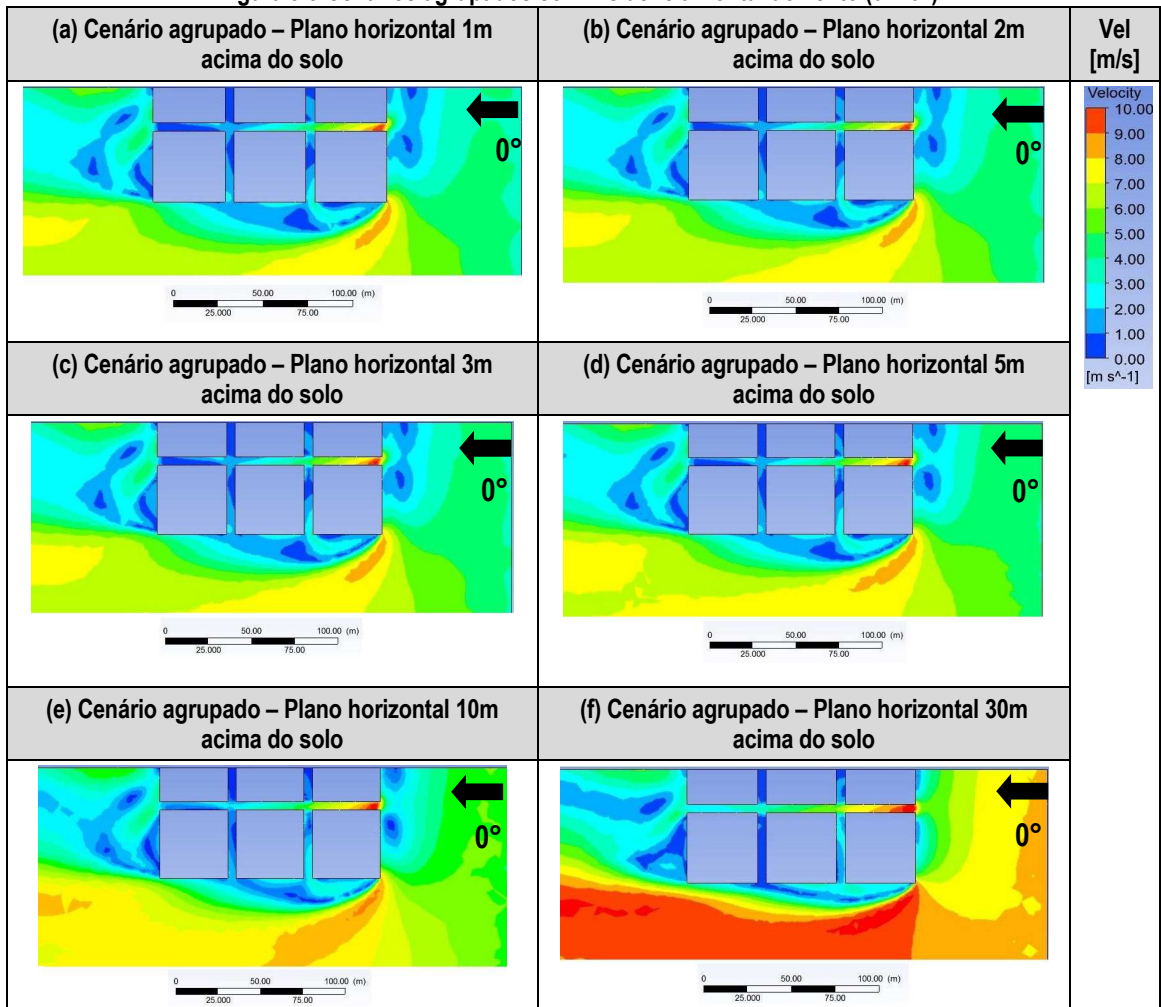


Fonte: Autora, 2015.

- Cenários agrupados com vento na orientação leste ($\alpha = 0^\circ$)

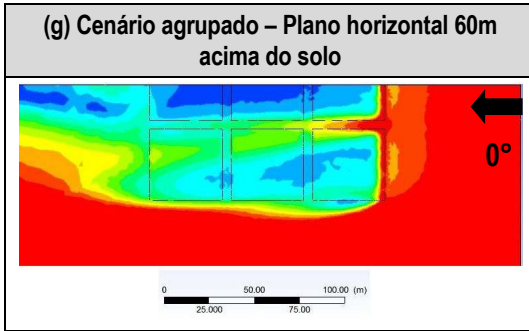
Nos planos de 1m até 10m a sotavento são registradas baixas velocidades de vento com valores de 0m/s a 4m/s (Figura 3-9a, e). Por outro lado, tem-se uma aceleração de fluxo de ar no início das ruas em todos os planos, com velocidade de até 10m/s provocado pelo efeito de canalização do vento. Esse efeito acontece resultante da proximidade das quadras, podendo ou não gerar incômodo. Nas simulações, ocorreu nas primeiras ruas expostas ao vento incidente, com alguma implicação nas quadras posteriores, mas em menor proporção (Figura 3-9a, d). A partir do plano de 10m, a velocidade entre as ruas das quadras posteriores passa a aumentar devido à distância do piso e provoca melhoria na penetração de fluxo de ar nestas quadras. Na região a sotavento, há formação de esteira de vento com largura proporcional as quadras, entretanto essa situação começa a mudar a partir de 60m de altura.

Figura 3-9 Cenários agrupados com incidência frontal do vento ($\alpha = 0^\circ$)



(Continua)

(Continuação)

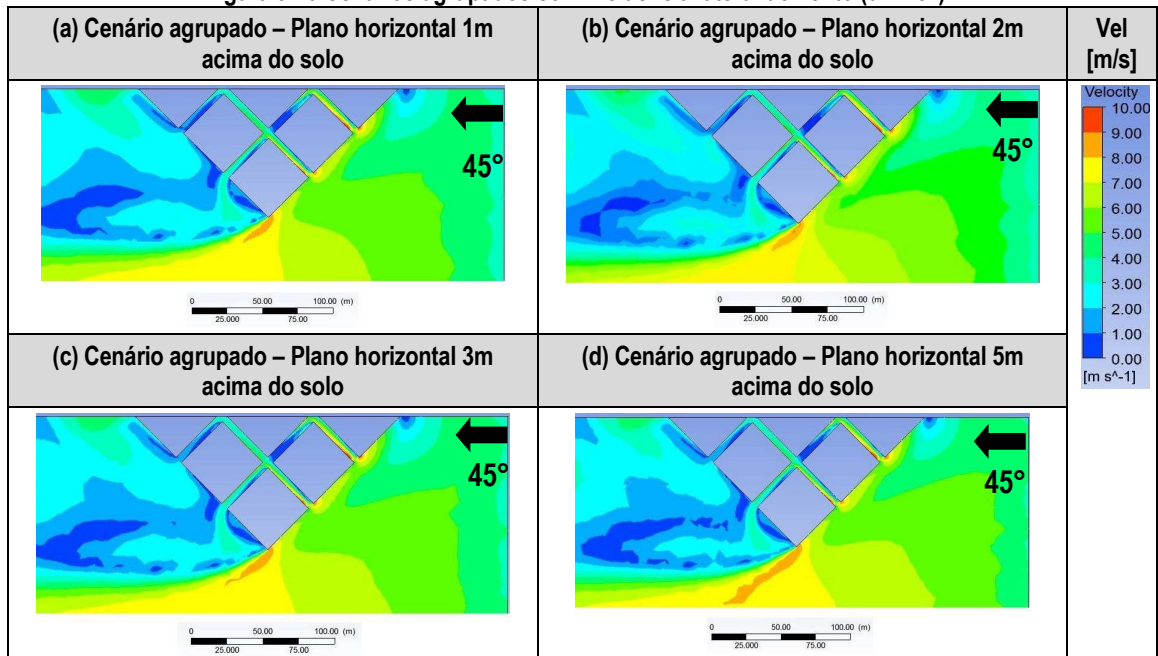


Fonte: Autora, 2015.

- Cenários agrupados com vento na orientação nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$)

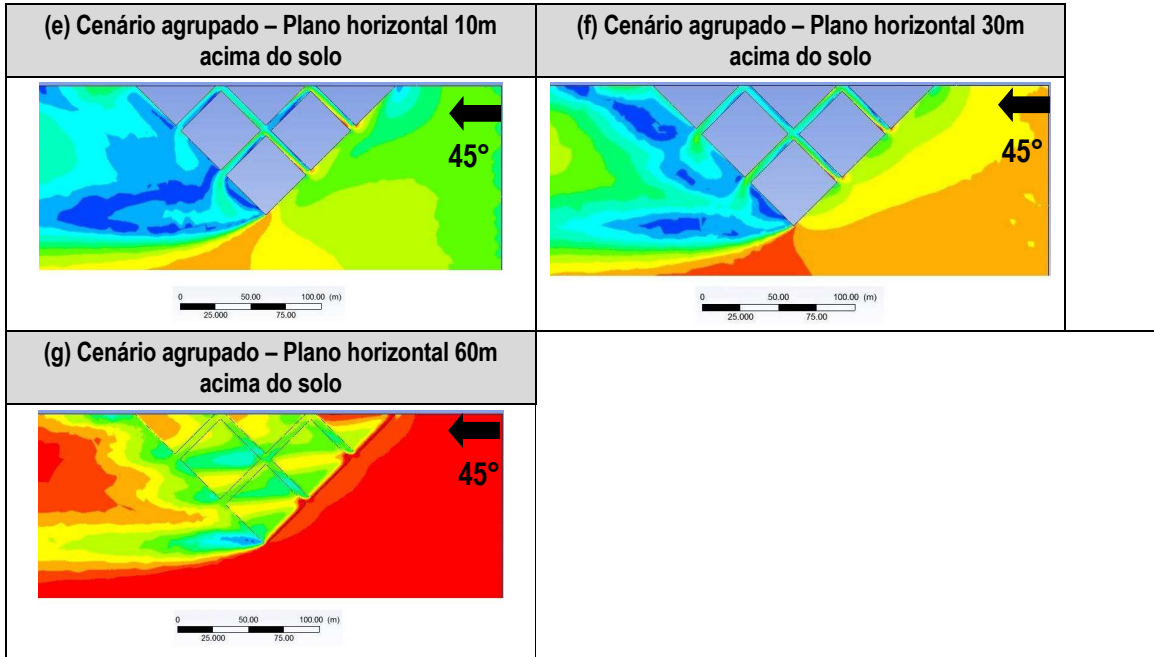
Nesse cenário, as ruas orientadas diretamente ao vento predominantemente exibiram melhores condições de ventilação (Figura 3-10). Na orientação nordeste/sudeste o fluxo de ar adentra de forma melhor distribuída por todas as ruas, contrapondo-se a situação que acontece no cenário agrupado ($\alpha = 0^\circ$). Nos planos de 1m a 10m, observa-se estagnação de ar em algumas áreas, entretanto menos expressivas quando comparadas à do cenário agrupado ($\alpha = 0^\circ$). Na região a sotavento, há formação de extensa esteira de vento que possui largura proporcional a das quadras simuladas e que reduz gradativamente conforme se aumentam as alturas.

Figura 3-10 Cenários agrupados com incidência lateral do vento ($\alpha = 45^\circ$)



(Continua)

(Continuação)

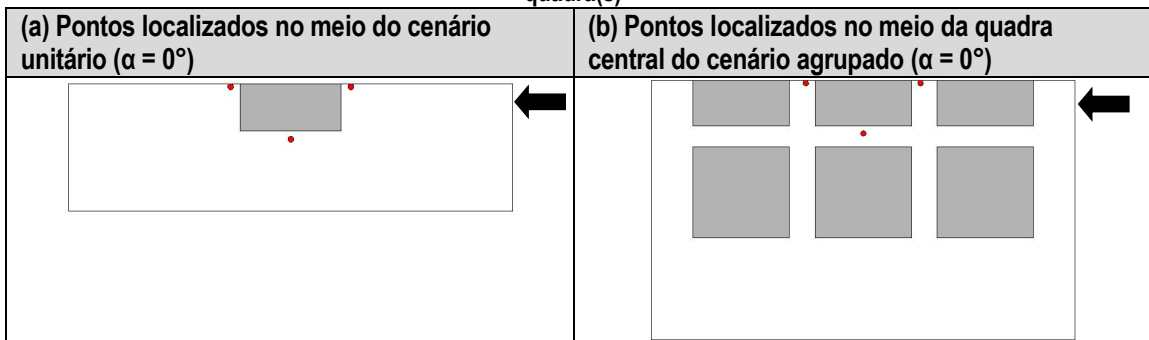


Fonte: Autora, 2015.

3.5.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE VELOCIDADE DE VENTO DIANTE DO EFEITO DE ADENSAMENTO URBANO EM CENÁRIOS ISOLADO E AGRUPADO

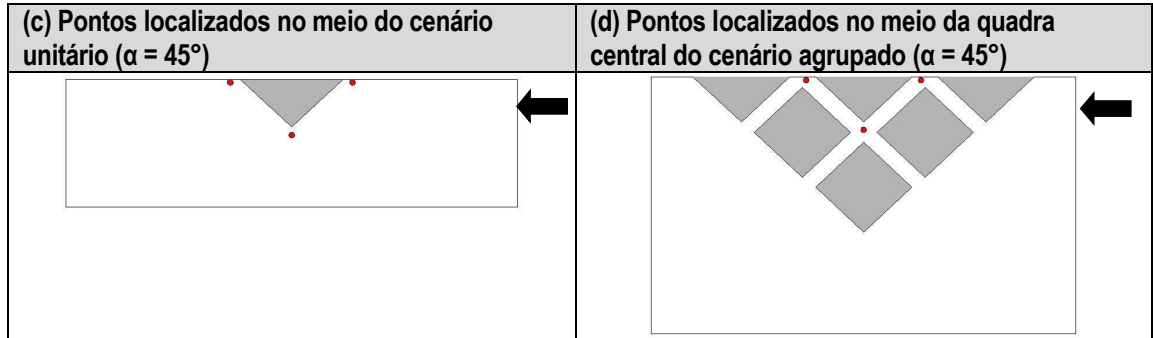
Para realizar a comparação dos resultados de velocidade do vento em cenários de adensamento urbano, foram criados pontos de obtenção de velocidade do vento nos cenários isolado e agrupado. Por isso, foram locados pontos na metade do comprimento da quadra, distando 2m da face externa e as alturas foram estabelecidas a 2m (nível pedestre), 10m (altura de estação meteorológica) e 30m (altura na metade da quadra) (Figura 3-11).

Figura 3-11 Localização dos pontos de obtenção dos valores de velocidade com 2m de distância da(s) quadra(s)



(Continua)

(Continuação)



Fonte: Autora, 2015.

A inserção dos pontos para aquisição dos valores de velocidade permitiu a realização de inferências sobre o comportamento do vento nas quadras isoladas e nas circundadas por outras quadras (quadras agrupadas). Além disso, possibilitou visualizar a influência destas configurações no escoamento de vento entre as quadras vizinhas e ruas adjacentes em distintas orientações de vento.

- Comparação de velocidade de vento entre os cenários isolado e agrupado, ambos com vento orientado a leste ($\alpha = 0^\circ$)

Para o cenário isolado a barlavento, o plano a 2m de altura apresenta valor um pouco maior de velocidade de vento (0,53m/s) quando comparado ao mesmo plano no cenário agrupado (0,18m/s) (Tabela 3-5). Isto se deve à presença de quadras adjacentes que formam barreiras à fluidez do ar. Em sotavento no plano de 2m, situação semelhante se repete, com a velocidade de 1,04m/s no cenário isolado contrapondo-se com 0,10m/s do cenário agrupado. Entretanto, estes valores não são suficientes para promover trocas de calor significativas em nível de pedestre. Conclui que em condição de adensamento, como os cenários agrupados, os valores de velocidade do ar são menores do que nas quadras isoladas.

À medida que se aumenta a altura, tanto em sotavento quanto a barlavento, tem-se uma condição de melhor infiltração de vento, observada principalmente a partir do plano de 30m. Isto acontece devido ao afastamento do plano horizontal do solo, que promove maior penetração de vento. Portanto, se existissem apartamentos a partir da altura de 30m, esses seriam privilegiados por melhores condições de infiltração de ar em seus espaços internos.

- Comparação de velocidade de vento entre os cenários isolado e agrupado, ambos com vento orientado a nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$)

No cenário isolado a barlavento, todos os planos apresentam valores menores que os do cenário agrupado (Tabela 3-5). Isso denota o efeito de canto na quadra, cuja exposição à ventilação predominante gera um direcionamento do vento para as faces laterais da quadra. Quanto aos pontos a sotavento, esses registram valores mais acentuados no cenário isolado (por exemplo, 2,59m/s no plano de 2m) do que no cenário agrupado (1,59m/s no plano de 2m), pois a presença de quadras vizinhas representa bloqueio à permeabilidade dos ventos.

- Comparação de velocidade de vento entre os cenários agrupados, com vento orientado a leste ($\alpha = 0^\circ$) e o outro a nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$)

Quando comparados os cenários com vento orientado a ($\alpha = 0^\circ$) com o ($\alpha = 45^\circ$), evidencia-se que os primeiros apresentam velocidades muito mais baixas do que o último. Desta forma, pode-se concluir que a disposição a 45° (nordeste/sudeste) facilita a circulação do vento, tanto entre quadras vizinhas quanto em nível de pedestre, e promove melhores condições de qualidade do ar e trocas de calor em espaços urbanos.

Tabela 3-5 Valores de velocidade de vento coletados em pontos a barlavento e sotavento, afastados 2m das faces externas das quadras

Planos horizontais	Pontos [Pt.]	Cenário isolado com vento incidindo frontalmente ($\alpha = 0^\circ$) [m/s]	Cenário agrupado com vento incidindo frontalmente ($\alpha = 0^\circ$) [m/s]	Cenário isolado com vento incidindo lateralmente ($\alpha = 45^\circ$) [m/s]	Cenário agrupado com vento incidindo lateralmente ($\alpha = 45^\circ$) [m/s]
Plano horizontal 2m	Pt. Barlavento	0,53	0,18	1,17	3,59
	Pt. Sotavento	1,04	0,10	2,59	1,59
Plano horizontal 10m	Pt. Barlavento	0,58	0,07	2,14	3,43
	Pt. Sotavento	2,82	0,34	2,56	1,59
Plano horizontal 30m	Pt. Barlavento	0,51	0,33	2,82	3,19
	Pt. Sotavento	6,54	0,44	3,01	1,67

3.6 CONCLUSÃO

Neste estudo, a potencialidade da modelagem e simulação CFD foi investigada e empregada como ferramenta para a análise dos efeitos do adensamento urbano no escoamento de ar entre ruas adjacentes e quadras vizinhas em diferentes configurações urbanas. Para isso, foi realizada a investigação dos conceitos e parâmetros de configuração das técnicas CFD e a aplicação das

diretrizes investigadas em quadras urbanas. Pode-se concluir que a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é uma ferramenta muito útil, devido ao seu potencial de fornecer informações quantitativas e qualitativas para a análise de potencial dos fluxos de vento e comportamento da ventilação urbana. Entretanto, é necessária a criteriosa aplicação dos parâmetros de simulação voltados à escala urbana para resultados confiáveis, como a adequada dimensão dos domínios computacionais, refinamento criterioso da malha, condições de contorno apropriadas, inserção do perfil de velocidade e rugosidade.

A partir da comparação dos cenários isolado e agrupado, afirma-se que o primeiro possui melhores condições de fluxo de vento que o outro, visto que o agrupamento de quadras representa um obstáculo à movimentação do ar, principalmente em nível de pedestre. As quadras orientadas a 45° em relação aos ventos dominantes apresentam melhores condições de distribuição de ar, sendo recomendadas em nível de pedestre entre quadras e ruas.

Dos resultados apresentados, salienta-se a necessidade de se dar maior e a devida importância nas legislações, através de diretrizes básicas urbanísticas, da valorização dos elementos climáticos específicos da realidade local nas políticas de planejamento urbano como forma de minorar o desconforto térmico e promover qualidade de vida da população. E aos urbanistas, na configuração do tecido urbano, implementar estratégias eficientes na melhoria das condições de escoamento do vento em espaços urbanos, visando as trocas de calor e qualidade do ar. Além de reforçar-se a potencialidade de uso das técnicas CFD para estudos de ventilação urbana apoiado em uma aplicação cuidadosa dos parâmetros de configuração.

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AN, K.; FUNG, J. C. H.; YIM, S. H. L. Sensitivity of inflow boundary conditions on downstream wind and turbulence profiles through buildings obstacles using a CFD approach. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 115, 137-149, 2013.

ASFOUR, O. S. Prediction of wind environment in different grouping patterns of housing blocks. **Energy and Building**, v. 42, p. 2061-2069, 2010.

BLOCKEN, B.; CARMELIET, J.; STATHOPOULOS, T. CFD evaluation of the wind speed conditions in passages between buildings-effect of wall-function roughness modifications on the atmospheric boundary layer flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2007.

BLOCKEN, B.; GUALTIERI, C. Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for environment fluid mechanics. **Environment Modelling and Software**, v. 33, p. 1-22, 2012.

BLOCKEN, B.; JANSSEN, W. D.; VAN HOOFF, T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: general decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environment Modelling and Software**, 2012.

BLOCKEN, B; PERSON, J. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 97, 255-270, 2009.

BROWN, G. Z.; DEKAY, M. **Sol, vento e luz: estratégias para o projeto de arquitetura**. 2. Ed., Porto Alegre: Bookman, 2004.

BOTTEMA, M. Towards rules of thumb for wind comfort and air quality. **Atmospheric Environment** **33**, 4009- 4017, 1999.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. Ed. Bookman, 2007.

CHAO, Y.; NG, E. Building porosity for better urban ventilation in high-density cities – a computational parametric study. **Building and Environment**, 2012.

CHEUNG, J. O. P.; LIU, C. CFD simulations of natural ventilation behavior in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings. **Energy and Buildings**, 2011.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação**. São Paulo, FAUUSP, 2006. Dissertação de mestrado.

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

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

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLÜNZEN, H.; CARISSIMO, B. **Best Practice Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment**. COST 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models. COST Office Brussels, ISBN 3-00-018312-4, 2007.

FRANKE, J.; HIRSCH, C.; JENSEN, A. G.; KRÜS, H. W.; SCHATZMANN, M.; WESTBURY, P. S.; MILES, S. D.; WISSE, J. A.; WRIGHT, N.G. **Recommendations on the use of CFD in wind engineering**. In: J.P.A.J. van Beek (Ed.), Proceedings of the International Conference on urban Wind Engineering and Building Aerodynamics: COST C14 – Impact of Wind and Storm on City life and Built Environment, Rhode, Saint-Genève, 2004.

HENSEN, L. M., LAMBERTS, R. **Building performance simulation for design and operation**. Editora: Taylor & Francis, 2011.

LEITE, R. C. V. **A influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido**. São Paulo: FAUUSP, Tecnologia da Arquitetura. 2010. Dissertação de mestrado.

PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. São Paulo: FAUUSP, 2005. Tese de doutorado.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: Validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 408–18, 2012.

REITER, S. Assessing wind comfort in urban planning. **Environment and Planning: Planning and Design** 37, 857-873, 2010.

RICHARDS, P. J.; ROXEY, R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering model using the $k-\varepsilon$ turbulence model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 145-153, 1993.

SILVA, J. M. H. **Avaliação do efeito de interferência de obstáculos no escoamento atmosférico sobre o mar: caso de estudo da ilha Berlenga**. Universidade de Lisboa, 2013. Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente. Dissertação de mestrado.

SIMÕES, M. R. **Simulação computacional de escoamento turbulento em compressor axial utilizando ferramenta de CFD**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009, p. 51. Dissertação de mestrado.

WIERINGA, J. Updating the Davenport roughness classification. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. v. 61, p. 357-368, 1992.

ZHANG, X. **CFD simulation of neutral ABL flows**. Risø National Laboratory for Sustainable Energy. Technical University of Denmark. Roskilde, Denmark. April 2009.

4. ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL POR AÇÃO DOS VENTOS DE QUADRAS LOCALIZADAS EM UM SETOR DA REGIÃO CENTRAL DE BELÉM/PA, UTILIZANDO TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO CFD

Resumo

O desenho urbano e o planejamento físico das cidades, aplicados sob uma perspectiva bioclimática, que é a adequação da forma urbana com o clima local, podem ser elementos determinantes no comportamento ambiental dos espaços construídos. Dentre as variáveis climáticas afetadas pelas normas urbanísticas, merece destaque o vento. Este tem a sua velocidade de escoamento alterada pelas formas de ocupação e adensamento urbano. Dentre as ferramentas disponíveis para estudo e predição desse fenômeno, destacam-se *software* de modelagem do espaço físico e de análises computacional da dinâmica dos fluidos, também conhecida como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Neste artigo, tem-se por objetivo analisar os efeitos das prescrições urbanísticas referentes à vigência dos Planos Diretores Urbanos de 1993 e 2008, a respeito do escoamento do vento em cenários de quadras localizadas no setor central de Belém/PA, recorrendo-se ao uso de técnicas de modelagem computacional CFD. Através da análise dos cenários urbanos simulados para Belém/PA, conclui-se que o adensamento urbano e a redução dos recuos entre as edificações representam as maiores preocupações ao impedimento do escoamento do vento nos cenários simulados, visto que impõem a redução da velocidade do vento e do seu potencial de ventilação. Mesmo que estas novas construções apresentassem maiores gabaritos, as suas interferências seriam minimizadas pelos afastamentos entre as edificações. Outro aspecto importante é a influência que a forma e a orientação dos edifícios têm relação à direção do vento, pois podem potencializar ou minimizar as condições de circulação de ar entre as construções e nas ruas.

Palavras-chave: Ventilação natural urbana, Belém/PA, Modelagem CFD.

4.1 INTRODUÇÃO

O desenho e o planejamento físico possuem um aspecto mais amplo que simplesmente estabelecer diretrizes construtivas às edificações, pois fornecem também regulamentações urbanísticas e definem aspectos físicos, legais e jurídicos, além de condições ambientais como conforto térmico e, portanto, a qualidade de vida no ambiente citadino. Sendo determinantes no comportamento dos espaços construídos.

Dentre as variáveis climáticas afetadas pelas normas urbanísticas, merece destaque o vento. Este, através do fenômeno da ventilação natural, sofre grande influência do processo de verticalização, uso e ocupação do solo nos centros urbanos, à medida que é influenciada pela porosidade, rugosidade e distribuição das volumetrias inerentes ao desenho urbano (ROMERO, 2001). Para Bittencourt e Cândido (2006), Trindade, Pedrini e Duarte (2010), Asfour (2010) e Al-Sallal e Al-Rais (2012), a ventilação natural é considerada a principal estratégia bioclimática passiva para se alcançar o conforto térmico em meio arquitetônico, em clima quente e úmido,

através do aumento do movimento do ar e na transferência de calor entre e nas edificações, além da diminuição do consumo energético. A ventilação natural para este tipo de clima pode ser aproveitada para promover o resfriamento fisiológico dos usuários durante os períodos quentes e fornecer alívio para as épocas de elevada umidade, através dos movimentos do ar (OLGYAY, 2010). Lima *et al.* (2005) e Corbella e Yannas (2009) afirmam que a ventilação é importante, principalmente, para climas quentes úmidos, por gerar a termorregulação pelas trocas convectivas, através do movimento do ar, originando a sensação de frescor, evaporação do suor e remoção do excesso de umidade.

Para Corbella e Yannas (2009), o adensamento das áreas urbanas são algumas das alterações que podem interferir significativamente na velocidade, intensidade e sentido do vento em meio urbano, e alterar o microclima local. Neste caso, a velocidade de escoamento do ar e os efeitos do vento no entorno das edificações são alterados pelas formas de ocupação e adensamento urbano (Anexo C). Em função da velocidade do vento, é possível obter renovação de ar, alterar cargas térmicas e promover ventilação cruzada nas edificações e entre elas. Pelos coeficientes de pressão, é possível estimar o potencial de vazões internas entre fachadas de edificações.

Segundo Mascaró (1978), é indispensável o movimento de ar durante todo o ano para amenizar as condições de desconforto sentidas durante o dia e em grande parte das noites. Nesse campo em particular, o interesse neste artigo se volta para o município de Belém/PA, por ser uma cidade de grande porte e com legislação urbana consolidada, na qual se entende que há oportunidade para desenvolver estudos da evolução e prospecção desse fenômeno urbano (Figura 4-1).

Figura 4-1 Localização de Belém/PA



Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Microrregi%C3%A3o_de_Bel%C3%A9m#mediaviewer/File:Para_Micro_Belem.svg. Acesso em: 11/11/14.

Tal interesse se ressalta no sentido de melhor compreender repercussões das intervenções humanas no meio natural, provocando modificações que implicam na troca da composição

superficial de massa vegetada por massa edificada, impondo alterações nas propriedades superficiais e na dinâmica do escoamento das massas de ar, fato que é mais característico quando os processos de urbanização passam a admitir maiores densidades de ocupação.

Ainda que o Estatuto da Cidade (Lei nº 10.257/2001) preveja a necessidade de legislação urbanística balizada por meio da elaboração de um Plano Diretor, as atenções quanto à ocupação das cidades com edificações de maior porte passam a se fazer mais presentes quando o adensamento urbano tende a produzir a sensação de perda de privacidade, inclusive da visão do céu e do sol e da ventilação e luz naturais.

Tendo isso em mente, um dos aspectos objeto de manifestação das pessoas é quanto às alterações relacionadas com a circulação de ar no meio urbano. Nesse sentido e como campo de interesse neste artigo, um questionamento é: como as mudanças urbanas devidas ao uso e ocupação do solo urbano e de verticalização podem estar afetando o comportamento dos ventos no meio urbano num setor da região central de Belém/PA?

Na busca de respostas para esse caso, fenômenos relacionados ao escoamento do ar em meio urbano tornaram-se objeto de investigação de diversas pesquisas. Como ferramentas disponíveis para estudo e predição desse fenômeno, destacam-se *software* de modelagem do espaço físico e de análises computacional da dinâmica dos fluidos, conhecido como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) (CÓSTOLA; ALLUCI, 2011). Importantes pesquisas sobre o escoamento do vento em ambientes urbanos com auxílio das técnicas CFD podem ser citadas, como os trabalhos de Prata (2005), Leite (2010), Asfour (2010), Reiter (2010), Al-Sallal e Al-Rais (2012). Entre os assuntos levantados nestas pesquisas, destacam-se questões voltadas às alterações provocadas no escoamento do vento em nível de pedestre pela verticalização urbana, à influência dos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural, o efeito da disposição de edifícios no potencial de ventilação urbana e o arrefecimento passivo para clima quente úmido através do vento.

Como um valioso e ágil recurso para análise de projetos, a ferramenta CFD auxilia na investigação de problemas fluidodinâmicos através de algoritmos numéricos (SIMÕES, 2009). Pode ser usada desde a fase inicial até a fase final de um projeto para análises de desempenho num curto espaço de tempo, quando em comparação com outras técnicas (PRATA, 2005). O que inclui a realização de análises quantitativas e qualitativas do fluxo de vento simulado (REITER, 2010). Quanto à exigência para o seu uso, salienta-se a alta necessidade de capacidade computacional e o cuidado na inserção dos parâmetros computacionais pelo usuário, visto que esses podem levar a resultados equivocados (CÓSTOLA; ALLUCI, 2011). Também é necessário

que o usuário tenha conhecimentos de dinâmica dos fluidos e de domínio, malha computacional, condições de contorno e modelo de turbulência (BOTTEMA, 1999 *apud* REITER, 2010).

Para se fazer simulações que envolvem ventilação urbana, é necessário destacar alguns parâmetros que precisam ser configurados, entre eles as geometrias e suas simplificações, as dimensões de domínio, a criação e o refino de malha, os perfis de vento, as condições de contorno das fronteiras do domínio, a rugosidade, além do modelo de turbulência e do critério de convergência aplicado.

4.2 OBJETIVO

Este artigo tem por objetivo analisar os efeitos das prescrições urbanísticas referentes à vigência dos Planos Diretores Urbanos de 1993 e 2008, a respeito do escoamento do vento em cenários de quadras localizadas no setor central de Belém/PA, recorrendo-se ao uso de técnicas de modelagem computacional CFD.

4.3 METODOLOGIA

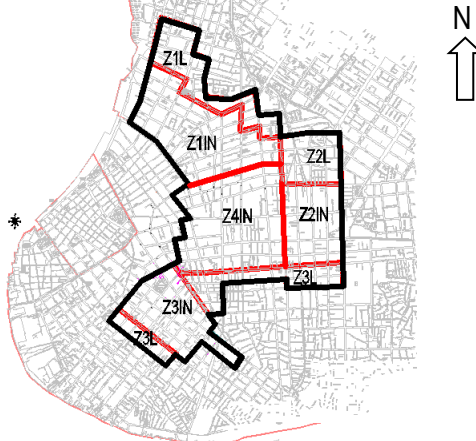
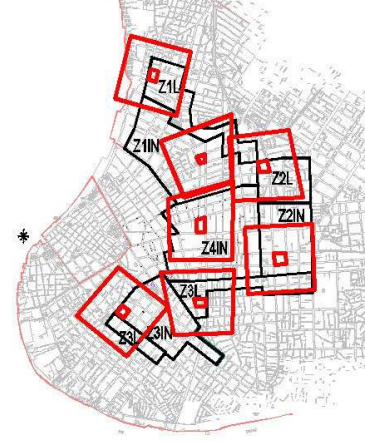
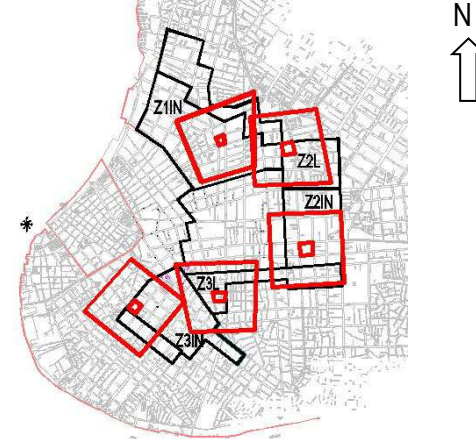
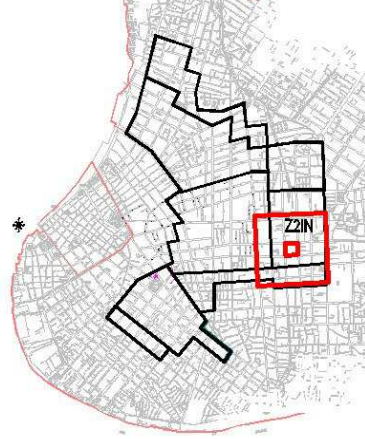
Os procedimentos utilizados foram divididos em quatro etapas: 1. Método de seleção da quadra e cenários simulados; 2. Método de caracterização do vento em Belém; 3. Método para simulação computacional com CFD; 4. Método para a análise dos resultados.

4.3.1 MÉTODO DE SELEÇÃO DA QUADRA E CENÁRIOS SIMULADOS

A escolha da área de estudo foi a Zona Ambiental Urbana 6 (ZAU) Setor 1 localizada na região central de Belém (Quadro 4-1, etapa 2). Esta escolha foi definida mediante análise do Plano Diretor de Belém (2008), no qual se afirma que a Zona Ambiental Urbana 6 (ZAU) Setor I possui “[...] infraestrutura urbana consolidada [...] grande número de terrenos ocupados com verticalização, remembramento de lotes [...]” e está “em processo de renovação urbana” (BELÉM, 2013).

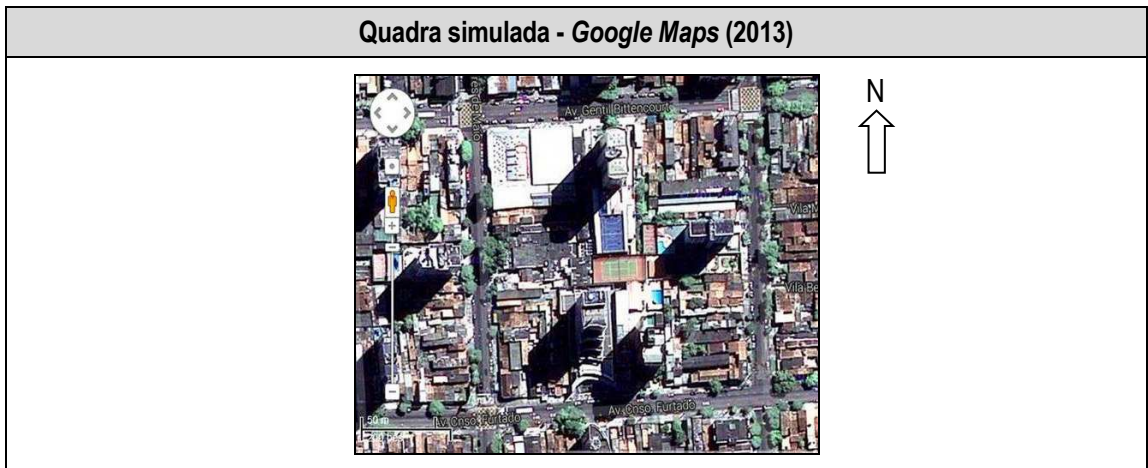
Assim, a escolha da zona se justifica por esta apresentar incentivo a remembramento e possibilitar a criação de novos arranjos de edificações, permitindo-se a geração de cenários por meio dos quais explora a possibilidade de remembramento de lotes na mesma quadra e a verticalização. Após a eleição da zona e do setor que seriam investigados, partiu-se para a definição de quais quadras seriam objeto de estudo. A seleção foi feita em função de um plano de amostragem por conglomerado, realizado em cinco etapas (Quadro 4-1).

Quadro 4-1 Etapas para seleção da quadra simulada

Etapa 1 (Zonas)	
<p>1. Separou-se a ZAU 6 – Setor 1 em duas categorias, aqui determinadas de zona limítrofe (ZL) e zona interna (ZI), por considerar-se que as zonas do entorno poderiam causar interferência nas fronteiras da zona escolhida, e também analisou-se imagens disponíveis no <i>Google Maps</i> (2013);</p> <p>2. Observaram-se quais eram as condições de incentivo a adensamento e infraestrutura das ZL da ZAU 6 – Setor 1;</p> <p>3. Chamou-se de ZL as quadras que fariam fronteira com outras zonas e de ZI as quadras no miolo da zona.</p>	
Etapa 2 (Subzonas)	Etapa 3 (Quadras)
<p>1. Dividiu-se a ZL e a ZI em subzonas, sendo três ZLs (Z1L, Z2L e Z3L) que corresponde a aproximadamente 30% da ZAU 6, e quatro ZIs (Z1IN, Z2IN, Z3IN e Z4IN), que correspondem aos outros 70%.</p>	<p>1. Realizou-se o sorteio da primeira subzona;</p> <p>2. Sorteou-se uma quadra dentro da primeira subzona; 3. Aplicou-se um <i>buffer</i> de 400m em relação ao perímetro desta quadra sorteada, atentando-se para que um <i>buffer</i> não se sobrepusesse ao outro. Esse procedimento foi feito com todas as quadras. Se ocorresse superposição, o processo deveria ser refeito.</p>
	
Etapa 4 (Quadras)	Etapa 5 (Quadra simulada)
<p>1. Sortearam-se duas ZLs e três ZIs, definindo-se assim cinco quadras.</p>	<p>1. A quadra definida por sorteio foi a Z2IN, localizada no bairro São Braz.</p>
	

(Continua)

(Continuação)



Fonte: Autora, 2015.

Nota: A definição do período de abrangência do estudo se deve à sanção das Leis dos Planos Diretores do município que entraram em vigor nos anos de 1993 e 2008. Considerou-se, ainda, um período de até cinco anos para mais da entrada em vigor dessas Leis, tempo normalmente necessário para as adaptações do mercado às legislações urbanísticas.

4.3.1.1 Criação dos cenários de verticalização: retrospectivo, atual e prospectivo

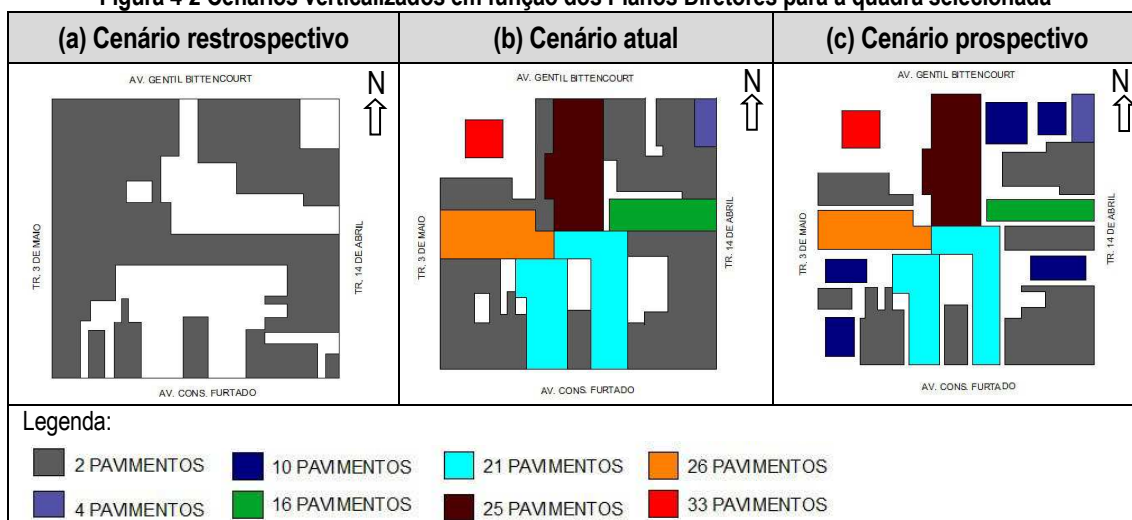
Selecionada a quadra, a próxima etapa foi a construção dos cenários de verticalização. Foram elaborados três cenários para a quadra selecionada, cada um correspondente a um período de tempo em função dos Planos Diretores Urbanos de 1993 e 2008.

- a) **Cenário retrospectivo**, relacionado com a vigência do Plano Diretor Urbano de 1993: recorreu-se ao levantamento de informações dos lotes, disponibilizado pela Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (CODEM). Os dados levantados corresponderam às informações descritivas de cada imóvel (tipo de uso do imóvel, área do terreno, profundidade, testada do lote, número de pavimentos e croqui com medidas das edificações), disponíveis no Cadastro Técnico Multifinalitário de Belém (CTMBelém). Por meio deste cadastro, acessaram-se os dados levantados pelo órgão no ano de 2000. Essas informações foram transcritas para um arquivo digital, sendo possível visualizar informações como metragem quadrada e contornos das edificações (Figura 4-2, a);
- b) **Cenário atual**, referente ao Plano Diretor Urbano de 2008: desenvolvido a partir do levantamento da quadra retrospectiva, foi atualizado conforme levantamento fotográfico da fachada de cada lote da quadra realizado em 2012, e imagens do *Google Maps* (2013). Essas informações foram cruzadas com os arquivos digitais gerados no cenário retrospectivo e atualizadas com as informações atuais de cada lote, adquiridas pelo levantamento fotográfico (Figura 4-2, b);
- c) **Cenário prospectivo**, correspondendo a um cenário possível em 2023, caso o Plano Diretor (2008) continue em vigor. Para sua elaboração, foram observados quais lotes estavam

inutilizados até o ano do levantamento *in loco* (2013). Por meio de visualização em imagens de satélite foram identificados os lotes passíveis de remembramento, como edificações de uso habitacional com até dois pavimentos. Após essas identificações, esses lotes foram lembrados. Para realizar o remembramento, estabeleceu-se um modelo padrão de edifícios residenciais encontrados na região central de Belém com as seguintes características: unidades autônomas de 72m², com sala, dois dormitórios, área de serviço, banheiro e cozinha. Tendo-se definido o edifício-padrão, simulou-se a aplicação deste nos lotes lembrados. Foram aplicados, conforme cada caso, o coeficiente máximo permitido pela legislação de 2008, desconsiderando instrumentos urbanísticos como outorga onerosa.

Dessa forma, criou-se um cenário com a ocupação máxima permitida pela lei e as possíveis edificações que surgirão num prazo de até 15 anos (Figura 4-2, c).

Figura 4-2 Cenários verticalizados em função dos Planos Diretores para a quadra selecionada



Fonte: Autora, 2015.

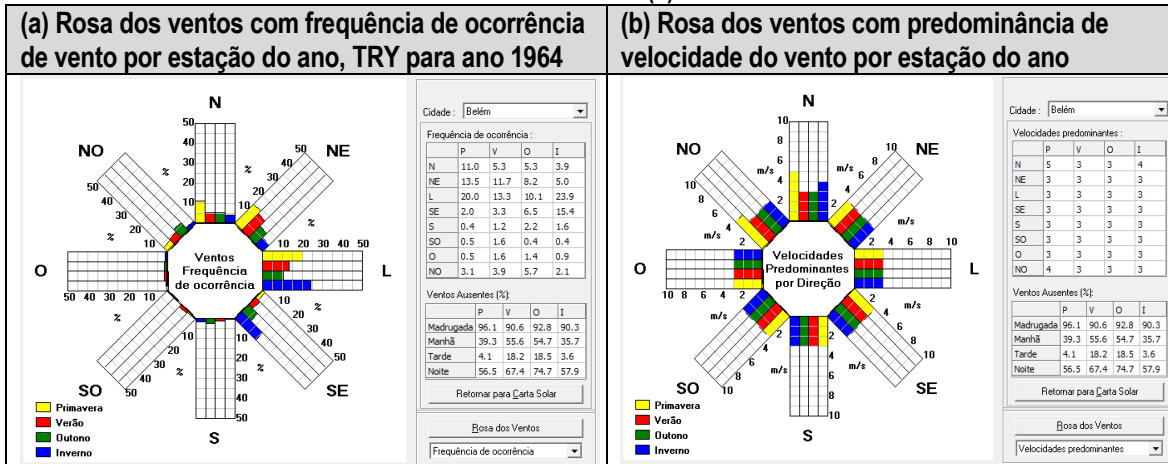
4.3.2 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DO VENTO EM BELÉM

Belém situa-se na parte setentrional da Amazônia e está localizada às margens da Baía do Guajará, na confluência com o Rio Guamá, e a 120km do Oceano Atlântico pela Baía do Marajó. Tem como referências geográficas as coordenadas 1°23'S e 48°29'W, com 16m de altitude em relação ao nível do mar (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998), não apresentando desníveis consideráveis no relevo.

Belém está localizada nas faixas subtropicais de alta pressão e sujeita aos ventos vindos do hemisfério norte, formando os ventos alísios de nordeste na região (Anexo A). A velocidade dos ventos varia de 2 a 4m/s, o que, segundo a classificação da escala de Beaufort, seria caracterizado como 'brisas ligeiras' (NASCIMENTO, 1995) (Anexo D). A partir de análise de dados utilizando o

programa *Analysis SOL-AR*, foi possível obter a rosa dos ventos com a frequência de ocorrência e de predominância de velocidade dos ventos para cada estação do ano de Belém (Figura 4-3, a).

Figura 4-3 Rosa dos ventos com frequência de ocorrência de vento (a) e Rosa dos ventos com predominância de velocidade do vento (b) m Belém



Fonte: *Software Analysis SOL-AR*.

Analisando-se a Figura 4-3 (a), pode-se concluir que a frequência de ocorrência de vento é predominante a leste, com oscilações de sudeste a nordeste. Os maiores percentuais de incidências são na primavera, com 20%, e no inverno, com pouco mais de 20%, sendo a maior movimentação de ar pelo período da tarde.

Conforme análise da Figura 4-3 (b), pode-se extrair como velocidade média do vento anual o valor de 3m/s em todas as direções. Assim, adotou-se como referências para as simulações a incidência do vento predominando de leste ($\alpha = 0^\circ$) e de nordeste/sudeste ($\alpha = 45^\circ$), e velocidade média de 3m/s.

4.3.3 MÉTODO PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM CFD

Em simulações CFD que envolvem problemas de ventilação natural urbana, alguns procedimentos precisam ser cumpridos. O primeiro passo é a **construção da geometria**, que representa o volume ocupado pelo ar na região de interesse. Após essa etapa, é necessária a **criação do domínio computacional**, que representa os limites do escoamento. Assim, é preciso deixar distâncias suficientes entre os limites do domínio e a geometria simulada para o desenvolvimento do fluxo.

O passo seguinte é a **geração da malha**, que corresponde à decomposição do espaço em volumes menores (elementos), onde são resolvidas as equações governantes. É importante observar que em regiões onde há maior necessidade de visualizar fenômenos de interesse, é imprescindível a aplicação do **refino da malha**. Em simulações de ventilação em meio urbano, os

espaços que merecem maior atenção ao refino são os afastamentos entre edificações, paredes e pisos.

Gerada a malha, é importante determinar que **equações governantes** devem ser aplicadas. As equações comumente empregadas são de conservações de massa e quantidade de movimento (*Navier-Stokes*). São usadas também equações para representação dos fluxos turbulentos. No presente trabalho, foram aplicadas as equações de turbulência $k-\varepsilon$. Em seguida, devem ser definidas as **condições de contorno** aplicáveis no domínio. As condições de contorno representam as condições externas à região de interesse, como perfil de velocidade do vento e rugosidade de paredes. E, por fim, são definidos os **critérios de convergência** responsáveis pela finalização das soluções numéricas, chegando-se à convergência quando a solução atinge erro médio ou máximo determinado.

4.3.3.1 Geometrias (Cenários de ocupação)

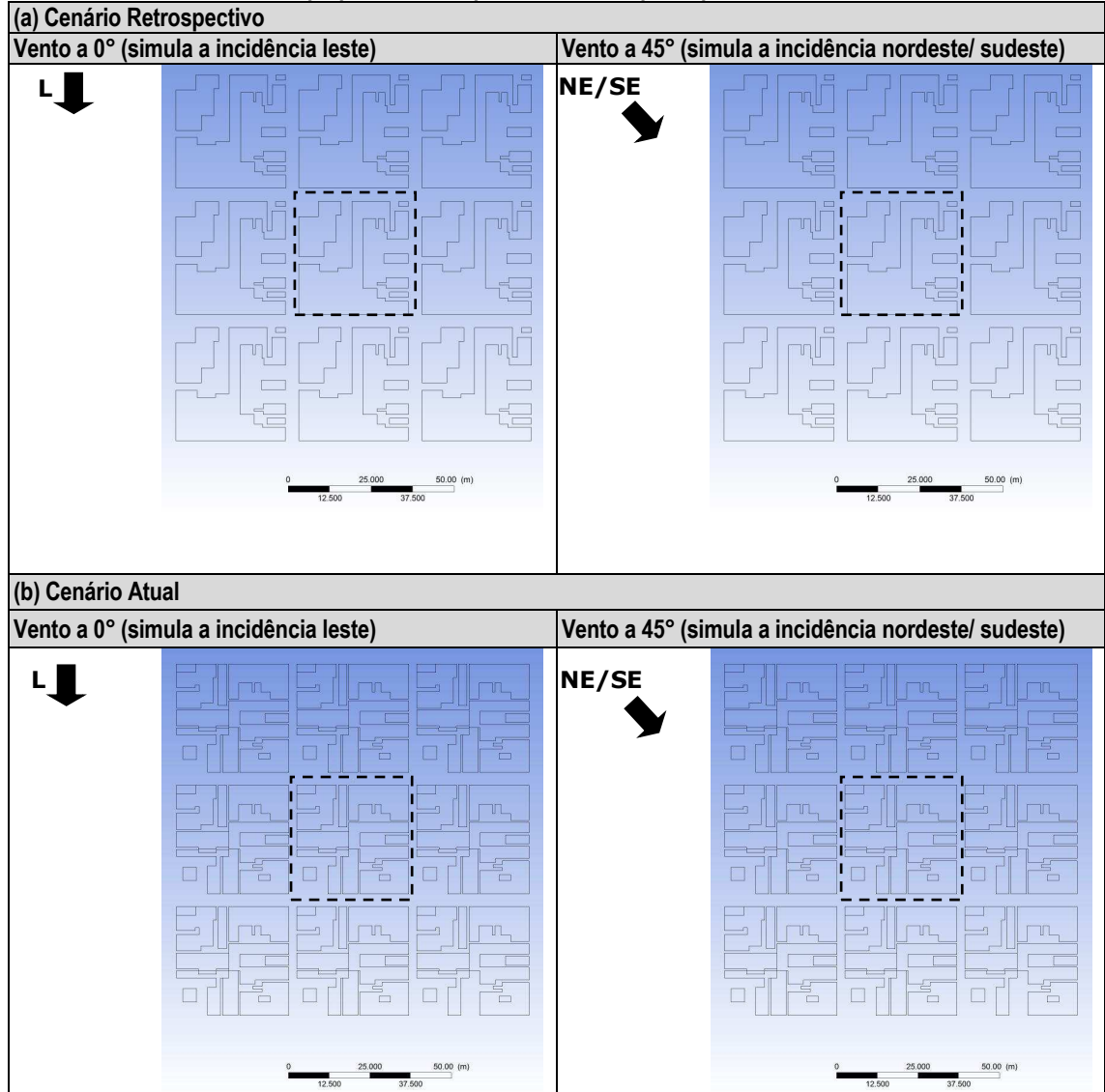
Em simulações de ventilação natural com interesse no escoamento do entorno das edificações, a geometria representa o escoamento do ar ao redor da região de interesse. Para que se tenha maior garantia de que a geometria se aproximará da realidade, é necessária a sua construção com riqueza de detalhes. Entretanto, esta condição apresenta um maior custo computacional, pois eleva o número de elementos e pode comprometer a simulação.

Nesta pesquisa, as quadras possuem as dimensões gerais de 168,85m x 164,70m, distanciadas 20m (largura das vias urbanas). As geometrias foram modeladas no *software Solidworks 10.0*, sendo desconsiderados nas construções, elementos como detalhes arquitetônicos, sacadas, varandas, pátios, inclinação de coberturas, representação de espécies arbóreas, calçadas, muros e afastamentos menores que 5m entre as edificações. Também se assumiu que as edificações de um e/ou dois pavimentos fossem consideradas como blocos com altura de 7m. Essas premissas geométricas foram necessárias para reduzir o custo computacional das simulações.

O *Solidworks 10.0* possui a limitação de não permitir o uso de comprimentos maiores que 500m. Consequentemente, nas dimensões das quadras foi aplicada a escala de redução 1/5. A escolha por essa escala deve-se as dimensões calculadas para os domínios computacionais e os comprimentos das geometrias. Portanto, as dimensões de 168,85m x 164,70m passaram a ser 33,77m x 32,94m e a largura das ruas de 20m para 4m. Após as simplificações adotadas e a redução de escala, foram modelados os cenários de ocupação e as orientações dominantes dos ventos (leste [$\alpha = 0^\circ$] e nordeste/sudeste [$\alpha = 45^\circ$]) em Belém/PA. Como forma de analisar o

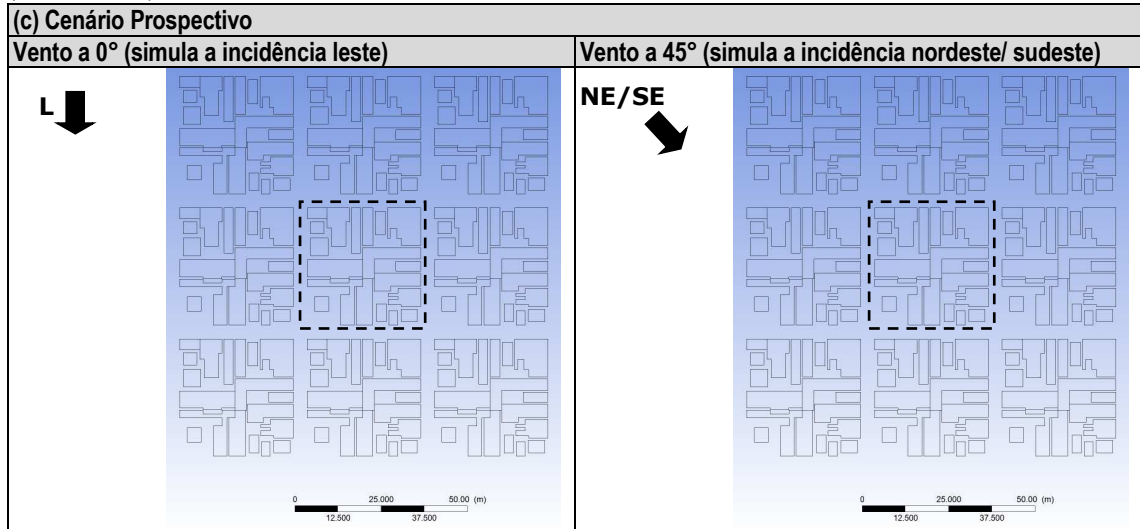
escoamento entre quadras, partiu-se da premissa que as quadras estavam circundadas por outras quadras iguais a ela. Isso resultou na criação dos cenários com as quadras agrupadas (Figura 4-4).

Figura 4-4 Cenários de simulação com a implantação contendo os gabaritos, e sujeito à orientação do vento perpendicular a quadra, 0°, e oblíquo à quadra, 45°



(Continua)

(Continuação)



Fonte: Autora, 2015.

4.3.3.2 Construção dos domínios

O domínio computacional simula o escoamento atmosférico, ou seja, representa o escoamento de ar que envolve a geometria. Este é composto por faces que precisam estar a uma determinada distância do objeto a ser simulado. Entre os formatos de domínio mais utilizados, têm-se o retangular, o octogonal e o circular. No presente trabalho usou-se o formato retangular. As dimensões quanto às distâncias frontal, lateral, superior e posterior entre as faces do domínio e o objeto simulado são calculadas em função da altura do edifício mais alto a ser simulado e a relação de bloqueio⁸ (FRANKE *et al.*, 2004; FRANKE, 2006; FRANKE *et al.*, 2007).

Como para cada cenário tem-se um valor de altura do edifício mais alto distinto, foi necessário calcular diferentes dimensões de domínio em função destas alturas. Na Tabela 4-1 são mostrados os valores calculados das distâncias que as geometrias precisam estar das faces do domínio computacional.

Tabela 4-1 Dimensões frontal (F), lateral (L), topo (T) e posterior (P) dos domínios construídos na escala 1/5

(F x L x T x P)	Cenário retrospectivo [m]	Cenário atual [m]	Cenário prospectivo [m]
Vento a 0° (simula a incidência leste)	109.31 x 109.31 x 109.31 x 109.31	89.10 x 109.31 x 109.31 x 267.30	89.10 x 109.31 x 109.31 x 267.30
Vento a 45° (simula a incidência nordeste/ sudeste)	152.81 x 152.81 x 152.81 x 152.81	89.10 x 152.81 x 152.81 x 267.30	89.10 x 152.81 x 152.81 x 267.30

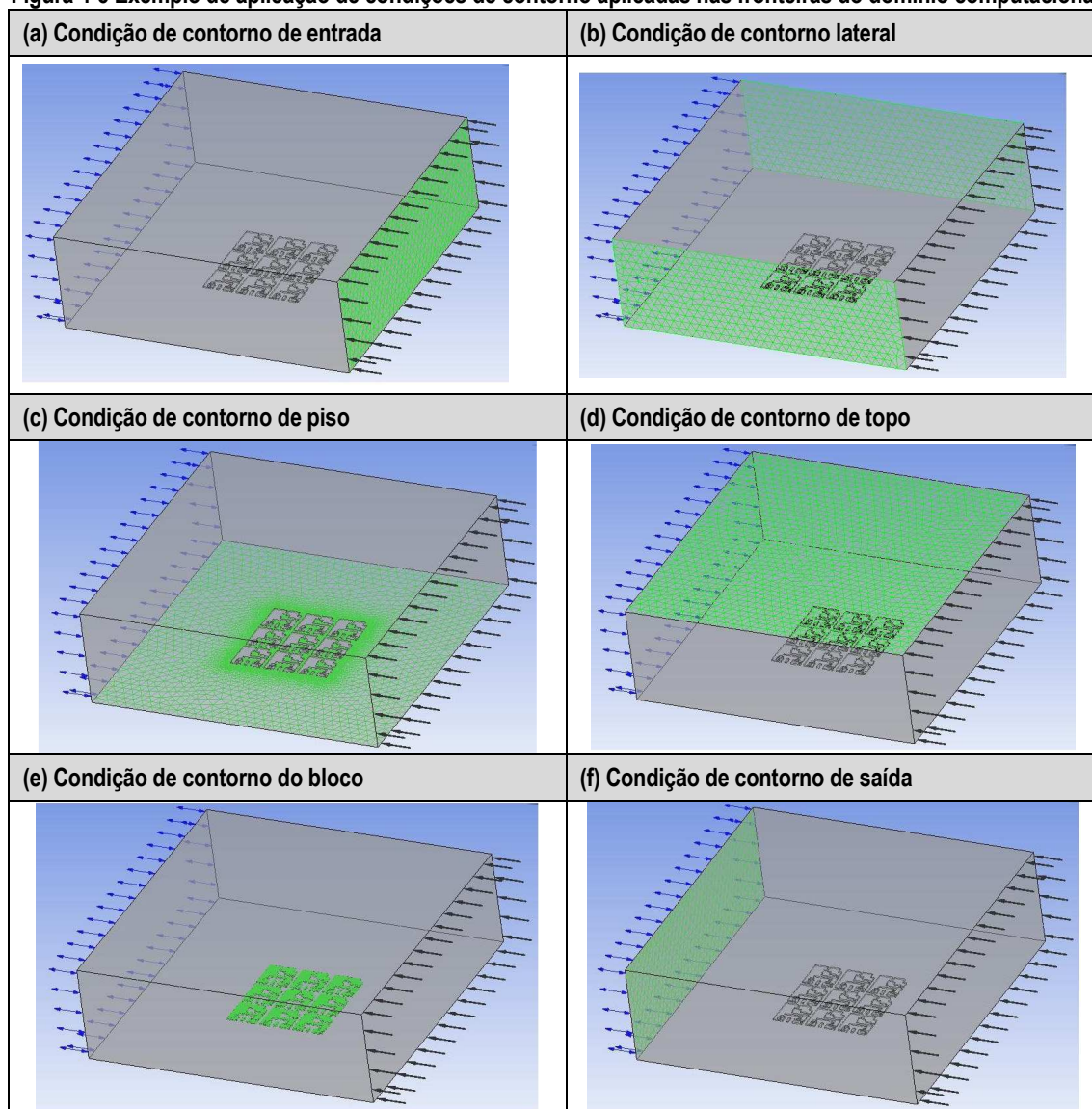
⁸ Relação de bloqueio ou distância de bloqueio é a razão entre a área projetada dos edifícios na direção do fluxo pela secção transversal livre do domínio computacional (FRANKE *et al.*, 2007).

Mesmo tendo-se calculado os valores das dimensões frontal e posterior do domínio para os cenários prospectivos conforme revisão bibliográfica, estes foram considerados insuficientes para permitir o desenvolvimento do fluxo. Dessa forma, como medida preventiva para evitar resultados equivocados, considerou-se para suas dimensões, o tamanho da quadra em planta baixa, como mostrado na Tabela 4-1.

4.3.3.3 Condições de contorno

As condições de contorno simulam as características do ambiente externo dentro do domínio. Na Figura 4-5 mostram-se as fronteiras do domínio onde foram aplicadas às condições de contorno.

Figura 4-5 Exemplo de aplicação de condições de contorno aplicadas nas fronteiras do domínio computacional



Fonte: Autora, 2015.

No Quadro 4-2, estão listadas as estratégias aplicadas às condições de contorno conforme revisão de literatura (WIERINGA, 1992; RICHARDS; ROXEY, 1993; FRANKE *et al.*, 2004; FRANKE, 2006; ZHANG, 2009; BRANDÃO, 2009; LEITE, 2010; BLOCKEN; JANSSEN; VAN HOOFF, 2012; RAMPONI; BLOCKEN, 2012). O escoamento foi considerado incompressível, isotérmico e pressão de referência de 1atm e temperatura do fluido de 25°C.

Quadro 4-2 Condições de contorno aplicadas

Fronteira	Referências	O que é recomendado?
Entrada	Wieringa (1992); Richards e Roxey (1993); Franke <i>et al.</i> (2007); Zhang (2009); Blocken, Janssen e van Hooff (2012); Ramponi e Blocken (2012).	<ul style="list-style-type: none"> - Condição de entrada (<i>inlet</i>) com inserção do perfil de entrada da velocidade média vertical do vento [U] e equação de cálculo da velocidade de atrito [u^*]; $U = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \quad ; \quad u^* = \frac{k \cdot U_h}{\ln\left(\frac{h+z_0}{z_0}\right)}$ <ul style="list-style-type: none"> - Intensidade de turbulência de 5%; - Comprimento de rugosidade aerodinâmica de 2m (edifícios altos); - Velocidade média do vento de 3m/s.
Lateral	Cóstola e Alucci (2011); Franke (2006); Blocken, Carmeliet e Stathopoulos (2007).	Condição de parede (<i>wall</i>), sem rugosidade (<i>free slip wall</i>).
Topo	Blocken, Stathopoulos e Carmeliet (2007); Brandão (2009); Blocken e Persoon (2009); Cóstola e Alucci (2011).	Condição de parede (<i>wall</i>), sem rugosidade (<i>free slip wall</i>).
Saída	Franke <i>et al.</i> (2004); Ramponi e Blocken (2012); An, Fung e Yim (2013).	Condição de contorno aberta (<i>opening</i>) e pressão estática igual à zero.
Piso	Brandão (2009); Cóstola e Alucci (2011).	Condição de parede (<i>wall</i>), <i>no slip wall</i> , com rugosidade (<i>smooth wall</i>).
Parede (Bloco)	Brandão (2009); Cóstola e Alucci (2011).	Condição de parede (<i>wall</i>), <i>no slip wall</i> , com rugosidade (<i>smooth wall</i>).

Fonte: Autora, 2015.

4.3.3.4 Construção, refinamento e independência da malha

A malha é a decomposição (discretização) do domínio em volumes menores, chamados de elementos. Esses elementos são calculados individualmente por equações diferenciais parciais, e podem possuir o formato hexaédrico, tetraédrico e/ou prismático. Segundo Franke *et al.* (2004) e Franke *et al.* (2007), a malha deve possuir alto refino para que possa capturar fenômenos como camadas de cisalhamento⁹ e vórtices¹⁰, principalmente na região de interesse. Contudo, deve-se atentar para a capacidade computacional e tempo disponível de investigação. Em simulações de

⁹ Camada de cisalhamento: tensão ou força provocada pela componente do vento paralela à superfície (SILVA, 2013, p. 14).

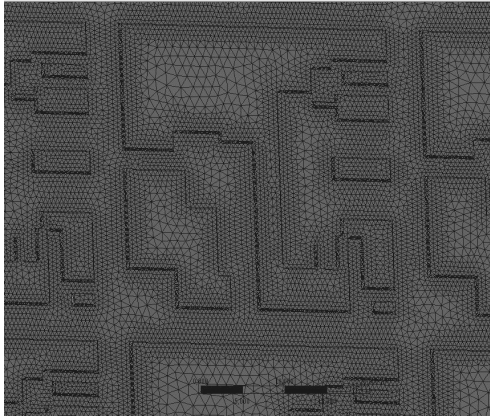
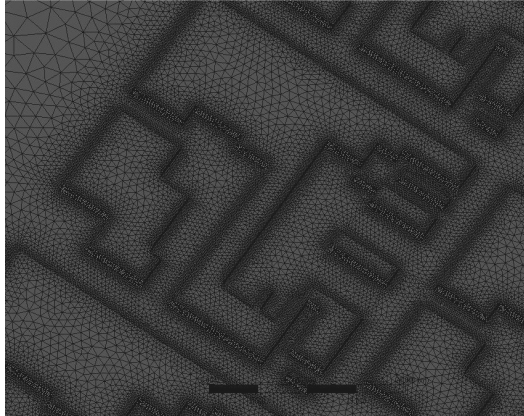
¹⁰ Vórtices: escoamentos com trajetórias circulares e estrutura organizada (redemoinhos) (SILVA, 2013, p. 26).

ventilação urbana, as regiões que precisam de maior refinamento são as superfícies perto de paredes, pisos, e entre prédios.

As malhas foram geradas no *Ansys Meshing* 15.0. Franke *et al.* (2004) e Franke *et al.* (2007) recomendam o uso de células hexaédricas, por melhorar a convergência. Entretanto, no presente trabalho, quando se aplicou esse tipo de malha, as simulações atingiram a capacidade máxima computacional e não alcançaram a convergência. Devido às circunstâncias, optou-se pelo uso de elementos tetraédricos. Os autores também indicam o uso de coeficiente de expansão de célula no valor de 1,2, a aplicação de pelo menos dez células por raiz cúbica de volume nas faces das edificações e no mínimo dez células no espaço entre os edifícios.

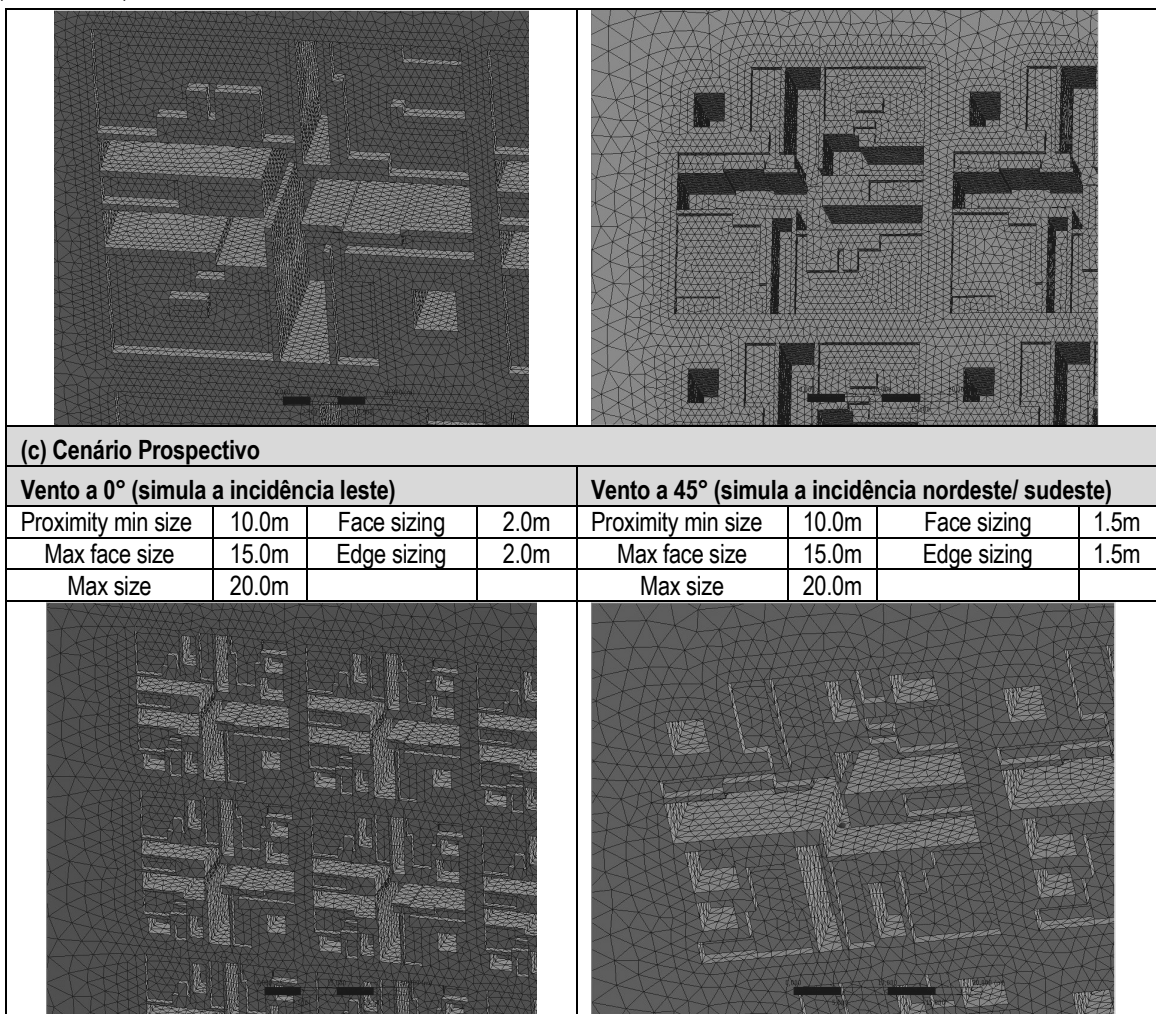
Além dessas recomendações, foi necessário aplicar um refino de malha em locais de interesse como as faces das edificações e nas ruas. Para isso, foi inserido um refinamento global e local nas simulações. No refino global, foi possível estabelecer dimensões gerais para o domínio, por meio da inserção do tamanho mínimo do elemento (*proximity min size*), tamanho máximo da face (*max face size*) e tamanho máximo do elemento no volume de malha (*max size*). E no refinamento local, aplicou-se o refino nas faces das edificações através da inserção de valores para no (*face sizing*) e nas bordas das edificações pelo (*edge sizing*) (Tabela 4-2).

Tabela 4-2 Refinamento de malha aplicado em cada geometria

(a) Cenário Retrospectivo							
Vento a 0° (simula a incidência leste)				Vento a 45° (simula a incidência nordeste/ sudeste)			
Proximity min size	5.0m	Face sizing	1.5m	Proximity min size	1.0m	Face sizing	1.0m
Max face size	10.0m	Edge sizing	0.5m	Max face size	5.0m	Edge sizing	0.2m
Max size	15.0m			Max size	15.0m		
							
(b) Cenário Atual							
Vento a 0° (simula a incidência leste)				Vento a 45° (simula a incidência nordeste/ sudeste)			
Proximity min size	10.0m	Face sizing	1.0m	Proximity min size	5.0m	Face sizing	1.0m
Max face size	15.0m	Edge sizing	0.75m	Max face size	10.0m	Edge sizing	1.0m
Max size	20.0m			Max size	15.0m		

(Continua)

(Continuação)



(c) Cenário Prospectivo

Vento a 0° (simula a incidência leste)				Vento a 45° (simula a incidência nordeste/ sudeste)			
Proximity min size	10.0m	Face sizing	2.0m	Proximity min size	10.0m	Face sizing	1.5m
Max face size	15.0m	Edge sizing	2.0m	Max face size	15.0m	Edge sizing	1.5m
Max size	20.0m			Max size	20.0m		

Fonte: Autora, 2015.

Para avaliar a independência de malha, foram realizados três testes de refinamento para cada geometria. Essas malhas foram observadas até o momento em que as mudanças provocadas pelo refino interferissem nos resultados das simulações. Em algumas modelagens não ocorreu convergência devido às limitações computacionais (Tabela 4-3).

Tabela 4-3 Refinamentos aplicados em cada cenário e o número de elementos gerados

Cenário	Refino	Número de elementos	Cenário	Refino	Número de elementos
Retrospectivo leste	1° refino	840412	Retrospectivo nordeste	1° refino	Não convergiu
	2° refino	492862		2° refino	Não convergiu
	3° refino	1454096		3° refino	6618381
Atual leste	1° refino	1462002	Atual nordeste	1° refino	Não convergiu
	2° refino	1471044		2° refino	Não convergiu
	3° refino	1492334		3° refino	1054393
Prospectivo leste	1° refino	Não convergiu	Prospectivo nordeste	1° refino	432867
	2° refino	128932		2° refino	435732
	3° refino	279483		3° refino	446694

Fonte: Autora, 2015.

4.3.3.5 Equações governantes e critério de convergência

Após a discretização da malha, os elementos foram calculados computacionalmente por equações governantes da conservação de massa (equação da continuidade), da quantidade de movimento (equações *Navier-Stokes*) e os fluxos turbulentos resolvidos por equações do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ (ZHANG, 2009; RAMPONI; BLOCKEN, 2012). O critério de convergência para as equações diferenciais parciais resultantes da discretização resolvidas dentro de cada célula foi dimensionado para 10^{-4} (FRANKE *et al.*, 2004; FRANKE, 2006; FRANKE, 2007).

4.3.4 MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.3.4.1 Visualização do escoamento de vento em quadras verticalizadas através de planos horizontais

No presente trabalho, foram criados planos horizontais distanciados do solo para visualização dos contornos de velocidade de escoamento do ar, que é a representação de campos de velocidade do vento através de cores. Para isto, foram estabelecidos nove planos em diferentes alturas: 1m e 2m (nível de pedestre), 3m (altura de uma edificação de um pavimento), 10m (altura de uma estação meteorológica) e os outros planos de 25m, 55m, 65m, 70m, 85m correspondem a alturas aproximadas de edifícios existentes nas quadras. Isto possibilitou a visualização dos efeitos de recuos, uso do solo e verticalização sob a vigência de diferentes Planos Diretores no escoamento de vento no setor central de Belém/PA.

4.3.4.2 Comparação do potencial de ventilação natural no espaço urbano em diferentes alturas

Com a finalidade de comparar as possíveis mudanças nos escoamentos das velocidades dos ventos, em razão da legislação vigente para cada Plano Diretor, fez-se a marcação de doze pontos nas quadras-miolo (quadra localizada no centro do agrupamento de quadras) de cada cenário para a visualização e comparação das mudanças ocorridas na velocidade do vento. Para isso, foram marcados três pontos na face orientada a barlavento e a sotavento, afastados na distância de 2m da quadra-miolo, nas alturas de 2m, 5m, 10m, 20m, 30m, 40m, 50m, 60m, 70m, 80m, 90m, 100m.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO VENTO A PARTIR DOS EFEITOS DAS PRESCRIÇÕES URBANÍSTICAS NOS CENÁRIOS RETROSPECTIVO, ATUAL E PROSPECTIVO ATRAVÉS DE PLANOS HORIZONTAIS, VERTICAIS E VALORES DE VELOCIDADE DO VENTO

- Cenário retrospectivo com vento orientado a leste [0°]

No cenário retrospectivo, tem-se uma situação de adensamento horizontal e baixas alturas, em que a velocidade do vento é reduzida à medida que ultrapassa a primeira quadra e atinge valores menores que 1m/s (Figura 4-6a, c). Isso acontece em decorrência do adensamento da malha urbana e da baixa permeabilidade, que provoca redução das velocidades e elevação do gradiente de velocidade em virtude do atrito com o tecido urbano. Além disso, desenvolvem-se esteiras de vento nas regiões posteriores às quadras, com zonas de estagnação de ar que se repetem quadra após quadra. Essa situação compromete as trocas de calor e renovação de ar nas edificações e entre elas. Por outro lado, em áreas com exposição direta ao vento predominante e sem obstáculos como as ruas, há uma melhoria nos valores de velocidade de escoamento de correntes de ar.

Além dos planos horizontais, foram verificados os valores de velocidade do vento a barlavento e a sotavento na quadra-miolo. Pela análise dos valores de velocidade (Tabela 4-4), ocorrem interferências das edificações e de suas alturas na velocidade de escoamento do ar até 10m de altura. Os baixos valores de velocidade registrados se devem ao adensamento horizontal gerado pela proximidade das construções, além da ampla ocupação do solo urbano.

Tabela 4-4 Valores de velocidade de vento obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário retrospectivo com vento orientado a leste [0°]

Cenário retrospectivo com vento orientado a leste [0°] [m/s]	Plano horizontal (altura)	Velocidade do vento nos pontos a barlavento e a sotavento [m/s]					
		Pb1	Pb2	Pb3	Ps1	Ps2	Ps3
	2m	1.73	0.49	0.70	1.49	1.09	0.64
	5m	0.66	1.07	0.41	0.97	0.99	0.43
	10m	1.51	3.55	2.64	2.36	1.93	2.75
	20m	5.72	6.18	5.76	5.39	5.01	5.35
	30m	7.39	7.37	7.33	7.15	6.95	7.11

Fonte: Autora, 2015.

Nota: 'Pb' significa 'Ponto a barlavento' e 'Ps' significa 'Ponto a sota-vento'. Os números indicam se é o ponto 1 ou 2 ou 3.

Através da análise dos planos verticais (Figura 4-6e, g), ratifica-se a afirmação de que as velocidades são baixas até aproximadamente o plano de 10m, valor próximo à altura das construções existentes, e que acima deste nível a velocidade do vento tende a ser constante e intensa.

- Cenário atual com vento orientado a leste [0°]

No cenário atual ocorre uma situação de maior variação de gabaritos e afastamentos entre as edificações. Pela análise dos planos horizontais de 1m, 2m e 3m (Figura 4-7a, c), pode-se afirmar

que há uma aceleração da velocidade do vento entre as ruas até a primeira quadra. Essa situação provoca o efeito de canalização, devido à proximidade entre as construções.

Até a primeira quadra, o vento circula entre os afastamentos e vazios das construções, entretanto nas quadras posteriores ocorrem áreas com baixas velocidades de vento e estagnação de ar. Essas interferências são observadas através de sombras de vento e turbulências a sotavento (Figura 4-7j, m).

Até o plano de 10m, ainda é possível visualizar esteiras de vento decorrentes das construções localizadas abaixo desse plano. A partir de 65m de altura, começa a ocorrer a diminuição das interferências das barreiras físicas. Pela análise das informações da Tabela 4-5, pode-se concluir que a partir dos 60m de altura, a velocidade do vento passa a aumentar de forma constante. E que os valores de velocidade abaixo desse plano possuem velocidades mais baixas, principalmente quando estão à frente ou atrás de construções altas.

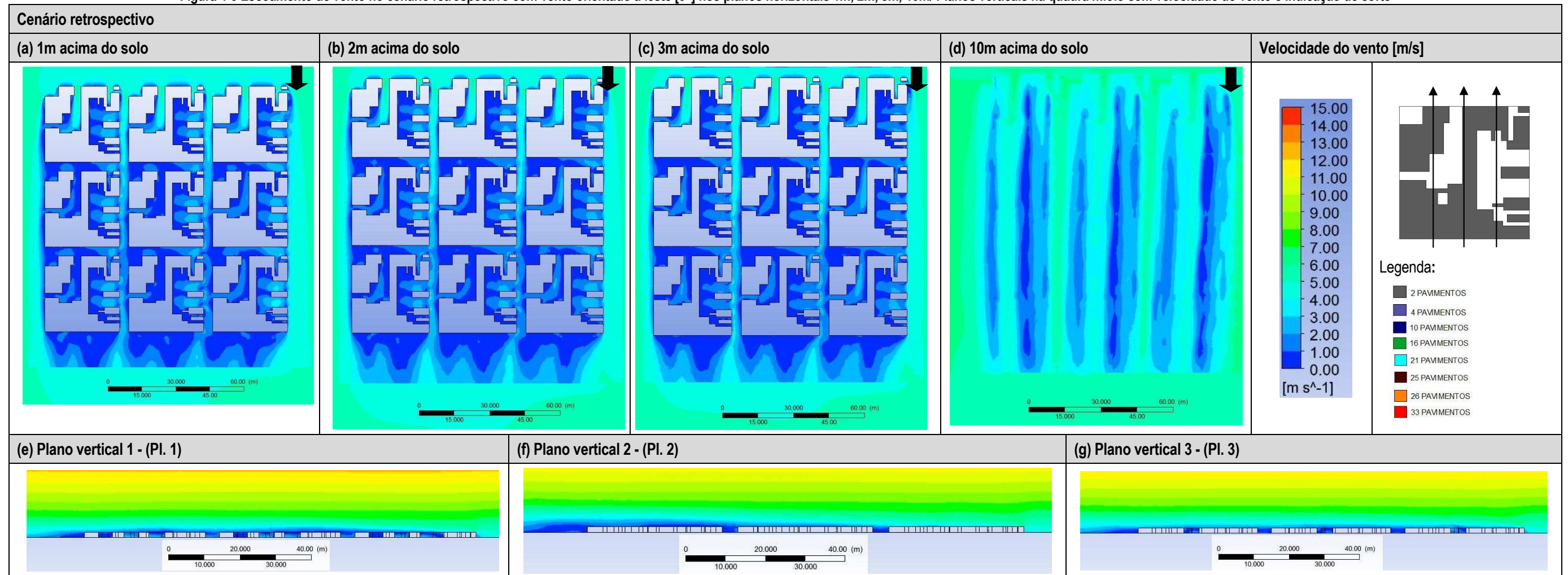
Tabela 4-5 Valores de velocidade de vento obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário atual com vento orientado a leste [0°]

	Plano horizontal (altura)	Velocidade do vento nos pontos a barlavento e a sotavento [m/s]					
		Pb1	Pb2	Pb3	Ps1	Ps2	Ps3
Cenário atual com vento orientado a leste [0°] [m/s]	2m	0.86	0.68	1.96	1.25	0.31	0.84
	5m	0.49	0.62	1.67	1.41	0.40	0.93
	10m	1.24	0.42	2.40	1.66	0.28	1.20
	20m	1.30	0.69	1.56	1.33	0.38	1.27
	30m	1.14	0.37	1.83	0.61	0.96	1.17
	40m	0.61	0.40	2.42	0.15	1.33	1.02
	50m	0.72	1.53	2.94	0.67	1.47	0.78
	60m	2.31	1.87	2.79	1.26	1.48	0.69
	70m	5.21	1.75	1.91	2.45	1.46	0.86
	80m	8.34	0.80	0.39	4.58	0.60	0.79
	90m	10.80	3.58	3.99	7.21	1.34	2.49
	100m	12.16	8.80	9.12	9.65	3.96	5.37

Fonte: Autora, 2015.

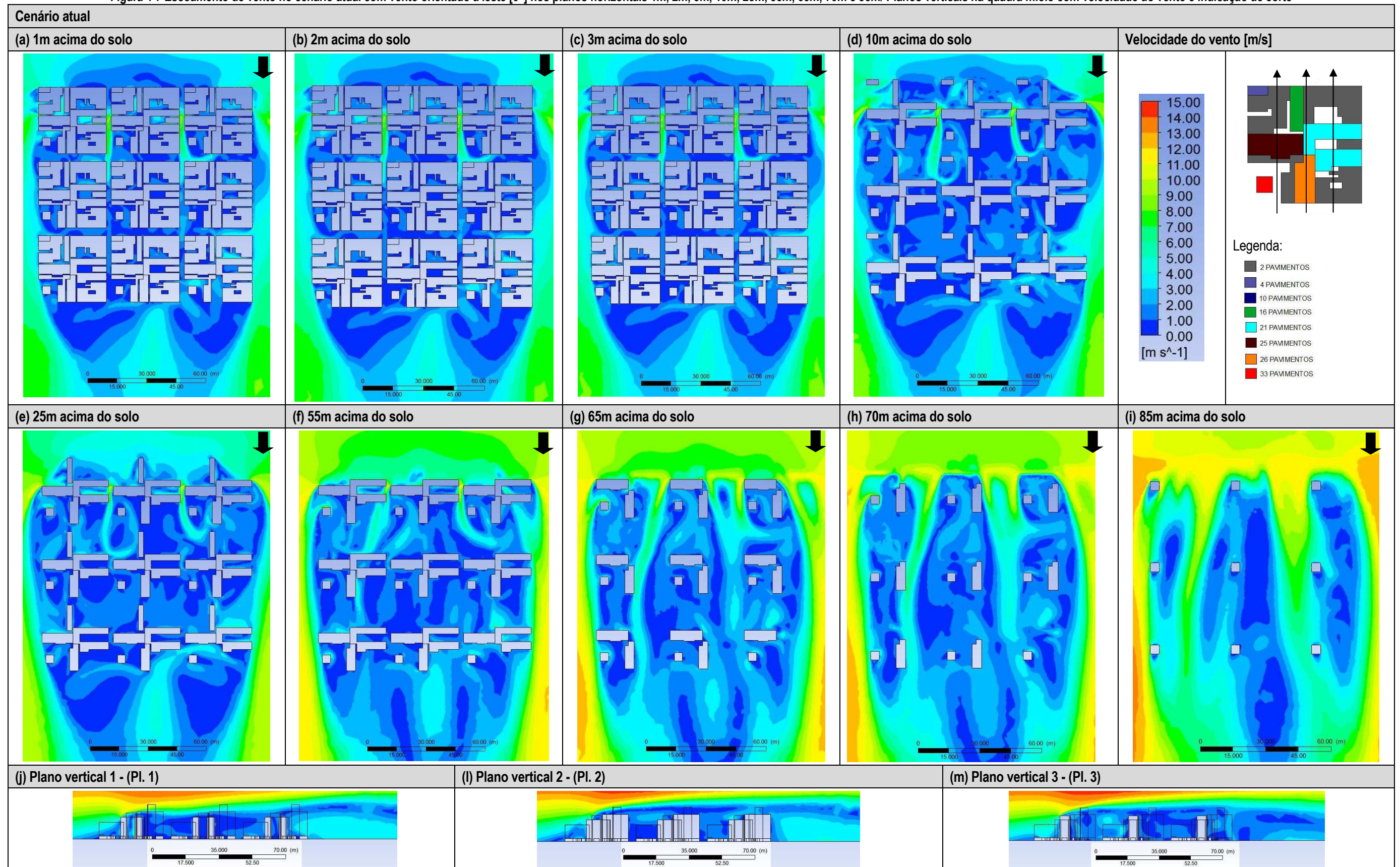
Nota: 'Pb' significa 'Ponto a barlavento' e 'Ps' significa 'Ponto a sotavento'. Os números indicam se é o ponto 1 ou 2 ou 3.

Figura 4-6 Escoamento de vento no cenário retrospectivo com vento orientado a leste [0°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte



Fonte: Autora, 2015.

Figura 4-7 Escoamento de vento no cenário atual com vento orientado a leste [0°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte



Fonte: Autora, 2015.

- Cenário prospectivo com vento orientado a leste [0°]

No cenário prospectivo, é apresentado um panorama de maior verticalização do espaço urbano. Nas primeiras quadras ocorre o efeito de canalização do vento entre as ruas no sentido do vento predominante, contudo há pouca circulação de ar entre as edificações (Figura 4-8a, c). A partir dos 10m de altura, é possível perceber as interferências provocadas pelas esteiras de vento entre quadras, ruas e edifícios próximos (Figura 4-8j, m).

Até 20m de altura, ainda se visualiza a estagnação de vento em grandes áreas, gerada principalmente pelas construções vizinhas. Essas edificações representam barreiras ao fluxo de vento em função da proximidade que estão das outras construções. Contudo, essa situação começa a se modificar a partir do plano de 50m, devido à presença de edifícios com elevados gabaritos.

Na Tabela 4-6, até 50m de altura têm-se baixas velocidades de ar, entretanto a partir de 60m observa-se que os valores de velocidade aumentam concomitante a elevação dos planos horizontais. Essa condição acontece, pois os planos mais altos apresentam baixa interferência da rugosidade do solo.

Tabela 4-6 Valores de velocidade de vento [m/s] obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário prospectivo com vento orientado a leste [0°]

Cenário prospectivo com vento orientado a leste [0°] [m/s]	Plano horizontal (altura)	Velocidade do vento nos pontos a barlavento e a sotavento [m/s]					
		Pb1	Pb2	Pb3	Ps1	Ps2	Ps3
	2m	1.10	0.82	1.92	0.93	1.20	0.66
	5m	1.37	1.07	2.14	0.98	1.21	0.61
	10m	1.62	1.36	2.33	1.05	1.22	0.73
	20m	1.72	1.20	1.77	1.29	1.19	0.83
	30m	1.36	1.07	1.00	1.25	1.09	0.80
	40m	1.43	1.45	0.61	0.51	0.92	0.68
	50m	1.16	2.10	0.20	0.24	0.79	0.52
	60m	2.84	2.10	0.13	1.72	0.79	0.47
	70m	5.81	1.53	0.09	4.14	1.49	0.41
	80m	8.66	5.63	1.61	6.63	3.42	0.83
	90m	10.63	8.82	4.66	8.67	5.75	2.74
	100m	12.04	11.16	8.99	10.22	7.80	5.90

Fonte: Autora, 2015.

Nota: 'Pb' significa 'Ponto a barlavento' e 'Ps' significa 'Ponto a sotavento'. Os números indicam se é o ponto 1 ou 2 ou 3.

- Cenário retrospectivo com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°]

Ao observar os planos do cenário retrospectivo com orientação a 45°, é possível afirmar que esses têm melhores condições de infiltração do vento que o cenário retrospectivo orientado a 0°. O escoamento de ar no cenário retrospectivo a 45° adentra as ruas e os vazios das construções com velocidade de até 5m/s, mesmo com o adensamento horizontal (Figura 4-9a, c). É possível

perceber áreas com estagnação de ar, contudo em número menos expressivo do que o apresentado no cenário retrospectivo a 0°.

Através do plano vertical, as interferências no escoamento do vento são constatadas até aproximadamente 12m de altura e a velocidade do vento tende a ser mais alta e menos turbulenta acima da malha urbana.

Ao analisar a Tabela 4-7, nota-se que a velocidade do vento é baixa até 10m de altura, correspondendo aproximadamente ao gabarito médio destas construções. E quando se compara o cenário retrospectivo leste com o nordeste/sudeste, verifica-se que esse último apresenta melhores condições de ventilação natural.

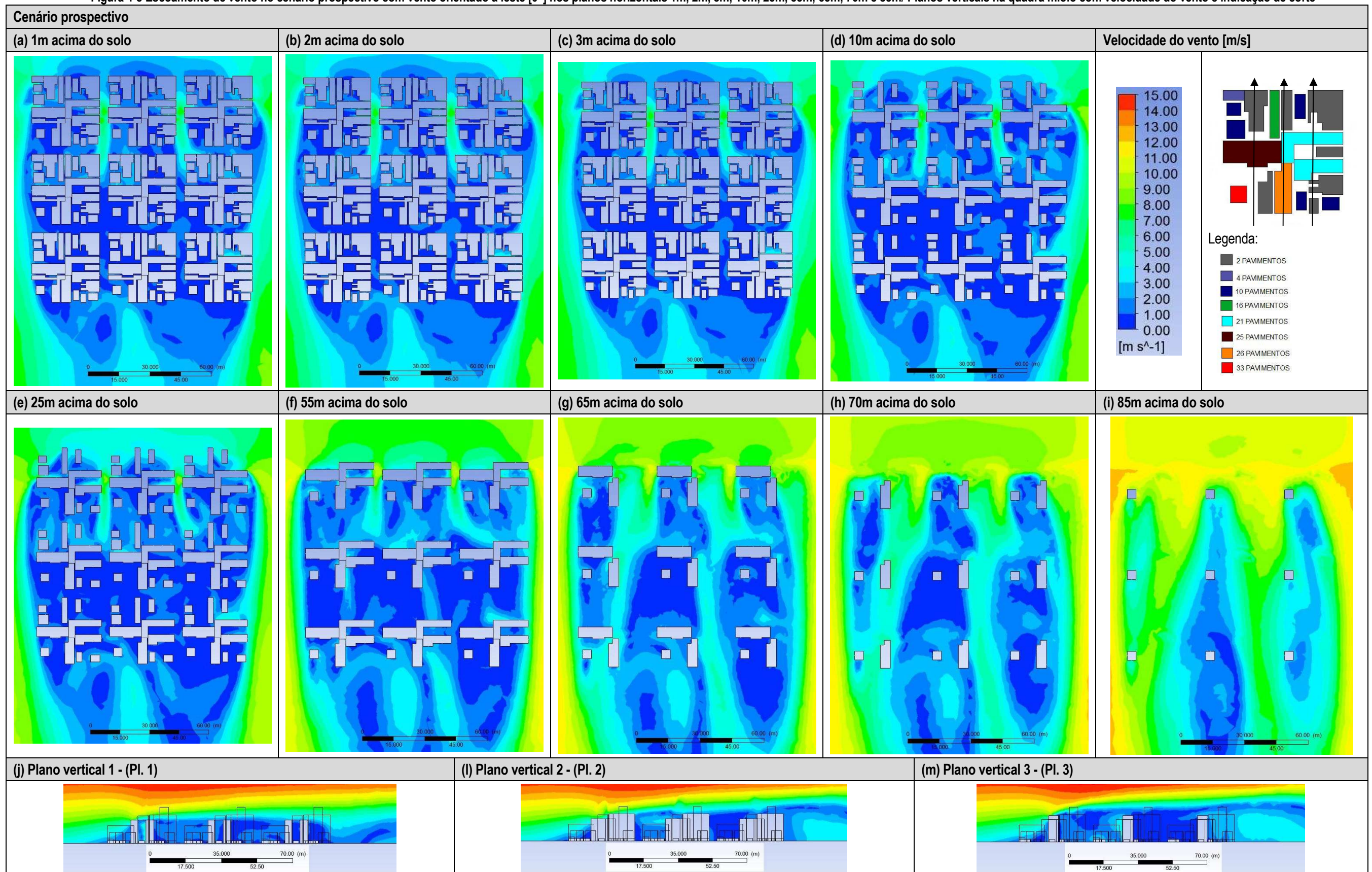
Tabela 4-7 Valores de velocidade de vento [m/s] obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário prospectivo com vento orientado a leste

	Plano horizontal (altura)	Velocidade do vento nos pontos a barlavento e a sotavento [m/s]					
		Peld1	Peld2	Peld3	Psld1	Psld2	Psld3
Cenário retrospectivo com vento orientado a nordeste/sudeste [m/s]	2m	2.43	3.01	2.48	1.57	0.75	2.48
	5m	3.94	2.17	2.32	1.53	1.16	2.32
	10m	5.31	4.52	2.30	4.57	5.81	2.30
	20m	5.99	6.53	3.59	6.25	6.42	3.59
	30m	7.14	7.38	5.96	7.42	7.35	5.96
	40m	8.22	8.26	7.78	8.40	8.29	7.78
	50m	9.16	9.15	8.95	9.28	9.18	8.95
	60m	10.02	10.02	9.89	10.10	10.03	9.89
	70m	10.81	10.81	10.73	10.86	10.80	10.73
	80m	11.53	11.52	11.48	11.55	11.52	11.48
	90m	12.18	12.17	12.15	12.19	12.17	12.15
	100m	12.74	12.75	12.74	12.77	5.81	12.74

Fonte: Autora, 2015.

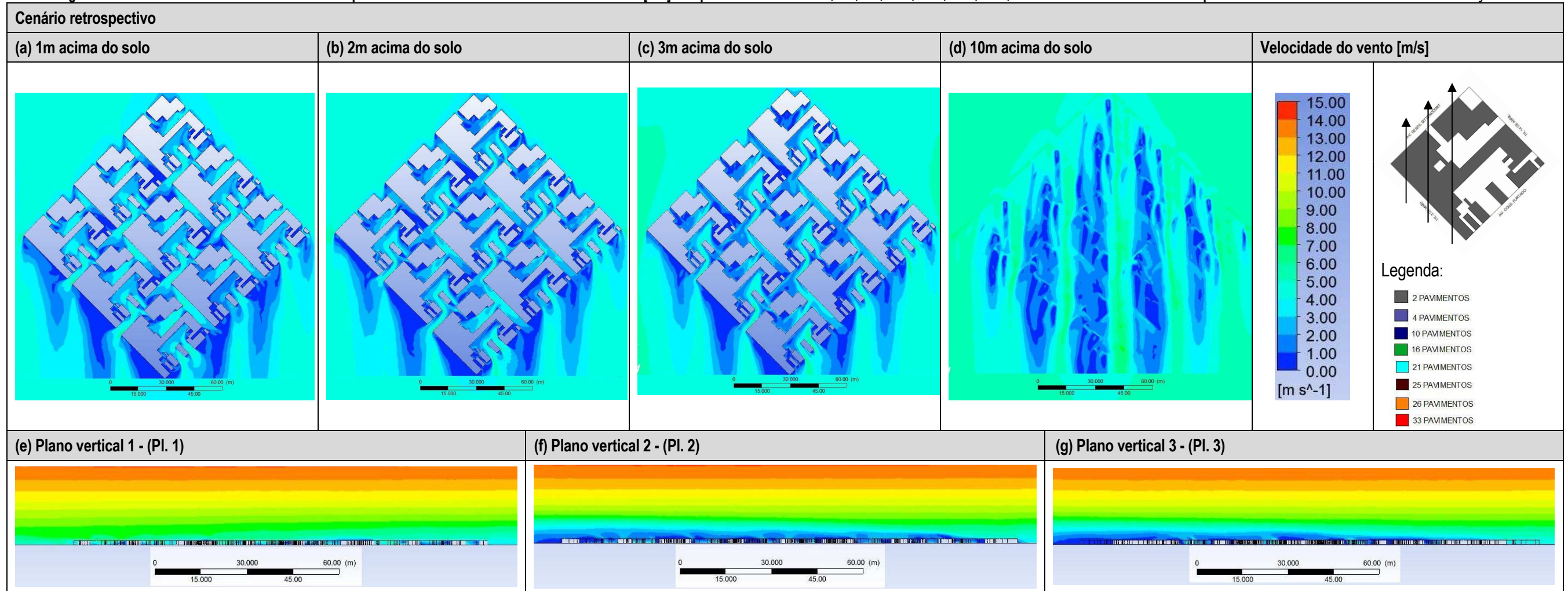
Nota: 'Pb' significa 'Ponto a barlavento' e 'Ps' significa 'Ponto a sotavento'. Os números indicam se é o ponto 1 ou 2 ou 3.

Figura 4-8 Escoamento de vento no cenário prospectivo com vento orientado a leste [0°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte



Fonte: Autora, 2015.

Figura 4-9 Escoamento de vento no cenário retrospectivo com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte



Fonte: Autora, 2015.

- Cenário atual com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°]

O cenário atual com vento orientado a 45° apresenta melhor infiltração de vento do que quando orientado a 0°. As condições de fluxo de ar são potencializadas pela permeabilidade e redução da interferência da rugosidade na malha urbana (Figura 4-10d, i). Até 10m de altura são sentidas as influências das esteiras de vento advindas das construções que estão abaixo desse plano, mas este panorama apresenta mudanças a partir de 25m. Nessa altura, ainda são sentidas as interferências das construções em planos inferiores, todavia a distribuição do fluxo de vento começa a exibir melhoras devido à redução das barreiras físicas (Figura 4-10e, i). Nos planos verticais (Figura 4-10j, m), observa-se que as edificações vizinhas provocam interferências no escoamento de vento e que esta situação pode ser minimizada pela inserção de afastamentos generosos entre as construções.

Pela análise da Tabela 4-8, os valores de velocidades a barlavento são baixos principalmente no Peld1 e Peld2, pois estão dispostos logo à frente de edificações. Nos pontos Psld2 e Psld3 a sotavento, têm-se baixos valores de velocidade, pois ocorre a recirculação de vento em reduzidas velocidades na região posterior a esses pontos.

Tabela 4-8 Valores de velocidade de vento [m/s] obtidos em três pontos a barlavento e em três pontos a sotavento na quadra miolo do cenário atual com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°]

Cenário atual com vento orientado a nordeste/ sudeste	Plano horizontal (altura)	Velocidade do vento nos pontos a barlavento e a sotavento [m/s]					
		Peld1	Peld2	Peld3	Psld1	Psld2	Psld3
	2m	1.0m	0.62	4.58	2.65	1.14	1.02
	5m	1.06	1.71	4.67	2.71	1.01	0.77
	10m	0.63	3.41	4.53	2.43	0.67	1.20
	20m	1.66	5.14	3.41	1.33	0.65	1.22
	30m	3.29	5.86	3.12	1.03	0.92	1.18
	40m	3.25	6.27	2.23	1.08	1.25	1.53
	50m	2.88	6.10	1.02	1.28	1.37	1.56
	60m	3.97	4.77	0.90	1.19	1.36	1.28
	70m	5.61	7.13	1.03	5.63	2.19	1.26
	80m	7.78	7.55	2.57	9.35	2.73	1.08
	90m	9.66	8.39	6.11	10.95	5.56	4.03
	100m	11.32	9.99	8.91	12.04	8.88	7.63

Fonte: Autora, 2015.

Nota: 'Pb' significa 'Ponto a barlavento' e 'Ps' significa 'Ponto a sotavento'. Os números indicam se é o ponto 1 ou 2 ou 3.

- Cenário prospectivo com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°]

No cenário prospectivo nordeste/sudeste (45°) observam-se melhores condições de circulação de vento quando comparado ao vento orientado a leste (0°). Este cenário possui menos áreas de estagnação de vento nas entradas das quadras, devido aos afastamentos entre as edificações.

Isso produz melhores condições de permeabilidade e porosidade entre as construções (Figura 4-11). Assim como nas outras simulações, as edificações vizinhas representam barreiras ao fluxo de vento pela formação de sombras de vento. Essa situação pode gerar turbulências na região posterior às construções, dependendo da distância entre as edificações.

Nos planos verticais (Figura 4-11j, m) observa-se interferências no escoamento do vento até aproximadamente 35m de altura, ou seja, próximo ao valor do edifício mais alto localizado na quadra e o comprimento da esteira de vento se formam em função da altura das construções.

No Tabela 4-9, os valores de velocidade do vento são altos quanto comparados a cenários retrospectivo e atual a 45°. Isso se deve aos afastamentos entre as construções, que permitem maior permeabilidade do vento. A sotavento, a velocidade tende a reduzir logo após a construção e cresce à medida que se afasta dos planos próximos as edificações.

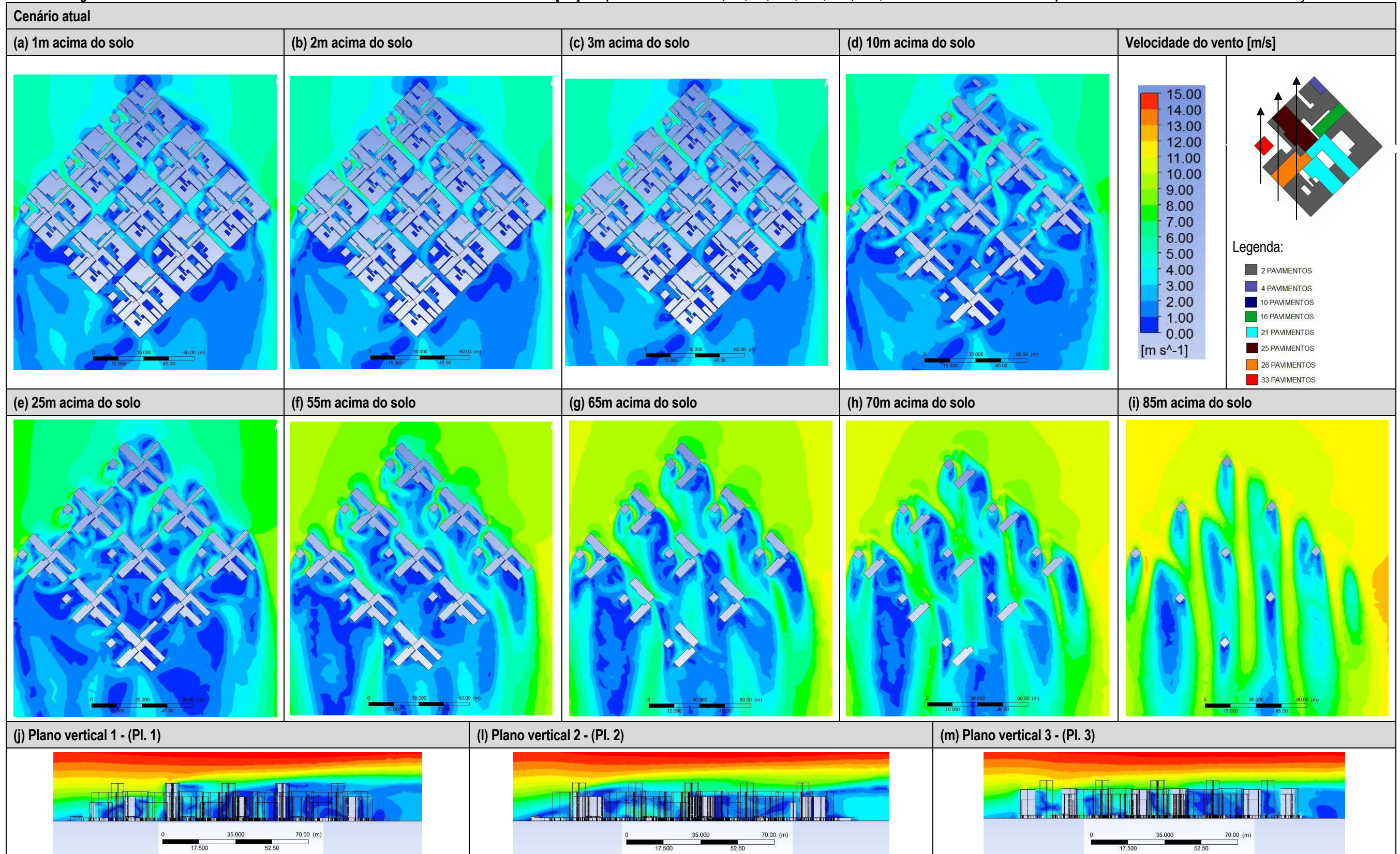
Tabela 4-9 Valores de velocidade de vento [m/s] obtidos a barlavento e sotavento na quadra miolo do cenário prospectivo com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°]

	Plano horizontal (altura)	Velocidade do vento nos pontos a barlavento e a sotavento [m/s]					
		Peld1	Peld2	Peld3	Psld1	Psld2	Psld3
Cenário prospectivo com vento orientado a nordeste/ sudeste [m/s]	2m	3.08	3.42	3.40	0.42	0.77	2.48
	5m	3.31	3.63	3.67	0.40	0.89	2.64
	10m	3.66	4.07	3.98	0.27	1.11	2.75
	20m	2.64	4.49	3.22	0.48	1.45	2.48
	30m	2.38	5.16	1.65	2.24	1.22	1.81
	40m	4.25	5.74	1.58	5.90	0.58	0.77
	50m	5.78	5.68	2.87	7.89	1.06	2.20
	60m	6.79	5.04	3.13	8.21	2.09	4.26
	70m	7.10	7.48	1.70	8.74	3.74	4.75
	80m	7.42	9.38	4.09	9.69	5.66	3.96
	90m	8.73	10.71	7.71	10.13	8.32	5.87
	100m	10.27	11.75	10.43	10.86	11.06	9.49

Fonte: Autora, 2015.

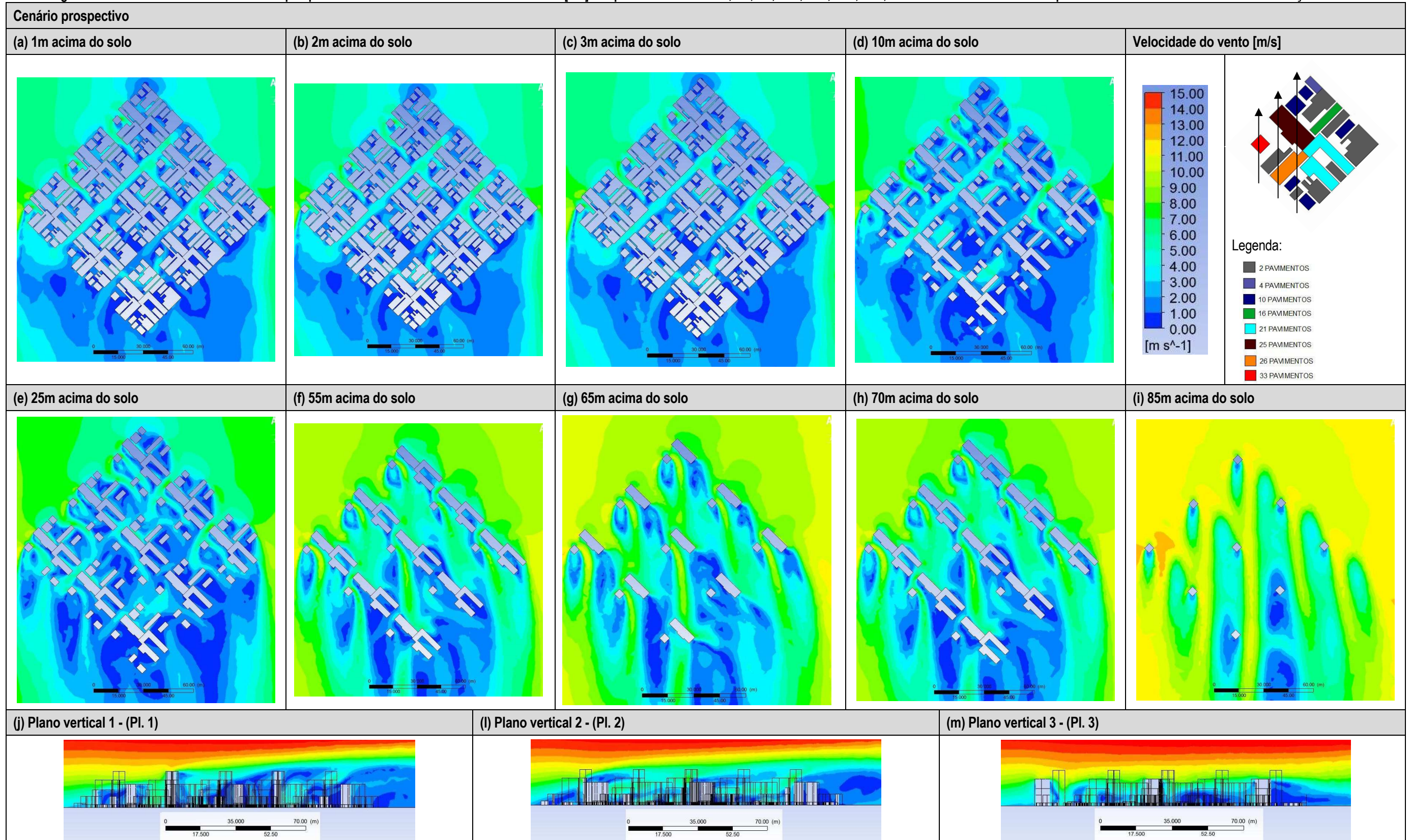
Nota: 'Pb' significa 'Ponto a barlavento' e 'Ps' significa 'Ponto a sotavento'. Os números indicam se é o ponto 1 ou 2 ou 3.

Figura 4-10 Escoamento de vento no cenário atual com vento orientado a nordeste/ sudoeste [45°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte



Fonte: Autora, 2015.

Figura 4-11 Escoamento de vento no cenário prospectivo com vento orientado a nordeste/ sudeste [45°] nos planos horizontais 1m, 2m, 3m, 10m, 25m, 55m, 65m, 70m e 85m/ Planos verticais na quadra miolo com velocidade do vento e indicação de corte



Fonte: Autora, 2015.

4.5 CONCLUSÃO

A partir da análise dos cenários modelados para Belém/PA, conforme os Planos Diretores Urbanos de 1993 e 2008, conclui-se que o adensamento urbano e a redução dos recuos entre as edificações representam as maiores preocupações ao impedimento do escoamento do vento nas quadras simuladas. Essas configurações urbanísticas favorecem a redução da velocidade do vento e do seu potencial de ventilação do espaço urbano.

É importante ressaltar que a verticalização sem recuos adequados dos cenários simulados pode interferir na redução da velocidade de ar nos espaços urbanos. Fazendo uma analogia aos cenários adensados horizontalmente, os cenários verticalizados sem afastamentos seriam como cenários adensados, visto que não possuem afastamentos significativos entre si e fazem uso intenso do solo urbano, através de edificações em uma determinada área. Esse conjunto de características apresentados anteriormente pressupõe uma redução da potencialidade de ventilação e escoamento de ar entre as construções. Por outro lado, os impactos negativos gerados pelos altos gabaritos podem ser contornados ou minimizados, através da aplicação de afastamentos proporcionais as alturas das construções.

Nos cenários retrospectivos, que correspondem ao Plano Diretor e 1993, ocorreu o adensamento horizontal e afastamentos reduzidos entre as construções. Essa condição favorece a redução à ventilação e baixas velocidades de ar entre construções e ruas dos cenários simulados.

Os cenários atuais, referentes à legislação urbanística de 2008, expuseram melhores condições de infiltração e permeabilidade do ar entre as construções do que os cenários retrospectivos, devido aos maiores recuos dos edifícios de maior gabarito.

Por outro lado, o cenário prospectivo, que satisfaz um panorama para daqui a 15 anos, apresentou condições ainda melhores de circulação de ar entre as edificações do que os cenários retrospectivo e atual. Isso aconteceu em função dos afastamentos entre os novos edifícios construídos e a diminuição do adensamento horizontal.

No cenário prospectivo foi inserida maior quantidade de construções verticalizadas, mas as interferências dessas edificações foram minimizadas pelos afastamentos entre as construções. As legislações urbanísticas utilizadas nessa pesquisa, de modo geral, orientam que seja aplicado aumento de recuos quando se eleva o gabarito das construções conforme quadro de modelos urbanísticos. Entretanto, seria necessário um estudo aprofundado para avaliar até quanto às implicações e dimensões desses recuos nas construções podem contribuir para o escoamento de ar e melhoria de potencial de ventilação na área estudada.

Outro aspecto importante é a forma e orientação do edifício em relação à direção do vento, visto que esses aspectos podem potencializar as condições de circulação do ar entre as construções e nas ruas. Isso pôde ser observado no comportamento do escoamento de vento obtido nas simulações orientadas a nordeste/ sudeste (45°). Essas se mostraram superiores quanto à velocidade do vento e potencial de ventilação cruzada, quando comparadas aos cenários orientados a leste (0°).

4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-SALLAL, K. A.; AL-RAIS, L. Outdoor airflow analysis and potential for passive cooling in the modern urban context of Dubai. **Renewable Energy**, 38, p. 40-49, 2012.
- AN, K.; FUNG, J. C. H.; YIM, S. H. L. Sensitivity of inflow boundary conditions on downstream wind and turbulence profiles through buildings obstacles using a CFD approach. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 115, 137-149, 2013.
- ASFOUR, O. S. Prediction of wind environment in different grouping patterns of housing blocks. **Energy and Building**, v. 42, p. 2061-2069, 2010.
- BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 2ª. ed. rev. e ampl. Maceió: Ed. UFAL, 2006.
- BELÉM. Lei 7603/93/ Lei nº 7603 de 13 de janeiro de 1993 de Belém. Belém: 1993. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/legislacao/585164/lei-7603-93-belem-pa>>. Acesso em: 11/04/12.
- BELÉM. Lei nº 8.655, de 30 de julho de 2008. Belém: 2013. Disponível em: <http://www.belem.pa.gov.br/planodiretor/Plano_diretor_atual/Lei_N8655-08_plano_diretor.pdf>. Acesso em: 11/04/12.
- BLOCKEN, B.; CARMELIET, J.; STATHOPOULOS, T. CFD evaluation of the wind speed conditions in passages between buildings-effect of wall-function roughness modifications on the atmospheric boundary layer flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2007.
- BLOCKEN, B.; JANSSEN, W. D.; VAN HOOFF, T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: general decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environment Modelling and Software**, 2012.
- BLOCKEN, B.; PERSON, J. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2009.
- BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. **Atmospheric Environment**, 2007.
- BOTTEMA, M. Towards rules of thumb for wind comfort and air quality. **Atmospheric Environment** 33, 4009- 4017, 1999.
- BRANDÃO, R. S. **As interações espaciais urbanas e o clima**. São Paulo, FAUUSP, 2009. Tese de Doutorado.
- BRASIL. Estatuto da Cidade: Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001, que estabelece diretrizes gerais da política urbana. – Brasília: Câmara dos Deputados, 2001, 1ª edição.

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

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental**. 2a. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Revan, 2009.

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

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLÜNZEN, H.; CARISSIMO, B. **Best Practice Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment**. COST 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models. COST Office Brussels, ISBN 3-00-018312-4, 2007.

FRANKE, J.; HIRSCH, C.; JENSEN, A. G.; KRÜS, H. W.; SCHATZMANN, M.; WESTBURY, P. S.; MILES, S. D.; WISSE, J. A.; WRIGHT, N.G. **Recommendations on the use of CFD in wind engineering**. In: J.P.A.J. van Beek (Ed.), Proceedings of the International Conference on urban Wind Engineering and Building Aerodynamics: COST C14 – Impact of Wind and Storm on City life and Built Environment, Rhode, Saint-Genève, 2004.

GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2ª edição. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/ UFSC, 1998.

Google Maps. Google. Consultado em:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Microrregi%C3%A3o_de_Bel%C3%A9m#mediaviewer/File:Para_Micro_Belem.svg>. Acesso em: 11/11/14.

LEITE, R. C. V. **A influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido**. São Paulo: FAUUSP, Tecnologia da Arquitetura. 2010. Dissertação de mestrado.

LIMA, G. L. F.; OLIVEIRA, A. G.; PEDRINI, A.; ARAÚJO, V. M. D. **Índices de conforto térmico: Revisão e proposta para o clima quente e úmido de Natal/RN**. In: 8º Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Maceió, 2005.

MASCARÓ, L. R. **Luz, clima e arquitetura**. Editora: Universidade de São Paulo, 1978.

NASCIMENTO, C. C. **Clima e morfologia urbana em Belém**. Belém: UFPA, NUMA, 1995. 157p.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gili, 1a edição, 6ª tirada, 2010.

PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. São Paulo: FAUUSP, 2005. Tese de doutorado.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: Validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 408–18, 2012.

REITER, S. Assessing wind comfort in urban planning. **Environment and Planning: Planning and Design** 37, 857-873, 2010.

- RICHARDS, P. J.; ROXEY, R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering model using the k- ϵ turbulence model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 46 e 47, 145-153, 1993.
- ROMERO, M. A. B. **A arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2001.
- SILVA, J. M. H. **Avaliação do efeito de interferência de obstáculos no escoamento atmosférico sobre o mar: caso de estudo da ilha Berlenga**. Universidade de Lisboa, 2013. Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente. Dissertação de mestrado
- SIMÕES, M. R. **Simulação computacional de escoamento turbulento em compressor axial utilizando ferramenta de CFD**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009, p. 51. Dissertação de mestrado.
- TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 37-58, out./dez. 2010.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Programas: Analysis SOL-AR**. Disponível em <<http://www.labeee.ufsc.br/software/software>>. Acesso em: 05/08/13.
- WIERINGA, J. Updating the Davenport roughness classification. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. v. 61, p. 357-368, 1992.
- ZHANG, X. **CFD simulation of neutral ABL flows**. Risø National Laboratory for Sustainable Energy. Technical University of Denmark. Roskilde, Denmark. April 2009.

5. CONCLUSÕES GERAIS DA PESQUISA

Este trabalho teve o objetivo de investigar o uso e aplicação das técnicas CFD para estudo e análise de ventilação urbana por ação dos ventos, utilizando como estudo de caso a cidade de Belém/PA. Para a aplicação das técnicas CFD em estudos de ventilação urbana, foi necessário um conhecimento prévio dos parâmetros de configuração. A importância da investigação desses parâmetros está na influência que possuem nos resultados finais, visto que o desconhecimento destas diretrizes pode conduzir a resultados equivocados. Recorreu-se à literatura já existente sobre o tema como meio de incluir parâmetros já testados por outros autores, contribuindo para a redução de erros e número de simulações computacionais.

Dessa forma, investigaram-se as etapas metodológicas como: as geometrias construídas e as suas simplificações, os tipos e as dimensões do domínio computacional, o perfil de velocidade do vento, a inserção das condições de contorno, o modelo de turbulência adotado, o tratamento das fronteiras sólidas, critério de convergência, além dos tipos e dimensões das malhas aplicadas. Estas etapas foram investigadas individualmente e aplicadas em modelos de quadras com características similares as existentes na região central de Belém/PA.

A aplicação das técnicas CFD nesses modelos de quadras permitiu testar parâmetros indicados pela literatura e a tomada de decisões quanto às melhores soluções para o caso em estudo. A partir da investigação e aplicação das técnicas CFD, pôde-se afirmar que esta ferramenta é muito útil para estudos de escoamento de ar em espaços urbanos. Isto acontece devido o seu potencial para gerar dados qualitativos e quantitativos sobre o escoamento do vento, o que permite a criação de cenários futuros quanto à circulação de ar em espaços urbanos. Além disso, é importante observar a capacidade computacional exigida pelos *softwares* de simulação, pois podem impor limitações computacionais à pesquisa.

Após a etapa de investigação e aferição da ferramenta, partiu-se para a revisão de literatura sobre o tema e a aplicação das configurações investigadas em modelos de quadras existentes. Como resultados, as pesquisas internacionais estão voltadas à investigação de padrões de inserção de dados, aos parâmetros utilizados na modelagem, as implicações dos diferentes tipos de modelos de turbulência e a criação de guias de boas práticas aplicados ao espaço urbano. Nas publicações nacionais, a preocupação principal é utilizar a ferramenta como meio de investigação do escoamento de ar em espaços urbanos, no sentido de predição e investigação dos impactos das possíveis mudanças provocadas no escoamento de ar espaço urbano.

No que diz respeito aos resultados da modelagem computacional das quadras localizados em Belém/PA, através da comparação dos cenários isolado e agrupado, conclui-se que o primeiro

possui melhores condições de circulação de vento quando comparado aos cenários agrupados. Isso se deve às barreiras físicas criadas pelas quadras e que implica na redução da permeabilidade do ar, principalmente em nível de pedestre. Além disso, as quadras orientadas a 45° em relação à ventilação predominante potencializaram a infiltração de ar em nível de pedestre e entre as ruas.

Ademais, o adensamento urbano aliado à redução de afastamentos entre as construções implica em um fator preocupante ao escoamento do vento e seu comportamento nos cenários modelados, pois esta condição possivelmente proporciona redução do potencial de ventilação. Entretanto, as interferências na circulação do vento podem ser minimizadas se houver maiores afastamentos entre as construções, mesmo com a presença de construções de maior gabarito.

Essa pesquisa contribui com a investigação das condições de configuração da ferramenta CFD na modelagem computacional de espaços urbanos e reafirma a importância das legislações urbanísticas para o tecido urbano como meio de intervenção direta nas condições ambientais dos espaços edificados. Além do mais, ratifica o potencial das técnicas CFD e seus resultados quantitativos e qualitativos como enriquecedores a estudos deste gênero, tendo em vista a qualidade dos resultados e facilidade de interpretação e obtenção dos mesmos.

Por outro lado, é importante salientar as dificuldades encontradas por arquitetos e urbanistas, principalmente, no que tange aos conceitos relativos à dinâmica dos fluidos e na decodificação dos termos técnicos aplicados, que são distantes da linguagem técnica da arquitetura e do urbanismo. Essas condições acabam por desestimular esses profissionais a trabalharem com técnicas e programas deste gênero, em pesquisas de cunho urbano ou de projeto arquitetônico, haja vista as dificuldades visualizadas durante o processo de produção das simulações, apreensão dos conhecimentos precedentes e as limitações computacionais que são proporcionais ao porte do estudo.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros baseados nesta pesquisa, no sentido de aprofundá-la ou complementá-la, faz-se as seguintes recomendações:

- Realização de estudos que abordem os conceitos relacionados à dinâmica dos fluidos com ênfase em investigação de escoamento de ar em meio urbano.
- Investigação do fluxo de vento interno nas aberturas dos prédios existentes.
- Realização de testes com aplicação de diferentes afastamentos entre as edificações.
- Consideração da condição de outorga onerosa nos edifícios simulados.

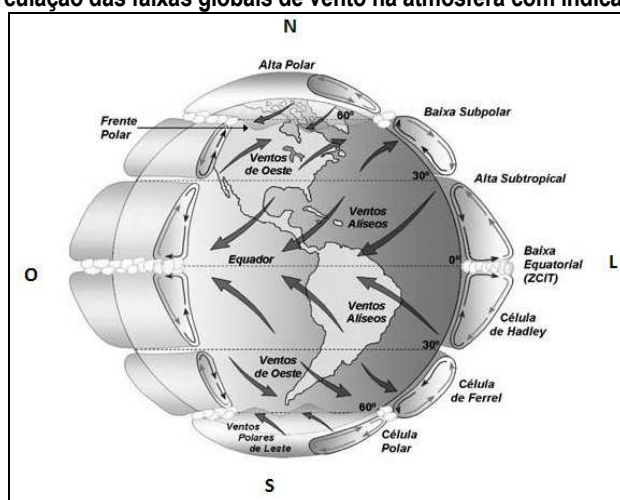
- Análise térmica e luminosa dos modelos simulados.
- Medições instrumentais *in loco* das condições de vento como meio de aferição das simulações computacionais.
- Comparação dos resultados das simulações por meio de outros *softwares*.

ANEXO A - VENTOS: ASPECTOS GERAIS

Segundo Olgay (2010), o vento é gerado pela diferença de temperatura da massa atmosférica provocada pela distribuição desigual de calor na superfície terrestre. Os deslocamentos das pressões atmosféricas são o fator decisivo para estabelecer as direções e características dos ventos. Essa movimentação por diferença de pressão se dá de forma desigual que, por sua vez, deve-se ao movimento de rotação do planeta, ao gradiente de temperatura da Terra e à variação de temperatura das brisas marítimas e continentais (FROTA; SCHIFFER, 2003). Além disso, existe uma força defletida no sentido de rotação da Terra, que faz com que o ar se movimente em sentido horizontal e vertical, chamada de Força de Coriolis (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006).

Cada hemisfério possui zonas de alta e baixa pressão atmosférica. A zona equatorial, Zona de Convergência Intertropical (ZCI) ou baixa equatorial é uma área exposta a maior intensidade de radiação solar devido as suas baixas latitudes. Na ZCI, o ar é aquecido e este tende a se expandir e subir verticalmente, gerando zonas de baixa pressão durante todo o ano (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006). Nas zonas onde se localizam os trópicos de ambos os hemisférios, também chamadas de zonas subtropicais, os raios solares incidem de forma mais tangencial na superfície terrestre. Nessas zonas, há cintos de alta pressão que se deslocam para a zona equatorial no inverno, e no verão migram para as faixas polares. Existem também as zonas polares, que possuem alta pressão o ano inteiro, mas em menor dimensão que as zonas subtropicais (FROTA; SCHIFFER, 2003). Essas zonas geram três faixas globais de vento em cada hemisfério, chamadas de ventos alísios, ventos de oeste e ventos polares (Figura A.1).

Figura A.1 Circulação das faixas globais de vento na atmosfera com indicação dos ventos



Fonte: Lutgens e Tarbuck (1995), adaptado por Martins, Guarnieri e Pereira (2008).

Os ventos alísios se originam nas faixas subtropicais de alta pressão entre as latitudes 30° e 35° dos dois hemisférios. Quanto aos ventos de oeste, estes acontecem entre as latitudes de 30° a 60° para os dois hemisférios, originando-se nas regiões subtropicais e deslocando-se para as regiões subárticas. No que diz respeito aos ventos polares, estes se localizam nas latitudes de 60° até os polos norte e sul, e originam-se nas regiões polares e árticas que possuem alta pressão (FROTA; SCHIFFER, 2003).

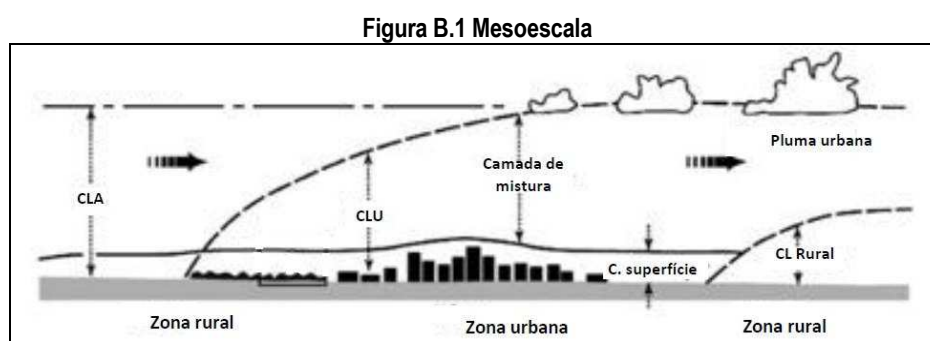
Outros fatores relacionados às características locais podem alterar o vento, como as brisas marítima e terrestre. Estas últimas acontecem em regiões litorâneas por diferença de temperatura entre o mar e a superfície terrestre, devido ao calor específico de ambas. A brisa marítima ocorre devido ao aquecimento durante o dia da massa de ar do solo, criando uma zona de baixa pressão, que é preenchida por ar frio do mar (alta pressão). O processo inverso chama-se brisa terrestre, onde a massa d'água à noite, aquecida por ter recebido energia térmica durante o dia, fica menos densa (baixa pressão), permitindo que a massa de ar do solo que está mais fria, desloque-se e ocupe esse espaço vazio (FROTA; SCHIFFER, 2003). Além dos escoamentos atmosféricos, outros fatores em escala urbana são atuantes na alteração da ventilação urbana como: morfologia e tipologia das massas urbanas, porosidade, rugosidade, entre outros.

ANEXO B - ESCALAS CLIMÁTICAS

As escalas climáticas representam um importante recurso para distinguir e investigar o clima urbano. Desenvolvida por Oke (1996), elas propõem uma estrutura em âmbito horizontal e vertical que permite investigar tridimensionalmente os fenômenos climáticos urbanos. No contexto do presente trabalho, interessam as escalas horizontal e vertical. As escalas horizontais são representadas por 'Mesoescala', 'Escala local' e 'Microescala', e possuem relação direta com as diferenças de temperatura. As escalas verticais são divididas em 'Camada intraurbana' ou 'Escala de cobertura urbana' e 'Camada limite urbana', que estão relacionadas aos perfis de temperatura. A seguir estão descritas as características de cada.

- Mesoescala

A 'Mesoescala' corresponde à escala da cidade e pode chegar a dezenas de quilômetros (BARBIRATO; SOUZA; TORRES, 2007). Nessa escala, os dados climáticos como velocidade do ar, umidade do ar, temperatura, entre outros, descrevem as condições gerais do clima para a região, a partir de dados obtidos em estações meteorológicas (Figura B.1).



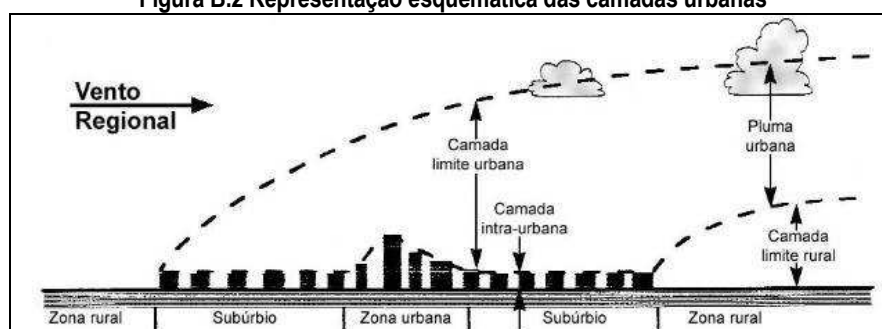
Fonte: Silva (2014, p. 25), adaptado de Oke (1997, *apud* OKE, 2006).

Na mesoescala, pode-se identificar a Camada Limite Atmosférica (CLA), também conhecida como Camada Limite Planetária (CLP), que se localiza na porção mais baixa da atmosfera e tem seu comportamento influenciado pela superfície terrestre (ZHANG, 2009). A CLA é dividida em outras duas camadas conhecidas como: 'Camada limite urbana'¹¹ e 'Camada intraurbana'¹² (Figura B.2).

¹¹ Tradução da expressão *Urban Boundary Layer*.

¹² Tradução da expressão *Urban Canopy Layer*.

Figura B.2 Representação esquemática das camadas urbanas



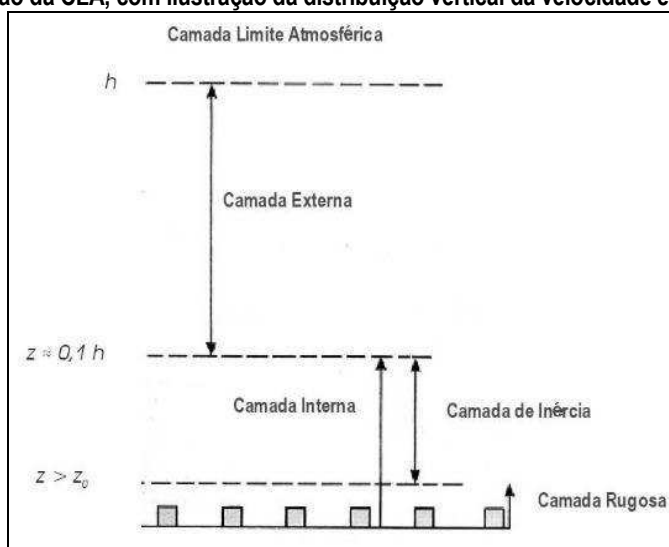
Fonte: Oke (1987), adaptado por Leite (2008, p. 70).

A camada limite urbana refere-se à escala mesoclimática. Portanto envolve fenômenos locais e regionais. Compreende a camada acima das coberturas e é influenciada pela presença da zona urbana em seu interior, sendo importante para estudos de ventilação natural. O perfil de velocidade vertical do vento é alterado pela rugosidade; assim, a velocidade do ar é reduzida devido ao contato com as superfícies rugosas das áreas urbanas (BROWN; DEKAY, 2004). A camada intraurbana é referente ao nível microclimático e compreende os fenômenos que acontecem desde o solo até o nível do telhado das edificações. Compreende o ar contido entre os elementos rugosos (principalmente edifícios), sendo influenciado pela topografia, materiais e geometria das imediações (OKE, 1976). Portanto, sofre interferência direta das construções e da malha urbana.

Em condições de estabilidade neutra¹³, a CLA pode ser dividida em duas partes verticais, conforme ilustrado na figura abaixo. A 'Camada de Ekman' ou 'Camada externa', que pode atingir uma altura superior a 1000m. E a parte mais baixa, conhecida como 'Camada de superfície' ou 'Camada interna', onde a turbulência está completamente desenvolvida; o seu alcance vertical pode variar de 20 a 100m, dependendo das estratificações térmicas do ar. Essa última camada pode se dividir em mais duas subcamadas: a de 'inércia' e a 'rugosa', respectivamente. A 'camada de inércia' ou 'subcamada inercial' apresenta perfil de velocidade logarítmica em condições de estabilidade neutra e a 'camada rugosa' ou 'subcamada rugosa' está sob influência de elementos construídos existentes na superfície terrestre, provocando vórtices ou turbilhões nessa região (GARRAT, 2004 *apud* PRATA, 2005) (Figura B.3).

¹³ “[...] considera-se a atmosfera neutra quando a variação de temperatura entre dois pontos, e a alturas diferentes na atmosfera, for a mesma que se verifica na massa de ar que se desloca entre dois pontos” (SARAIVA, 1983 *apud* PRATA, 2005, p. 12).

Figura B.3 Subdivisão da CLA, com ilustração da distribuição vertical da velocidade em estabilidade neutra

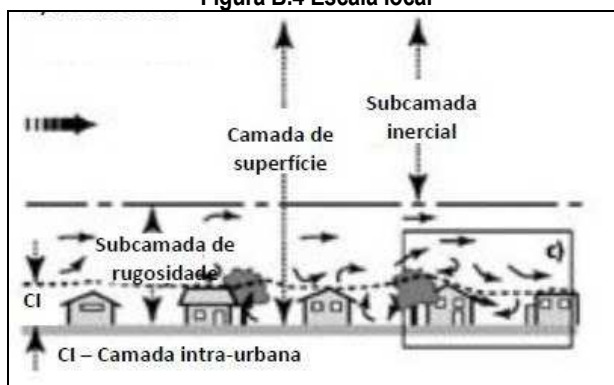


Fonte: Silva (2014, p. 23), adaptado de Garrat (1994).

- Escala local

A 'Escala local' varia de um a vários quilômetros, sendo perceptíveis as alterações climáticas. Os elementos locais são da ordem de grandeza de quadras ou distritos. Essa escala diz respeito à densidade e tipo de ocupações do solo, e as influências na escala no nível de pedestres não são nitidamente perceptíveis (BRANDÃO, 2009). (Figura B.4).

Figura B.4 Escala local

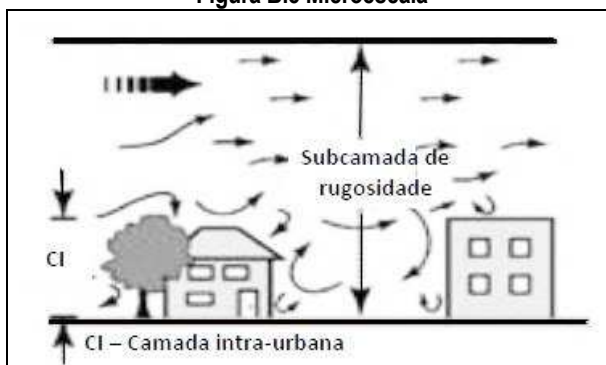


Fonte: Silva (2014, p. 26), adaptado de Oke (1997, apud OKE, 2006).

- Microescala

Na 'Microescala', os climas urbanos são influenciados pelas superfícies e objetos no entorno imediato, variando em distâncias muito pequenas. Nesta escala são definidas as condições climáticas dos recintos urbanos, que influenciam no desempenho de edificações e na sensação térmica dos pedestres. Essa escala corresponde à influência de prédios (afastamentos e gabarito), árvores, vias urbanas, jardins etc. (BRANDÃO, 2009) (Figura B.5).

Figura B.5 Microescala

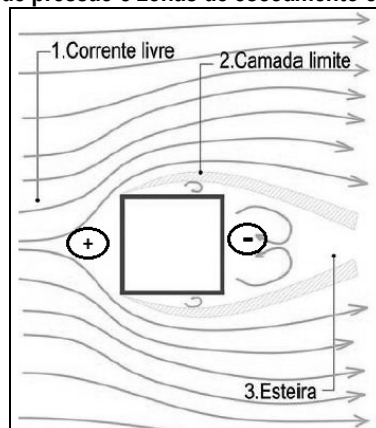


Fonte: Silva (2014, p. 26), adaptado de Oke (1997, *apud* OKE, 2006).

ANEXO C - VENTILAÇÃO NATURAL URBANA POR AÇÃO DOS VENTOS

A ventilação natural por ação dos ventos é o resultado da diferença de pressão atmosférica local inserida em uma edificação ou em um conjunto edificado. Quando um edifício está exposto ao vento incidente, criam-se zonas de pressões positivas e altas velocidades em sua região frontal (barlavento), enquanto a outra face, que está na região posterior à face frontal, fica sujeita a baixas velocidades e efeito de sucção (FROTA; SCHIFFER, 2003). O escoamento de ar em torno de edificações gera três zonas conhecidas como: corrente livre, camada limite e a esteira (Figura C.1).

Figura C.1 Campos de pressão e zonas de escoamento em torno de um sólido



Fonte: Bittencourt e Cândido (2006, p. 140).

- Corrente livre: corresponde ao vento incidente na geometria;
- Camada limite: surge devido ao encontro da corrente livre com a aresta da edificação, criando uma zona de recirculação do vento. Seu escoamento pode ser laminar ou turbulento, variando em função da forma geométrica da edificação. Em situações de escoamento laminar, o fluido escoar de forma ordenada, com camadas que se assemelham a lâminas. Por outro lado, quando turbulento, o escoamento é caracterizado por ser altamente desordenado. A transição do escoamento laminar para o turbulento depende da relação entre as forças inerciais e viscosas (ÇENGEL; CIMBALA, 2007);
- Esteira ou sombra de vento: corresponde à área posterior a incidência de vento e é gerada pela recirculação do fluxo advindo da camada limite. Nesta área, o fluxo é turbulento e apresenta vórtices e refluxos de baixa velocidade.

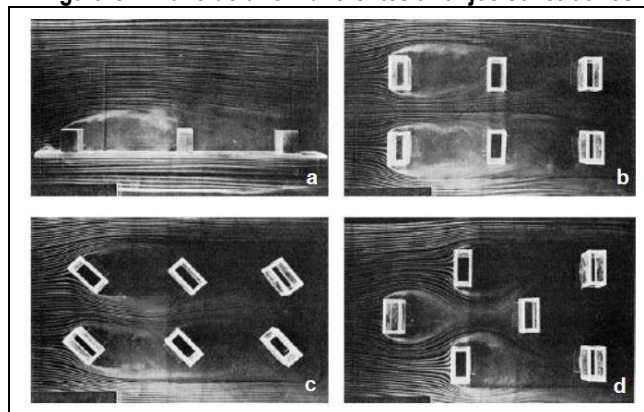
Em áreas urbanas adensadas, a sombra de vento é consideravelmente influenciada pela forma, disposição dos arranjos construtivos e índices urbanísticos (afastamentos, gabaritos e uso do solo). Dessa forma, pode ser benéfica, se bem contornada, ou prejudicial, provocando redução de velocidade de vento em locais indesejados e/ou fluxos turbulentos em nível de pedestre.

- Porosidade urbana

Porosidade é a permeabilidade do tecido urbano ao escoamento do vento. Esta é adquirida por meio de afastamentos entre as construções, diversificação de gabaritos e uso do solo. Esses mecanismos podem reduzir ou aumentar a permeabilidade do ar no espaço urbano (BARBIRATO; SOUZA; TORRES, 2007). Isto será determinado pelas formas urbanas, disposição dos edifícios, altura das edificações, largura das vias urbanas, topografia urbana, disponibilidade de espaços abertos, entre outros.

Em pesquisa desenvolvida por Olgay (2010), constatou-se através de experimentos com arranjos das construções em diferentes disposições, que é possível ter melhor aproveitamento do vento com o arranjo escalonado (tabuleiro de xadrez) (Figura d) em relação ao arranjo em malha ortogonal normal (em grelha) (Figura b). Segundo o pesquisador, este modelo traz melhores resultados para a redução da sombra de vento, pois o fluxo de ar desloca-se para os lados quando encontra obstáculos. Em seguida, considera melhor o modelo em malha ortogonal, e por último, o arranjo em tabuleiro de xadrez com inclinação de 45° (Figura C.2).

Figura C.2 Fluxo do ar em diferentes arranjos construtivos



Fonte: Olgay (2010, p. 101).

Quanto à circulação do vento entre edificações, Lee, Hussain e Soliman (1980) investigaram a interferência que diferentes distanciamentos entre construções podem exercer sob o fluxo de ar. Como resultados, os autores estabeleceram três regimes de circulação de ar. São eles:

- Rugosidade isolada: consiste em um amplo espaçamento entre as construções (E_c), sendo maior que a soma das regiões de separação, que são os espaços a sotavento (E_s) e a barlavento (E_b).

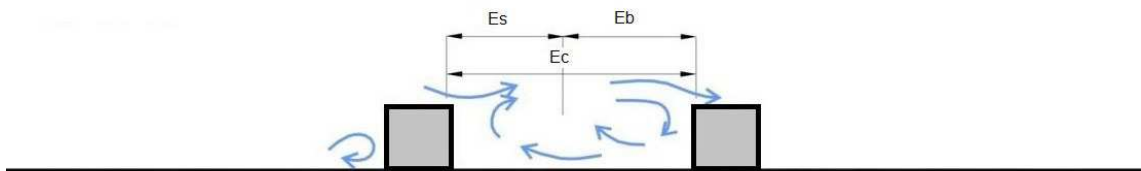
Figura C.3 Rugosidade Isolada ($E_c > E_s + E_b$)



Fonte: Lee, Hussain e Solliman (1980), adaptado por Bittencourt e Cândido (2006, p. 48).

- Interferência de esteira: o espaço entre os edifícios (E_c) é menor que a soma do espaço a barlavento (E_b) e a sotavento (E_s) denominado de (E_t). Esta situação influencia o desenvolvimento completo do fluxo nessas regiões, mas esse espaçamento ainda não produz vórtices estáveis.

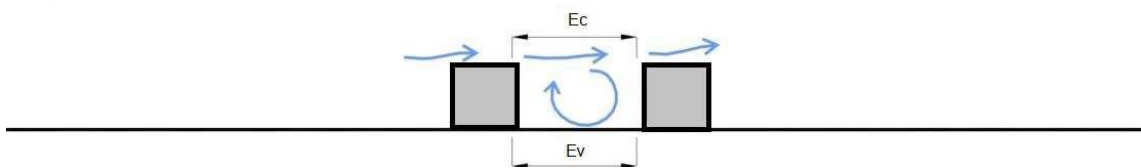
Figura C.4 Interferência de esteira ($E_v < E_c < E_t$)



Fonte: Lee, Hussain e Solliman (1980), adaptado por Bittencourt e Cândido (2006, p. 48).

- Zona de recirculação do ar: o espaço entre as construções é menor que o mínimo necessário para criar vórtices estáveis. Assim, o fluxo desliza sob as coberturas das edificações e cria uma zona de estagnação de ar.

Figura C.5 Zona de recirculação do ar ($E_c < E_v$)



Fonte: Lee, Hussain e Solliman (1980), adaptado por Bittencourt e Cândido (2006, p. 48).

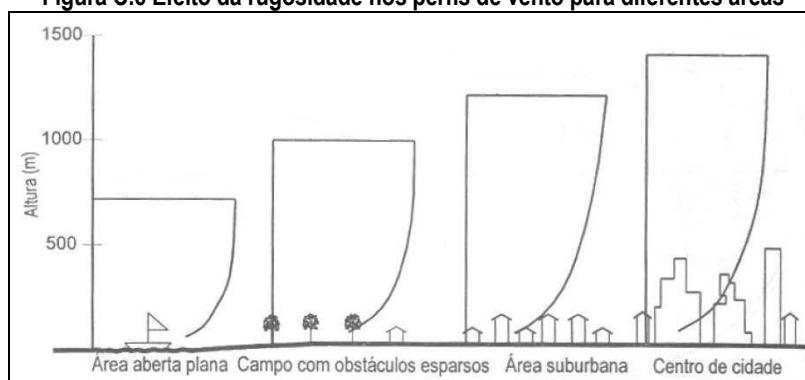
Pode-se concluir que edifícios mais afastados geram melhores situações de movimento do ar, pois esses distanciamentos potencializam condições de porosidade no espaço urbano. Por outro lado, se o adensamento for realizado aplicando-se gabaritos altos e edificações afastadas entre si, o potencial de ventilação pode apresentar resultados mais satisfatórios do que se fossem utilizados edifícios de menor gabarito e mais próximos entre si. Do ponto de vista de espaço urbanizado, estas informações reforçam a importância da aplicação de recuos progressivos e menor coeficiente de aproveitamento do solo como estratégia legal mais eficaz do que a limitação de gabarito para potencializar o escoamento do ar em meio urbano (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006).

- Rugosidade urbana e perfil de vento

Em meio urbano, a velocidade do vento tende a ser freada pela força de atrito das superfícies, principalmente próximo ao piso, caracterizando a rugosidade urbana (BROWN; DEKAY, 2004). Esta situação provoca a frenagem da camada de ar em contato com a superfície, fazendo com que a camada de ar adjacente, também reduza a sua velocidade e isto aconteça com as próximas

camadas, gerando um perfil de velocidade do vento em função desta superfície. A rugosidade do solo e o perfil de velocidade do vento estão intrinsecamente ligados, pois quanto maior a condição de atrito, ou seja, a condição de não escorregamento, menor será a velocidade de deslocamento de massa de ar, principalmente no nível do solo. As alterações da velocidade do vento diante da rugosidade do solo produzem variação do perfil de velocidade do vento em relação à altura, considerando-se a velocidade do ar medida em estação meteorológica (MARQUES, 2003) (Ver Figura C.6).

Figura C.6 Efeito da rugosidade nos perfis de vento para diferentes áreas



Fonte: Jackman (1980), adaptado por Bittencourt e Cândido (2006, p. 34).

Comumente os dados de velocidade do ar advêm de estações meteorológicas próximas a aeroportos, localizadas a 10m de altura em relação ao solo, e possuem padrões de rugosidade diferentes dos obtidos em zonas adensadas, pois as áreas próximas a aeroportos são mais desimpedidas de obstáculos físicos. Para que seja possível utilizar esses dados em determinado sítio, é necessário fazer um ajuste das velocidades em função da rugosidade (BROWN; DEKAY, 2004).

A Equação A.1 pode ser utilizada para cálculo do perfil de entrada da velocidade média vertical do vento [U] (RAMPONI; BLOCKEN, 2012). Esta equação permite calcular a velocidade do vento para diferentes alturas, considerando-se a rugosidade do terreno.

$$U = \frac{u_*}{K} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad [A. 1]$$

sendo:

U = velocidade média do vento na altura z [m/s];

u^* = velocidade de atrito [m/s];

K = constante de von Kármán [≈ 0.4];

z = altura em relação ao solo [m];

z_0 = comprimento de rugosidade aerodinâmica [m], tendo seu valor definido em função das características do terreno (Tabela C.1).

Tabela C.1 Classificação de rugosidades Davenport

Tipo de superfície	z_0 [cm]	Tipo de superfície	z_0 [cm]
Superfície do mar	0,02	Campo de arbustos	35 - 45
Deserto plano; cimento	0,02 - 0,05	Pinhal	80 - 160
Campo de neve plano	0,01 - 0,07	Floresta tropical	170 - 230
Erva cortada	0,1 - 1	Casas dispersas	20 - 40
Erva, estepe	1 - 4	Subúrbios densos "baixos"	80 - 120
Campo arado	2 - 3	Cidade	70 - 120
Erva alta	4 - 10	Centro de cidade (edifícios altos)	200 - 300
Campo de cereal	10 - 30		

Fonte: Wieringa (1992), adaptado por Silva (2013).

Onde a velocidade de atrito [u^*] é determinada pela Equação A.2:

$$u^* = \frac{k \cdot U_h}{\ln\left(\frac{h + z_0}{z_0}\right)} \quad [A. 2]$$

sendo:

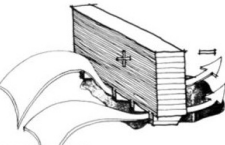
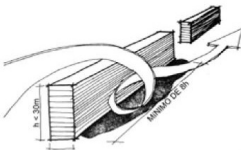
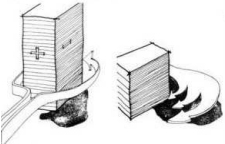
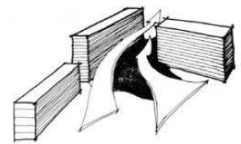
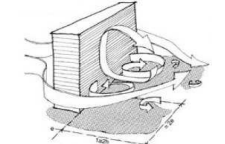
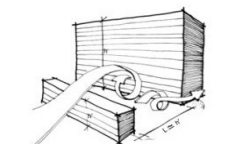
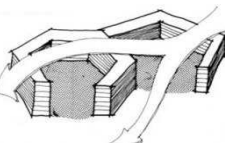
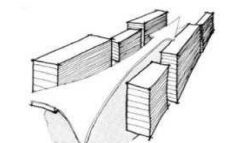
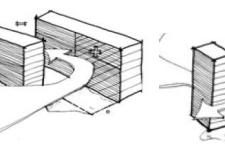

U_h = velocidade especificada para a altura de referencia dada por h .

- Efeito aerodinâmico do vento no entorno de edificações

A diferença de pressão é extremamente influenciada pela forma da edificação, disposição do conjunto de edificações e direção do vento. Esses fatores interferem diretamente no escoamento e potencial de ventilação natural nos espaços edificados. Pode ser observado que quanto maior as dimensões das edificações (principalmente a altura), quando orientadas em relação ao vento, maior será o fluxo de ar gerado (GANDEMER, 1978).

Estudos realizados em túnel de vento por Gandemer (1978) estabeleceram uma classificação dos efeitos aerodinâmicos do vento em torno de edificações. No estudo, o autor fala da relação entre os padrões de fluxo de ar no nível da rua, quando em interação com os grupos de edifícios (forma, tamanho, altura, distribuição), e o vento (distribuição de velocidade média conforme altura, turbulência). A seguir, é apresentada a Quadro C.1, com definição do tipo de efeito gerado, definição, características, relações, figura dos efeitos aerodinâmicos.


Quadro C.1 Efeitos aerodinâmicos do vento no entorno de edifícios

Efeito	Definição	Características/ Relações	Figura	Efeito	Definição	Características/ Relações	Figura
Efeito pilotis (1) (2) (3)	Escoamento através de pilotis que ligam as áreas em pressão positiva e negativa	Entrada de ar difusa, saída localizada/ $H \geq 15m$		Efeito barreira (1) (2) (3)	Desvio em espiral do escoamento, ao cruzar um edifício com ângulo de incidência de cerca de 45°	Zona de turbulência incômoda na parte posterior central do edifício. O efeito ocorre em edifícios com formas mais alongadas/ $h < 25m$ e $\geq 8h$; $d \leq h$; o efeito persiste por cerca de 2h	
Efeito de canto ou esquina (1) (2) (3)	Escoamento nos ângulos do edifício	Gradiente horizontal elevado e desconfortável para o pedestre. Quanto mais alto o edifício, maior o efeito/ $h \geq 15m$, para edifícios isolados; $h \geq 30m$, para conjuntos de edifícios		Efeito Venturi (1) (2) (3)	Um coletor formado pela disposição dos edifícios faz um ângulo aberto ao vento	Saída em jato, muito incômoda na área de estrangulamento/ $h > 15m$; $c_1 + c_2 = 100m$	
Efeito de esteira (1) (3)	Circulação em turbilhão atrás do edifício	Zona de turbulência incômoda na parte posterior do edifício/ $15m \leq h \leq 35m$, o efeito persiste por cerca de 4h		Efeito de redemoinho ou wise (1) (3)	Rolo turbilhonar ao pé da face do edifício exposta ao entorno	Zona de turbulência incômoda ao pé do edifício. O efeito é reforçado pela presença de um edifício mais baixo ($10 \leq h \leq 15m$), à frente efeito wise/ $h \geq 15m$	
Efeito de malha (1) (3)	Escoamento através de um arranjo de edifícios que forma pátios centrais ou bolsões	O pátio central pode ser protegido do vento ou, ventilado/ $h > e$; $b \leq P/4$; $S/ h^2 \leq 10$ para $15m \leq h \leq 25m$ (efeito de proteção)		Efeito de canalização (1) (2) (3)	Escoamento por um conjunto construído que forma um corredor aberto	Não é, por si só, causa de incômodo, a não ser quando associado a outro efeito ou quando a velocidade do vento é muito grande/ $h \geq 6m$; $d' < 2h$	
Efeito união de zonas de pressão diferentes (1) (3)	Escoamento entre zonas de pressão diferentes formadas pela disposição de edifícios paralelos	Influência preponderante da altura dos edifícios provoca alteração na direção do vento/ $H \geq 15m$; $d' \leq h$; $a \geq h$; para $h > 100m$, $d' = e/4$		Efeito pirâmide (1) (3)	Escoamento através de um conjunto de edificações destacado e de forma piramidal	Esta forma dissipa o máximo da energia eólica, em qualquer direção do vento. Alta turbulência/ Áreas críticas são os cantos dos edifícios e os terraços ou varandas	

Observações: h - altura média do edifício ou conjunto de edifícios; e - largura do edifício; c - comprimento total dos edifícios alinhados ou do edifício; d - distância entre edifícios alinhados; d' distância entre edifícios paralelos; a - diferença de comprimento entre dois edifícios paralelos; b comprimento da abertura do pátio; P - perímetro da malha; S - área do pátio central" (SILVA, 2014, p. 31).

Fontes: (1) Gandemer (1978); (2) Romero (2000) e (3) Silva (2014), adaptado de Assis e Valadares (1995).

ANEXO D - ESCALA DE BEAUFORT

Termos da escala	Velocidade do vento em nós	Descrição	Símbolo meteorológico	Aspecto do mar	Altura da Vaga (metros)
0	0 - 1	Calma		Mar de azeite	0
1	1 - 3	Aragem		Rugas na água em forma de escamas, sem cristas de espuma	0 - 0.10
2	4 - 6	Fraco		Pequenas vagas curtas mas marcadas; cristas translúcidas, mas não rebentam	0.10 - 0.25
3	7 - 10	Bonançoso		Pequenas vagas mais alongadas, as cristas começam a rebentar, espuma vítrea; alguns carneiros	0.25 - 1.0
4	11 - 16	Moderado		Pequenas vagas alongadas, mais carneirada	1.0 - 1.50
5	17 - 21	V. Fresco		Vagas médias de forma alongada, aumenta a carneirada	1.50 - 2.50
6	22 - 27	Muito Fresco (Frescalhão)		Vagas grandes em formação; cristas espumantes com ronciana	2.50 - 4.0
7	28 - 33	Forte		As vagas acumulam-se a espuma alonga-se em fieiros esbranquiçados na direcção do vento	4.0 - 5.50
8	34 - 40	Muito Forte (Muito Rijo)		Vagas medianamente altas mas compridas; as cristas rebentam em turbilhão, a espuma estende-se em fieiros nítidos na direcção do vento	5.50 - 7.50
9	41 - 47	Tempestuoso		Vagas altas, fieiros densos, o mar enrola, a ronciana diminui, por vezes, a visibilidade	7.5 - 10.0
10	48 - 55	Temporal		Vagas muito altas, de cristas compridas e pendentes, ronciana em lençóis estirados em faixas brancas, superfície da água esbranquiçada, o rolo é violento e caótico, má visibilidade	10.0 - 12.0
11	56 - 63	Temporal Desfeito		Vagas excepcionalmente altas, mar coberto de faixas de espuma, os picos das cristas são poeira de água, má visibilidade	12.0 - 16.0
12	> 64	Furacão		O ar está saturado de espuma e ronciana, mar completamente branco, péssima visibilidade	> 16.0

Fonte: <<http://www.aquaseg.ufsc.br/sobre/escala-beaufort/>>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DOS ANEXOS

ASSIS, E. S.; VALADARES, V. M. **Ventilação natural: experiência de ensino em graduação na Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais**. III Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Gramado, 1995.

_____. **Aerodinâmica dos edifícios altos: características do escoamento e resposta a turbulência de formas prismáticas**. Tese para o concurso de especialista do LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Núcleo de Dinâmica Aplicada, Proc. 36/11/7367, Lisboa, Portugal, 1983, p. 23 a 47.

BARBIRATO, G. M.; SOUZA, L. C.; TORRES, S. C. **Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos**. Ed.: UFAL, 2007.

BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 2a. ed. rev. e ampl. Maceió: Ed. UFAL, 2006.

BRANDÃO, R. S. **As interações espaciais urbanas e o clima**. São Paulo, FAUUSP, 2009. Tese de doutorado.

BROWN, G. Z.; DEKAY, M. **Sol, vento e luz: estratégias para o projeto de arquitetura**. 2. Ed., Porto Alegre: Bookman, 2004.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. Ed. Bookman, 2007.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de conforto térmico**. São Paulo, Studio Nobel, 2001.

GANDEMER, J. **Discomfort due to wind near buildings: aerodynamic concepts**. Building research translation. Centre Scientific et Technique du Bâtiment Paris, France. Issued March 1978.

GARRAT, J. R. **The atmospheric boundary layer**. Cambridge University Press: 316, 1994.

JACKMAN, P. J. Natural ventilation principles in design. In: Symposium on Natural ventilation by Design, 2nd December 1980. The Chartered Institution of Building Services, Garston. **Proceeds...** Garston: 1980.

LEE, B. E.; HUSSAIN, M.; SOLLIMAN, B. Predicting natural ventilation forces upon low-rise building. In: **ASHARE Journal**, February, 1980, p. 35-39.

LEITE, C. G. **Alterações na ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da avenida litorânea de São Luís/MA**. São Paulo, FAUUSP, 2008. Dissertação de mestrado

LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J. **The Atmosphere: An introduction to meteorology** (Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1995), 6th ed.

MARQUES, R. S. **Ventilação e prescrições urbanísticas: uma aplicação simulada para a orla da praia do Meio em Natal/ RN**. Natal: UFRN, PPGAU, 2003. Dissertação de Mestrado.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 1, 1304 (2008).

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gili, 1ª edição, 6ª tirada, 2010.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2 ed. New York: Methuen, 1996.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2 ed. New York: Methuen, 1987.

OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, Report n° 81, n° 1250. Canadá: WMO/TD, 2006.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. **Atmosphere**, 14, issue 4, 1976.

PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. São Paulo: FAUUSP, 2005. Tese de doutorado.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: Validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 408–18, 2012.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. Editora: CopyMarket, 2000.

SILVA, F. T. **Conforto térmico do transeunte: a porosidade urbana como condicionante da ventilação**. Vitória: UFES/ PPGAU, 2014. Dissertação de mestrado.

SILVA, J. M. H. **Avaliação do efeito de interferência de obstáculos no escoamento atmosférico sobre o mar: caso de estudo da ilha Berlenga**. Universidade de Lisboa, 2013. Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente. Dissertação de mestrado

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Laboratório de Estudos em Direito Aquaviário e Ciência da Navegação: Escala Beaufort**. Disponível em: <<http://www.aquaseg.ufsc.br/sobre/escala-beaufort/>>. Acesso em: 15/10/15.

WIERINGA, J. Updating the Davenport roughness classification. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. v. 61, p. 357-368, 1992.

ZHANG, X. **CFD simulation of neutral ABL flows**. Risø National Laboratory for Sustainable Energy. Technical University of Denmark. Roskilde, Denmark. April, 2009.