

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO DE SÃO CARLOS (IAU-USP)

MICHELE MARTA ROSSI

DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO: AVALIAÇÃO DO IMPACTO NO DESEMPENHO DA
VENTILAÇÃO NATURAL

São Carlos

2018

MICHELE MARTA ROSSI

Dispositivos de sombreamento: avaliação do impacto no desempenho da ventilação natural

Memorial de qualificação apresentado à Comissão Examinadora, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, IAU-USP.

Área de concentração: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Karin M. S. Chvatal

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Alessandra R. Prata Shimomura

Apoio: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

São Carlos

2018

RESUMO

ROSSI, Michele Marta. **Dispositivos de sombreamento: avaliação do impacto no desempenho da ventilação natural**. 2018. 159f. Memorial de qualificação de doutorado – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

As graves questões ambientais, a escassez das fontes energéticas e as mudanças climáticas enfatizam aos profissionais projetistas a importância da adoção de estratégias de condicionamento passivas em projetos arquitetônicos. Em climas quentes e úmidos, predominantes em grande parte do território brasileiro, a combinação de estratégias de ventilação natural e de sombreamento das aberturas pode contribuir significativamente para a redução do condicionamento artificial e, conseqüentemente, do consumo energético nas edificações. Contudo, apesar da importância do uso de dispositivos de sombreamento, poucos estudos investigam o impacto do seu uso no desempenho da ventilação natural. Deste modo, este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto das características projetuais de diferentes dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural em um modelo genérico, através da distribuição de pressão na envoltória do modelo. As ferramentas metodológicas para se atingir tal objetivo consistem em: (a) ensaios experimentais em túnel de vento de camada limite atmosférica e; (b) simulações numéricas em um programa baseado na dinâmica dos fluidos computacional [*Computational Fluid Dynamics* - CFD], o Ansys CFX®. A definição da ordem de grandeza do impacto destes elementos no parâmetro motriz da ventilação natural será uma importante contribuição para a comunidade acadêmica e também para os projetistas que, por meio de simulações computacionais, avaliam o desempenho termoenergético e o comportamento fluidodinâmico de edificações.

Palavras-chave: Ventilação natural. Dispositivos de sombreamento. Túnel de vento. CFD. Modelo genérico.

ABSTRACT

ROSSI, Michele Marta. **Shading devices: assessment of the impact on natural ventilation**. 2018. 159f. Memorial de qualificação de doutorado – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

The serious environmental issues, the scarcity of energy resources and the climatic changes emphasize to professional designers, the importance of adopting passive conditioning strategies in architectural projects. In hot and humid climates, predominant in the Brazilian territory, the combination of natural ventilation strategies and shading openings can significantly contribute to reducing artificial conditioning and, consequently, energy consumption in buildings. However, despite the importance of using shading devices, few studies investigate the impact of their use on the performance of natural ventilation. Thus, this work aims to evaluate the impact of the design characteristics of different shading devices on the performance of natural ventilation in a generic model, by pressure distribution on the model's envelope. The methodological tools to reach this objective consist of: (a) experimental wind tunnel trials; (b) numerical simulations in a program based on Computational Fluid Dynamics (CFD), Ansys CFX®. The definition of the order of magnitude of the impact of these elements on the driving parameter of natural ventilation will be an important contribution to the academic community, as well as to designers who evaluate, based on computational simulations, the thermoenergetic performance and fluid dynamic behavior of buildings.

Keywords: Natural ventilation. Shading devices. Wind tunnel. Computational Fluid Dynamics – CFD. Generic model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 e Figura 2: Fotos do modelo de habitação de interesse social (pesquisa do mestrando Héctor Castaño) ensaiados no túnel de vento do IPT-São Paulo.....	38
Figura 3: Estrutura preliminar da tese.....	51
Figura 4: Influência das características do terreno no perfil de vento local.	55
Figura 5: Distribuição de pressão na envoltória da edificação decorrente da ação mecânica do vento.	56
Figura 6: Mesa d'água.....	62
Figura 7: Visualização analógica do fluxo de ar a partir de ensaios experimentais de modelo reduzido em mesa d'água.....	62
Figura 8: Túnel de vento de camada limite atmosférica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo [IPT].	63
Figura 9: Instalação dos tubos plásticos nas orifícios da maquete para aferição da pressão estática nos respectivos pontos.	65
Figura 10: <i>Scanner</i> de pressão com vários canais.....	65
Figura 11: Definição do domínio.....	66
Figura 12: Discretização da malha.	66
Figura 13: Exemplo de visualização gráfica dos resultados fornecida por um <i>software</i> CFD.....	67
Figura 14: Exemplo de visualização gráfica dos resultados fornecida por um <i>software</i> CFD.....	68
Figura 15: Matriz de ensaios para avaliação da influência da variação da profundidade e do espaçamento de protetores solares verticais em uma sala de aula padrão.	71
Figura 16: Matriz de ensaios para avaliação da influência da variação da profundidade e do espaçamento de protetores solares horizontais em uma sala de aula padrão.	72
Figura 17: Filtro Sol - Ar	72
Figura 18: Casos avaliados por Castaño (2017).	74
Figura 19: Impactos na distribuição de pressão, renovações de ar, temperaturas internas e conforto térmico correspondentes aos casos analisados por Castaño (2017).	75

Figura 20: Análise da influência de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento na velocidade média do ar.....	76
Figura 21: Modelo analisado por Chand, Bhargava e Krishak (1998).....	77
Figura 22: Tipologias das telas de sombreamento e das esquadrias avaliadas por Hildebrand (2012). 79	
Figura 23: Esquema geral do método.	81
Figura 24: Procedimento metodológico para a definição do modelo genérico.	82
Figura 25: Modelo genérico utilizado por Kato et al. (1992).....	95
Figura 26: Modelo genérico utilizado por Kurabuchi et al. (2000).....	96
Figura 27: Modelo genérico de Jiang et al. (2003) adotado no estudo de Evola e Popov (2006).	96
Figura 28: Modelo genérico de Ohba et. al (2001) adotado no estudo de Hu, Ohba e Yoshie (2008)...	97
Figura 29: Modelo genérico desenvolvido por Larsen (2005) e Larsen e Heiselberg (2008) e adotado no estudo de Nikas, Nikolopoulos, Nikolopoulos (2010).....	97
Figura 30: Modelos desenvolvidos por Karava (2008) e adotados por Meroney (2009).	98
Figura 31: Modelo de Karava (2008) utilizado por Ramponi e Blocken (2012b).....	99
Figura 32: Modelos com diversas inclinações de telhados resultantes de variações do modelo de Karava (2008).....	100
Figura 33: Modelo genérico com variações nas inclinações dos beiras nas faces barlavento e sotavento.	101
Figura 34: Modelo genérico desenvolvido por Karava (2008) e utilizado por Tominaga e Blocken (2015).	102
Figura 35: Modelo genérico desenvolvido por Karava (2008) e suas variações adotadas no estudo de Tominaga e Blocken (2016).....	102
Figura 36: Modelo avaliado na pesquisa de Accioly; Oliveira; Bittencourt (2016).	103
Figura 37: Modelo de uma habitação de interesse social típica brasileira desenvolvida por Rossi (2016); Favretto, (2016) e Anchieta (2016).	105
Figura 38: Área das saletas comerciais (m ²) (% do total).	105
Figura 39: Largura da saleta (m) (% do total).	105
Figura 40: Tipologia de dispositivos de sombreamento externos para compor as variações do modelo genérico.	108

Figura 41: Cidades selecionadas para embasar as análises quantitativas acerca da velocidade média de ventos no território brasileiro.....	110
Figura 42: Mesa d'água do Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do IAU-USP.....	116
Figura 43: Sistema elaborado para a captura de imagens e vídeos dos ensaios em mesa d'água no LCA (IAU-USP).	117
Figura 44: Estudo acerca do diâmetro ideal de perfuração dos pontos de tomadas de pressão.	133
Figura 45: Estudo acerca da espessura ideal da câmara de ar para a permitir a dupla instrumentação do modelo reduzido para os ensaios em túnel de vento.....	134
Figura 46: Estudo acerca da espessura ideal da câmara de ar para a permitir a dupla instrumentação do modelo reduzido para os ensaios em túnel de vento.....	134
Figura 47: Proposta de estruturação da Tese de Doutorado.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Disciplinas cursadas no Programa de Pós-Graduação do IAU-USP.....	32
Tabela 2: Valores de k e a (coeficientes de rugosidade do terreno) para diferentes características do entorno.....	56
Tabela 3: Vantagens e desvantagens das técnicas experimental, teórica e numérica.	58
Tabela 4: Características, vantagens e limitações dos modelos de previsão do desempenho de estratégias de ventilação natural (continua)	60
Tabela 5: Tabela - resumo da definição do modelo genérico.	91
Tabela 6: Estudos genéricos com validação a partir de dados experimentais oriundos de ensaios em Túnel de Vento.	94
Tabela 7: Dimensões internas dos ambientes (m) de maior permanência das unidades residenciais presentes no banco de dados elaborado por Rossi (2016); Favretto (2016) e Anchieta (2016).....	104
Tabela 8: Métricas elaboradas a partir dos dados das unidades habitacionais do banco de dados elaborados por Rossi (2016); Favretto (2016) e Anchieta (2016).	104
Tabela 9: Porcentagens da velocidade média interna do ar em relação à velocidade externa resultantes da variação da relação entre as aberturas de entrada e saída de ar.	107
Tabela 10: Intervalos de velocidade média do vento [m/s] com maior frequência de ocorrência das cidades selecionadas.	111
Tabela 11: Matriz de ensaios experimentais em mesa d' água.	114
Tabela 12: Modelos físicos (em planta e em corte longitudinal) elaborados em acrílico 3mm para os ensaios experimentais em mesa d'água.	115
Tabela 13: Cálculo da velocidade média [m/s] da água nos ensaios realizados na mesa d'água do IAU-USP (continua).	117
Tabela 14: Avaliação do impacto da variação da largura da abertura para os vãos equivalentes à 0,6m; 1,0m e 2,0m.....	120
Tabela 15: Avaliações do impacto da altura da abertura para vãos equivalentes à 0,6m e 1,0m.	121
Tabela 16: Avaliações do impacto de protetores solares verticais.	122
Tabela 17: Avaliação do impacto de protetores solares horizontais.	124

Tabela 18: Avaliação do impacto da variação dos ângulos de incidência de vento (0°, 45°, 90°, 180°) para o modelo que caracterizará o modelo genérico (aberturas equivalentes a 1m x 1m e protetor solar de 0,5m).....	126
Tabela 19: Máscaras de sombra dos dispositivos de sombreamento externos (horizontal, vertical e combinado).....	127
Tabela 20: Tabela - resumo dos valores que cada parâmetro que caracteriza o modelo genérico e suas condições de contorno irão assumir nos ensaios experimentais (túnel de vento) ou nas simulações numéricas (CFD)(continua).	129
Tabela 21: Definição dos ensaios experimentais do modelo genérico a serem conduzidos no túnel de vento do IPT.	131
Tabela 22: Área de obstrução da seção transversal de ensaio do túnel de vento ocasionada pela área máxima de projeção do modelo reduzido na situação de incidência de vento perpendicular à sua fachada.	131
Tabela 23:Área de obstrução da seção transversal de ensaio do túnel de vento ocasionada pela área máxima de projeção do modelo reduzido na situação de incidência de vento oblíqua às suas fachadas.	132
Tabela 24: Cronograma de execução das atividades futuras.	137
Tabela 25: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região norte (Manaus e Soure).	151
Tabela 26: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região nordeste (Fortaleza e Vitória da Conquista).	152
Tabela 27: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região centro-oeste (Cuiabá e Campo Grande).	153
Tabela 28: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região sudeste (Arraial do Cabo e São Paulo).....	154
Tabela 29: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região sul (Curitiba e Santa Marta).....	155
Tabela 30: Análise do potencial de sombreamento do dispositivo horizontal para as latitudes de 4°N a 32°S, com intervalos de 4°	157
Tabela 31: Análise do potencial de sombreamento do dispositivo vertical para as latitudes de 4°N a 32°S, com intervalos de 4°	158

Tabela 32:Análise do potencial de sombreamento do dispositivo combinado para as latitudes de 4°N a 32°S, com intervalos de 4°	159
---	-----

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01.....	55
Equação 02.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIVC	<i>Air Infiltration and Ventilation Centre</i>
ArqTeMa	Arquitetura, Tecnologia e Materiais
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BES	<i>Building Energy Simulation</i>
BRAMS	<i>Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CFX	Software de simulação computacional fluidodinâmica desenvolvido pela Ansys.
CICBEU	Centro de Intercâmbio Cultural Brasil
CLIV	Congresso Latino Americano de Engenharia do Vento
cm	centímetro
Cp	Coeficiente de pressão de vento
EERE	<i>Department of Energy Efficiency and Renewable Energy</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EP	<i>EnergyPlus</i>
HIS	Habitação de interesse social
Hz	Hertz
IAU-USP	Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos
IBPSA	<i>International Building Performance Simulation Association</i>
ICMC	Instituto de Ciências Matemáticas e Computação
iESSS	Instituto <i>Engineering Simulation and Scientific Software</i>
IME	Instituto de Matemática e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LCA	Laboratório de Conforto Ambiental do IAU-USP
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
m	metro
m/s	metros por segundo
m ²	metro quadrado
mm	milímetro
NBR	Norma Brasileira
NCSU	<i>North Carolina State University</i>
OBA	Oficina Brasileira de Arquitetura
Pa	Pascal
PAE	Programa de Aperfeiçoamento de Ensino
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
PPG-IAU-USP	Programa de Pós-Graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier–Stokes</i>
SP	São Paulo
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UNICEP	Centro Universitário Central Paulista
UNIFEOB	Centro Universitário Fundação de Ensino Octávio Bastos

LISTA DE SÍMBOLOS

°	grau
%	porcentagem
®	Marca registrada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	47
1.1. Objetivos	50
1.1.1. Objetivo Geral	50
1.1.2. Objetivos Específicos	50
1.2. Estrutura preliminar da tese	50
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	53
2.1. Ventilação natural nas edificações	53
2.1.1. Funcionalidades, mecanismos e sistemas de ventilação natural	53
2.1.2. Ventilação natural por ação dos ventos	54
2.1.3. Modelos de predição do desempenho da ventilação natural	58
2.2. Dispositivos de proteção solar	68
2.3. O uso combinado das estratégias passivas: ventilação natural e sombreamento das aberturas ..	70
3. MATERIAIS E MÉTODOS	81
3.1. Etapa 01: Definição do modelo genérico	82
3.1.1. Procedimento metodológico para a definição do modelo genérico	82
3.1.2. Seleção das classes de parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno	82
3.1.3. Definição dos parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno ..	83
3.1.4. Seleção das ferramentas metodológicas	83
3.2. Etapa 02: Calibração	85
3.2.1. Ensaios no Túnel de Vento	85
3.2.2. Simulações no Ansys CFX®	86
3.2.3. Calibração	87
3.3. Etapa 03: Simulação paramétrica	87
3.4. Etapa 04: Validação	88

3.5. Forma de análise dos resultados.....	88
4. RESULTADOS PARCIAIS	91
4.1. Classe I: Geometria.....	92
4.1.1. Dimensões do modelo	92
4.1.2. Quantidade de janelas	106
4.1.3. Posicionamento das aberturas.....	106
4.1.4. Relação entre as aberturas de entrada e saída do ar.....	106
4.1.5. Tamanho das aberturas	107
4.1.6. Formato das aberturas.....	107
4.1.7. Peitoril das aberturas.....	108
4.2. Classe II: Características dos dispositivos de sombreamento	108
4.2.1. Tipologias	108
4.2.2. Dimensões e posicionamento dos elementos em relação às aberturas	109
4.3. Classe III: Condições de contorno	109
4.3.1. Velocidade	109
4.3.2. Exposição	111
4.3.3. Rugosidade do terreno	111
4.3.4. Altura em que o modelo será ensaiado	112
4.3.5. Ângulos de incidência de vento	112
4.4. Análises qualitativas: visualizações analógicas em mesa d' água e elaboração de máscaras de sombra	112
4.4.1. Visualizações analógicas do fluxo de ar a partir de ensaios em mesa d' água	112
4.4.2. Elaboração de máscaras de sombra.....	127
4.5. Definição do modelo genérico: síntese.....	128
4.6. Preparação do modelo reduzido para os ensaios no túnel de vento do IPT	130
5. CRONOGRAMA E ATIVIDADES FUTURAS.....	135
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	139

6.1. Estrutura da tese.....	140
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
8. APÊNDICES.....	151

APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO MEMORIAL DE QUALIFICAÇÃO

Este memorial de qualificação está estruturado em duas partes: Parte 1. Síntese das atividades desenvolvidas e, Parte 2. Estrutura Preliminar da Tese.

A **“Parte 1: Síntese das atividades desenvolvidas”** é dividida, por sua vez, em dois subitens: (a) Trajetória no Programa de Doutorado, e (b) Atividades Complementares. O primeiro apresenta uma síntese das atividades desenvolvidas pela aluna de doutorado desde a data do seu ingresso no Programa de Pós-Graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos (março/2016) até o momento da finalização da redação deste memorial. Já o segundo, reúne atividades complementares desenvolvidas pela doutoranda em paralelo à pesquisa, no entanto, igualmente importantes para a sua formação.

A **“Parte 2: Estrutura Preliminar da Tese”** contempla uma estrutura prévia da Tese de Doutorado, englobando resumo, objetivos, fundamentação teórica, materiais e métodos, resultados parciais, atividades futuras e cronograma, considerações finais, estrutura da tese de doutorado e referências bibliográficas.

SÍNTESE DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

PARTE 1

PARTE 1. SÍNTESE DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Este tópico está dividido em dois subitens: “Trajetória no Programa de Doutorado” e “Atividades Complementares”. Na sequência, tais itens são apresentados em detalhes.

1. TRAJETÓRIA NO PROGRAMA DE DOUTORADO

Este subitem contempla as atividades desenvolvidas pela aluna de doutorado no Programa de Pós-Graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos [PPG-IAU-USP] desde a data do seu ingresso (março/2016) até o momento da finalização da redação deste memorial. Dentro deste tópico são abordadas as seguintes atividades: (a) resumo do plano inicial e justificativa de redirecionamento da pesquisa; (b) cumprimento dos créditos; (c) participação no programa de aperfeiçoamento de ensino [PAE]; (d) exame de proficiência; (e) produção científica; (f) visitas técnicas ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo [IPT]; (g) estudo do *software* ANSYS/CFX; (h) reunião com pesquisadores; e (j) participação em eventos.

1.1. Resumo do plano inicial e justificativa de redirecionamento da pesquisa

O projeto de pesquisa intitulado “Avaliações quantitativas do desempenho térmico nas etapas iniciais do processo de projeto de habitações de interesse social naturalmente ventiladas” foi submetido no processo seletivo do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos [PPG-IAU-USP] e tinha como objetivo promover e simplificar análises quantitativas de conforto térmico durante as etapas iniciais de projeto de habitações de interesse sociais [HIS] brasileiras não condicionadas, com foco nas estratégias de ventilação natural. Este objetivo seria atingido a partir do desenvolvimento de modelos de regressão (lineares e não lineares), baseados em dados de simulação no *EnergyPlus*, e adaptados para quatro cidades brasileiras.

No entanto, durante o primeiro ano de doutorado, a partir da revisão bibliográfica e de reuniões com diversos pesquisadores da área específica ou correlatas foi diagnosticado que era necessário um trabalho prévio a proposição de metamodelos desenvolvidos a partir dos resultados de simulações computacionais termoenergéticas. Era necessário, primeiramente, averiguar a confiabilidade das simplificações adotadas por estes programas. No que tange à ventilação natural, as simplificações atreladas aos coeficientes de pressão do vento consistiram no principal parâmetro de incerteza. Logo, tendo isso considerado, a pesquisa de doutorado foi redirecionada a fim de melhor investigar este parâmetro.

O atual plano de pesquisa é intitulado “Dispositivos de sombreamento: avaliação do impacto no desempenho da ventilação natural” e busca avaliar o impacto das características dos dispositivos de sombreamento externos no desempenho da ventilação natural em um modelo genérico, tendo como principal parâmetro de avaliação os coeficientes de pressão do vento mensurados na envoltória e no interior de tal modelo. As ferramentas metodológicas a serem aplicadas nesta pesquisa são: ensaios experimentais em túnel de vento de camada limite atmosférica e simulações computacionais fluidodinâmicas [CFD].

1.2. Cumprimento dos créditos

O Programa de Pós-Graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos [PPG-IAU-USP] exige que sejam cumpridos 32 créditos, sendo necessários 24 créditos para a realização do exame de qualificação.

É importante enfatizar que a doutoranda já cumpriu a totalidade dos créditos solicitados pelo Programa (ver Tabela 1). As descrições das ementas das disciplinas cursadas, assim como os resumos dos trabalhos desenvolvidos são apresentados na sequência.

Tabela 1: Disciplinas cursadas no Programa de Pós-Graduação do IAU-USP.

DISCIPLINA CURSADA	VIGÊNCIA	CRÉDITOS	CONCEITO
IAU 5808 - Desempenho Térmico em Edificações	02/03/2016 – 24/05/2016	08	A
IAU 5958 – Eficiência Energética de Edificações	16/03/2016 – 07/06/2016	08	A
IAU 5918- Procedimentos e Métodos de Ensino em Arquitetura e Urbanismo	09/06/2016 – 06/07/2016	04	A
Estágio Supervisionado em Docência do Programa de Aperfeiçoamento de Ensino junto à disciplina IAU0675 - Conforto Ambiental no Espaço Urbano	01/07/2016 – 30/11/2016	04	Relatório aprovado pelo Conselho
IAU5812- Tópicos Especiais – Temas Contemporâneos de Conforto Ambiental e Eficiência Energética	22/03/2017 – 13/06/2017	08	A

Fonte: A autora (2018).

1.2.1. IAU 5808 - Desempenho Térmico de Edificações

Conteúdo da disciplina: A disciplina, ministrada pelas Profa. Dra. Karin Chvatal, Profa. Dra. Rosana Caram e Profa. Dra. Kelen Dornelles, englobou variadas temáticas relacionadas ao desempenho térmico de edificações como: índices de conforto térmico (método de Fanger e método adaptativo), ventilação natural (conceitos gerais e estratégias), métodos de determinação das propriedades térmicas da envolvente (materiais opacos e transparentes) e, por fim, a apresentação do procedimento de avaliação

do desempenho térmico de edificações proposto pela NBR 15575 – Edificações habitacionais – Desempenho.

O método de avaliação consistiu no desenvolvimento de uma monografia, cujo tema fosse correlato à disciplina e que a investigação auxiliasse o aluno no desenvolvimento da sua revisão bibliográfica.

Resumo do trabalho apresentado: A monografia apresentada na disciplina intitulada “Modelos Computational Fluid Dynamics [CFD] para predição do desempenho da ventilação natural em edificações” enfatizou a importância da consideração de estratégias de ventilação natural em edificações brasileiras, mas também ressaltou a baixa implementação e a resistência à inclusão, por parte dos engenheiros e arquitetos, de tal estratégia em seus respectivos projetos. Os métodos de predição quantitativa da ventilação natural foram apresentados como alternativa de resolução desta problemática. Deu-se destaque aos programas de dinâmica dos fluidos computacionais [*Computational Fluid Dynamics* – CFD] por serem ferramentas de análise precisas e eficientes. Ao final, foi brevemente pontuada uma nova tendência no estudo da ventilação natural que consiste no acoplamento de programas CFD aos de simulação do desempenho térmico e energético de edificações, os chamados *Building Energy Simulation* [BES].

1.2.2. IAU 5958 – Eficiência Energética em Edificações

Conteúdo da disciplina: A disciplina ministrada pela Profa. Rosana Caram apresentou uma discussão mais detalhada acerca das propriedades termo-físicas dos materiais construtivos e sobre a NBR 15 220 – Desempenho térmico em edificações. As formas de avaliação consistiram em: (a) seminários (em grupo) sobre temas relacionados à disciplina tais como: estratégias passivas, índices de conforto térmico, entre outros; (b) adequação de um projeto de habitação de interesse social a diferentes zonas bioclimáticas e; (c) monografia sobre um tema relacionado à disciplina e à pesquisa do aluno e seminário de apresentação.

Resumo do trabalho apresentado: “Modelos de predição do desempenho de estratégias de ventilação natural no processo de projeto” foi o título da monografia apresentada na referida disciplina. Tal trabalho apresentou a problemática da inclusão de modelos de predição quantitativa do desempenho térmico e energético de edificações nas etapas finais do processo de projeto para finalidade de verificação e validação das estratégias propostas. No entanto, é sabido que os maiores ganhos tanto em custo quanto em conforto térmico são mais facilmente alcançados nas etapas iniciais. Essa realidade se intensifica quando a temática é a avaliação do desempenho de estratégias de ventilação natural devido à alta complexidade inerente ao fenômeno. Os modelos de predição quantitativos (teóricos, experimentais e numéricos) foram apresentados como alternativa e tiveram suas potencialidades e

limitações devidamente exploradas. Por fim, foi apresentado o projeto do Velódromo das Olimpíadas de Londres de 2012 como forma de exemplificar os diversos ganhos proporcionados pela inclusão destas metodologias desde o processo de concepção projetual.

1.2.3. IAU 5918- Procedimentos e Métodos de Ensino em Arquitetura e Urbanismo (EPP – PAE)

Conteúdo da disciplina: A disciplina ministrada no primeiro semestre de 2016, pelos professores Dra. Eulalia Negrelos, Dr. Bruno Daminieli e Dr. Tomás Moreira, foi de grande contribuição e aprendizado, ainda que seu conteúdo programático tenha sido concentrado em quatro aulas.

A exposição dos programas e cronogramas de disciplinas, tanto pelos alunos quanto pelos professores, ampliou o panorama acerca das diversas áreas do conhecimento que compõem o ensino e aprendizado de Arquitetura e Urbanismo. Além disso, foi possível reconhecer as características, peculiaridades, similaridades e discrepâncias entre as diferentes disciplinas apresentadas.

A participação de alunos que também são docentes foi muito enriquecedora, pois estes contribuíam muito para as discussões com suas perspectivas da prática profissional e também levaram para as aulas discussões sobre o exercício da profissão em diferentes contextos, como por exemplo, em instituições de ensino privadas.

Resumo do trabalho apresentado: O trabalho de conclusão desta disciplina consistiu na elaboração de um plano de aulas de uma disciplina ou na readequação de um plano de aulas de uma disciplina já existente. Deste modo, foi selecionada a disciplina oferecida para a graduação do curso de Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos “IAU0649: Conforto Ambiental nas Edificações” e foi proposto um novo formato de programa, cronograma e formas de avaliação, além da ampliação das bibliografias básica e complementar.

1.2.4. IAU5812- Tópicos Especiais – Temas Contemporâneos de Conforto Ambiental e Eficiência Energética

Conteúdo da disciplina: Esta disciplina foi ministrada, no primeiro semestre de 2017, pelas professoras Dra. Karin Chvatal e Dra. Kelen Dornelles, e teve como objetivo guiar o aluno na configuração do estado da arte de sua respectiva pesquisa dentre os variados temas atuais relacionados ao conforto ambiental e eficiência energética nas edificações.

Como forma de avaliação foram propostos seminários durante o período da disciplina, em que os alunos iam apresentando o processo de configuração do estado da arte referente à sua pesquisa. Ao final, cada

aluno entregou um texto científico (que poderia ser tanto em formato de artigo quanto em capítulo de dissertação/tese) que compilasse o material resultante deste processo.

Resumo do trabalho apresentado: A monografia intitulada “O uso de dados experimentais para verificação e validação de simulações numéricas: estudos fundamentais” abordou como as alterações nos padrões de consumo da população e o elevado desenvolvimento tecnológico propiciam maiores consumos de energia. Esta realidade enfatiza a necessidade de engenheiros e arquitetos considerarem, desde as etapas iniciais do processo de projeto, as condicionantes ambientais. O uso de estratégias passivas como, por exemplo, a ventilação natural pode minimizar significativamente a adoção de meios mecânicos ou artificiais de condicionamento das edificações. No entanto, embora reconhecida as funcionalidades da ventilação natural na garantia da qualidade do ar interno, conforto térmico dos usuários e resfriamento das superfícies da edificação, barreiras como a complexidade inerente ao fenômeno restringem a sua efetiva implementação nos projetos arquitetônicos. Logo, o uso de métodos de predição do desempenho da ventilação natural se insere como um importante fator na resolução de tal problemática. Estes métodos podem ser teóricos, experimentais ou numéricos. A definição de qual técnica melhor se adequa na resolução do problema estudado está relacionada à avaliação das potencialidades e limitações de cada método, além da avaliação do tempo, custo e conhecimento demandados para sua efetiva aplicação. As simulações baseadas na dinâmica dos fluidos computacionais [*Computational Fluid Dynamics – CFD*] são amplamente utilizadas para o estudo da ventilação natural, conforto térmico e qualidade do ar. No entanto, seus resultados apresentam significativa sensibilidade aos inúmeros parâmetros modelados pelo usuário tornando, portanto, imprescindível à verificação e validação destas simulações numéricas a partir de modelos experimentais. Deste modo, o trabalho apresentado teve como objetivo elaborar uma revisão bibliográfica acerca de estudos fundamentais experimentais (ensaios em Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica desenvolvidos a partir de geometrias simples e genéricas) de ventilação natural cruzada, que buscaram fornecer dados para a verificação ou validação dos resultados de simulações numéricas conduzidas em *softwares* CFD.

1.3. Participação no Programa de Aperfeiçoamento de Ensino [PAE]

A aluna participou, no segundo semestre de 2016, do Estágio Supervisionado em Docência (PAE) na disciplina “IAU 0675 – Conforto Ambiental no Espaço Urbano” oferecida para o curso de graduação de Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos. A disciplina foi ministrada pelas professoras Dra. Karin Chvatal e Dra. Rosana Caram, sendo a primeira a supervisora da referida aluna.

As atividades que foram desenvolvidas pela aluna neste Estágio Supervisionado em Docência se resumiram em:

- Participar das aulas ministradas para os alunos da graduação;
- Participar e auxiliar no desenvolvimento do material didático e na preparação das aulas expositivas e de laboratório;
- Auxiliar os alunos, esclarecendo dúvidas e apoiando-os na execução de projetos, exercícios e estudos dirigidos propostos durante as aulas e na discussão de tópicos em pequenos grupos;
- Auxiliar na elaboração de apostilas e listas de exercícios sobre os conteúdos ministrados no curso;
- Auxiliar na organização dos seminários a serem realizados pelos alunos ao longo do curso;
- Acompanhar e auxiliar o docente no processo de correção e avaliação dos exercícios propostos.

É válido enfatizar que tais atividades contribuíram de forma significativa na formação acadêmica da aluna de doutorado e que esta experiência permitiu que a aluna ficasse mais preparada para a realização de atividades didáticas e docentes.

1.4. Exame de proficiência

Idioma: Espanhol

Instituição: CICBEU, São Carlos

Conceito obtido: APROVADA em 23/11/2016

1.5. Produção científica

Este tópico abordará os trabalhos científicos publicados, em andamento e submetidos para análise, desenvolvidos desde o ingresso no programa de doutorado até o presente momento.

1.5.1. Trabalhos publicados:

- ROSSI, M. M.; FAVRETTO, A. P. O. ; ANCHIETA, C. . Regression Models to Assess the Thermal Performance of Brazilian Low-Cost Houses. In: **Environmental, Water Resources and Coastal Engineering Graduate Research Symposium**, 2016, Raleigh, NC, USA. Environmental, Water Resources and Coastal Engineering Graduate Research Symposium, 2016.

- ROSSI, M.M.; SANTESSO, C.A.; CHVATAL, K.M.S. Ensino integrado e conforto ambiental e projeto arquitetônico: desafios de uma experiência didática. In: **Seminário: Inovações em Atividades Curriculares**, Campinas, São Paulo, Brasil, 2017.

1.5.2. Trabalhos em andamento:

Estão em fase de elaboração dois artigos resultantes da pesquisa de Mestrado desenvolvida pela referida aluna, intitulada “Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of natural ventilation” sob orientação da Profa. Dra. Karin Chvatal. Estes artigos em andamento são em parceria com os professores da *North Carolina State University* [NCSU] e serão submetidos ao periódico internacional *Energy and Buildings* classificado como A1 no Qualis CAPES.

A aluna também é coautora de um artigo em fase de elaboração acerca dos resultados da pesquisa de mestrado do aluno Héctor Fabian Marin Castaño. Tal artigo também será submetido para o periódico internacional *Energy and Buildings* classificado como A1 no Qualis CAPES.

Está sendo elaborado um artigo para o III Congresso Latino Americano de Engenharia do Vento [CLIV] que será realizado em dezembro deste ano no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo [IPT]. Este artigo abordará a influência de dispositivos de sombreamento externos na ventilação natural em um ambiente a partir de visualizações analógicas em mesa d’ água.

1.5.3. Trabalhos submetidos para análise

O artigo intitulado “ Desenvolvimento de modelo genérico para avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento na ventilação natural” foi submetido recentemente para análise no 5° Congresso Sul-americano de Simulação de Edifícios organizado pela IBPSA Chile que ocorrerá em setembro deste ano no Chile.

1.6. **Visitas técnicas ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT)**

A aluna realizou três visitas técnicas ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas [IPT] em São Paulo.

- **março de 2016:** a aluna juntamente com a Profa. Orientadora Karin Chvatal, o técnico do Laboratório de Conforto Ambiental do IAU-USP, Pedro Mattia, e o mestrando Héctor Fabian Marín Castaño realizaram uma visita ao Túnel de Vento do IPT, conduzida pelo pesquisador

Gilder Nader, com o intuito de conhecer e estabelecer parceria com tal instituição. Nesta visita foi viabilizada a possibilidade da realização de testes no túnel de vento de tal instituição (em momentos previamente agendados com a equipe técnica).

- **outubro de 2016:** a aluna retornou ao IPT para uma reunião com os pesquisadores Gilder Nader e Paulo Jabardo, a fim de delinear melhor o seu projeto de pesquisa. Nesta mesma situação, a aluna auxiliou o mestrando Héctor Fabian Marín Castaño na instrumentação dos seus modelos durante os ensaios (Figuras 1 e 2). Esta estadia de dois dias no túnel foi bastante enriquecedora no sentido de agregar mais conhecimento sobre o processo de instrumentação dos modelos, ensaios em túnel de vento e posterior pós-processamento de dados.
- **março de 2018:** a aluna juntamente com a Profa. Orientadora Karin Chvatal, a aluna de iniciação científica Fernanda Itkes e a coorientadora Profa. Dra. Alessandra Rodrigues Prata Shimomura realizaram uma reunião no IPT com os engenheiros Dr. Gilder Nader e Msc. Gabriel Borelli para revisar e aprimorar os detalhes do modelo genérico a ser simulado no Túnel de tal instituição no mês de maio deste ano.

Figura 1 e Figura 2: Fotos do modelo de habitação de interesse social (pesquisa do mestrando Héctor Castaño) ensaiados no túnel de vento do IPT-São Paulo.



Fonte: Castaño (2017)

1.7. Estudo do *software* ANSYS/CFX

A partir de uma parceria com o Professor Dr. Paulo Greco da Engenharia Aeronáutica da Escola de Engenharia de São Carlos [EESC] foi possível ter acesso à licença do programa de dinâmica dos fluidos computacionais, Ansys CFX®.

A aluna está realizando desde o final de outubro/2016 o aprendizado deste *software* e está sendo assessorada por alunos pertencentes ao grupo de pesquisa Arquitetura, Tecnologia e Materiais [ArqTeMa] que já utilizaram previamente este programa.

Além disso, a aluna realizou um curso *online* de aprofundamento junto ao Instituto *Engineering Simulation Scientific Software* denominado “Simulação Fluidodinâmica utilizando o ANSYS” (carga horária de 10h) para aprimorar o entendimento desta ferramenta numérica.

De acordo com Ansoni (2015), a estrutura destes *softwares* pode ser dividida em três módulos: (1) pré-processamento; (2) *Solvers*; (3) pós-processamento. A primeira fase consiste na definição do problema a ser analisado, com posterior definição da geometria, da área de influência (domínio computacional), da geração da malha (divisão do domínio em subdomínios), das propriedades físicas e químicas do problema analisado, das características e propriedades do fluxo e, por fim, das condições de contorno. A segunda etapa compreende a resolução numérica do escoamento a partir da aplicação de equações diferenciais. E a última, consiste na visualização dos dados, a partir do uso de ferramentas de visualização gráfica presentes na maioria dos pacotes CFD.

O estudo se iniciou tendo como base um cubo (geometria simples) para a melhor apreensão das funcionalidades e potencialidades da ferramenta computacional utilizada na modelagem 3D. E, no momento atual, que a aluna já passou pela aprendizagem de todas as etapas do processo para a realização de uma simulação de ventilação natural no CFX, e se concentra no aprimoramento da modelagem a partir do incremento da complexidade da geometria, incluindo as aberturas e os elementos de proteção externos que serão o foco da pesquisa em questão.

1.8. Reunião com pesquisadores

Em junho de 2016 foi realizada uma reunião com a Profa. Dra. Marieli Lukiantchuki e com a Profa. Orientadora Karin Chvatal. A reunião ocorreu no IAU-USP, quando a professora Marieli esteve na instituição em razão de uma banca de Qualificação. Neste encontro, foi apresentada a ideia inicial da proposta de projeto pesquisa às professoras. A Profa. Dra. Marieli Lukiantchuki trouxe contribuições pertinentes, uma vez que desenvolveu seu mestrado e doutorado sobre a temática da ventilação natural em edificações e também fez uso de ferramentas como o CFX e ensaios experimentais em túnel de vento.

Em outubro de 2016 foi realizada uma videoconferência com o professor e pesquisador Dr. Fernando Marques da Silva do Laboratório Nacional de Engenharia Civil [LNEC] e com a Profa. Orientadora Karin Chvatal. Este contato foi de grande relevância para um melhor delineamento do projeto de pesquisa proposto pela aluna. Por ser uma notável referência na área de ventilação natural, o pesquisador Dr. Fernando Marques foi bem pertinente em suas colocações em relação à relevância do tema proposto, a viabilidade de execução e refinamentos em relação aos objetivos e às etapas metodológicas para o cumprimento de tais objetivos.

Os professores citados contribuíram desde o início até a conclusão do desenvolvimento do projeto de pesquisa apresentado. Sugestões, resolução de dúvidas acerca da metodologia, tempo e viabilidade de execução assim como revisão de textos foram possíveis a partir troca de e-mails entre a candidata e os referidos professores.

Em novembro de 2017, a Profa. Dra. Alessandra Rodrigues Prata Shimomura foi incluída como coorientadora desta pesquisa de Doutorado. A Profa. Alessandra é especialista em simulações CFD para análise do desempenho da ventilação natural em ambiente urbano, além de ter significativo domínio acerca de ensaios em Túnel de Vento. O domínio por parte da coorientadora de ambas as ferramentas, que serão utilizadas neste projeto de Doutorado, será pertinente e de extrema importância durante as etapas: (a) de calibração do *software* ANSYS CFX a partir de dados oriundos do ensaio experimental; (b) de simulações paramétricas; e, por fim, (c) de validação das simulações a partir dos ensaios experimentais. Desde então, estão sendo realizadas no mínimo uma reunião por mês com a coorientadora para o melhor delineamento e andamento da pesquisa.

1.9. Participação em eventos

- **XIV Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído e X Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído:** realizado em Balneário de Camboriú em Santa Catarina dos dias 27 a 29 de setembro de 2017. Nesta ocasião, a aluna apresentou o trabalho da aluna de mestrado Maria Pilar Casatejada, intitulado: “Comparação entre os horários habituais e recomendados de abertura tanto de janelas quanto de portas internas em habitações”.
- **Seminário: Inovações em Atividades Curriculares:** realizado em Campinas na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) dos dias 30/novembro a 02/dezembro. Nesta ocasião, a aluna apresentou juntamente com a coautora Caroline A. Santesso o trabalho intitulado: “Ensino integrado de conforto ambiental e projeto arquitetônico: desafios de uma experiência didática”.

2. ATIVIDADES COMPLEMENTARES

Neste item são abordadas tarefas complementares, mas igualmente importantes na formação da referida aluna, e está estruturado em três subitens: (a) Cursos e Palestras; (b) Atividades de Ensino e por fim, (c) Atividades de consultoria.

2.1. Cursos e palestras

Neste subitem serão apresentados tanto os cursos e palestras em que a aluna participou como também os por ela ministrados.

2.1.1. Participação em cursos de curta duração e conferências

- (2016) Introdução ao *OpenFOAM*[®]. (Carga horária: 12h). ICMC, USP-São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.
- (2016) 1ª Conferência sobre Qualidade do Ambiente e Eficiência Energética em Edificações. (Carga horária: 16h). ASHRAE, São Paulo, SP, Brasil.
- (2016) Uso das Bases *Scopus*, *ScienceDirect*, *Compendex* e *Mendeley* da *Elsevier*. (Carga horária: 3h). CETEPE, EESC – USP- São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.
- (2017) *Workshops* de Formação Didático – Pedagógica. IME/USP – São Paulo, SP, Brasil.
- (2017) Simulação Fluidodinâmica utilizando o ANSYS. (Carga horária: 10h). iESSS. Curso *online*.
- (2017) Minicurso “Cálculo simplificado da carga térmica do ar condicionado” realizado no IAU-USP em outubro de 2017 (carga horária: 4h), São Carlos – SP.

2.1.2. Palestras e cursos ministrados

- **Palestra: “Ferramentas de Apoio ao Projeto Arquitetônico: Conforto Térmico e Lumínico” (UNICEP- São Carlos)**

A palestra “Ferramentas de Apoio ao Projeto Arquitetônico: Conforto Térmico e Lumínico” foi ministrada em conjunto com o Professor Dr. Victor Roriz no Centro Universitário Central Paulista [UNICEP] em São Carlos.

Em síntese, esta palestra apresentou ferramentas qualitativas e quantitativas que podem auxiliar o arquiteto no processo projetual, enfatizando os ganhos da inclusão de tais ferramentas. A palestra foi ministrada para todos os alunos do curso de graduação de Arquitetura e Urbanismo de tal instituição, marcando o início do segundo semestre letivo de 2016.

- **Curso de Extensão Universitária: “Iluminação Natural e Artificial no Projeto Arquitetônico” (UNICEP – São Carlos)**

O curso de extensão universitária “Iluminação Natural e Artificial no Projeto Arquitetônico” foi ministrado em conjunto com o Professor Dr. Víctor Roriz no Centro Universitário Central Paulista [UNICEP] em São Carlos.

Buscou-se neste curso introduzir as principais noções teóricas e práticas sobre a utilização da iluminação natural em projetos arquitetônicos, visando à aplicação desta estratégia desde as etapas iniciais do processo de projeto. Sendo a iluminação artificial, então, apresentada como complemento à primeira.

Com carga horária total de 24 horas, o curso foi estruturado em 06 módulos: I. Fundamentos luminiotécnicos; II. Ferramentas computacionais de auxílio ao projeto lumínico (*SketchUp e Dialux*); III. Iluminação Natural; VI. Iluminação Artificial; V. Proposição de um exercício de projeto e V. Apresentação e discussão das propostas desenvolvidas pelos participantes.

- **Primeira e Segunda Edições das Oficinas da OBA. Residências confortáveis: estratégias práticas de projeto.**

Atendendo a um convite das arquitetas do Escritório de Arquitetura e *Design* de Interiores OBA - Oficina Brasileira de Arquitetura, a candidata ministrou uma palestra juntamente com as tais arquitetas sobre como considerar estratégias práticas de projeto que priorizem o conforto térmico dos usuários nas residências brasileiras desde as etapas iniciais do processo de projeto arquitetônico. A palestra intitulada: “Residências confortáveis: Estratégias práticas de projeto” foi ministrada em abril de 2017 na Primeira Edição das Oficinas da OBA em Campinas-SP e na Segunda Edição em São Carlos em agosto de 2017. Ambas as edições contaram com um público-alvo formado majoritariamente por estudantes de Arquitetura e Urbanismo e recém-formados desta mesma área.

2.2. Atividades de ensino

Este subitem reúne as atividades de ensino realizadas pela referida aluna. Aborda sua participação como monitora voluntária em uma disciplina optativa oferecida ao curso de graduação de Arquitetura e Urbanismo no IAU-USP, e as aulas ministradas, em momento anterior à concessão da sua Bolsa de Doutorado [CAPES], no Centro Universitário Octávio Bastos [UNIFEQB].

2.2.1. Participação como monitora voluntária em disciplina optativa no Curso de Graduação de Arquitetura e Urbanismo (IAU-USP)

A aluna participou como monitora voluntária da disciplina optativa realizada no curso de graduação do IAU-USP intitulada “Reinvenção dos lugares do cotidiano: táticas projetuais em arquitetura, arte e *design*” durante o primeiro semestre de 2016. As constatações feitas a partir desta experiência foram sintetizadas em um resumo expandido aceito e apresentado no seminário “Inovações curriculares 2017” realizado de 30/novembro a 02/dezembro de 2017 na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

O resumo expandido aceito e apresentado neste Seminário foi selecionado entre os 50 melhores trabalhos e a versão completa deste artigo será publicado em um *e-book* até o final de 2018.

2.2.2. Atividades Docentes: Centro Universitário Octávio Bastos [UNIFEOB]

De agosto a outubro de 2016 a aluna ministrou aulas no Centro Universitário Octávio Bastos [UNIFEOB] localizado em São João da Boa Vista - SP para quatro turmas de graduação do curso de Arquitetura e Urbanismo, totalizando 10h/aula/semana.

As atividades foram interrompidas em outubro/2016 devido ao fato da aluna ter sido contemplada com uma bolsa de Doutorado CAPES e logo haver a impossibilidade do aceite da bolsa com o vínculo empregatício. A candidata indicou um professor substituto e assessorou de forma voluntária todo o processo de transição.

As disciplinas ministradas foram:

- Fenômenos Físicos (40 horas | 01 turma);
- Conforto Ambiental, Acústico e Térmico (40 horas | 02 turmas);
- Iluminação Natural e Artificial (80 horas | 01 turma).

2.3. **Atividades de consultoria**

Foram realizadas atividades de consultorias de desempenho térmico juntamente com a empresa Roriz Engenharia Bioclimática. Embora, tal atividade não se configure em um vínculo empregatício, a aluna de doutorado informou e teve deliberação do Programa de Pós-Graduação do IAU-USP para a realização desta atividade esporádica.

ESTRUTURA PRELIMINAR DA TESE

PARTE 2

1. INTRODUÇÃO

Um desafio urgente aos profissionais de arquitetura e engenharia é a incorporação de uma cultura arquitetônica que considere os atuais problemas ambientais (mudanças climáticas, escassez das fontes energéticas, entre outros) (BITTENCOURT, 2015). Deste modo, a participação ativa do arquiteto na definição de estratégias de condicionamento passivas durante o processo de projeto pode evitar ou minimizar significativamente o uso de equipamentos mecânicos para o condicionamento artificial e, conseqüentemente, o consumo energético das edificações (LECHNER, 2009; DEUBLE; DE DEAR, 2012; MENDLER; ODELL; LAZARUS, 2006).

Em climas quentes e úmidos – cenário característico de grande parte do território brasileiro, ao menos no verão –, o uso conjugado da ventilação natural e dos dispositivos de sombreamento pode representar uma efetiva estratégia de projeto para se atingir bons níveis de conforto térmico nas edificações (CÂNDIDO et al., 2010). Esta efetividade é confirmada pela NBR 15 220- Desempenho Térmico em Edificações¹ (ABNT, 2005), a qual indica a ventilação natural como estratégia de condicionamento passivo de edificações no verão em sete das oito zonas bioclimáticas brasileiras. Já, o sombreamento das aberturas, também no verão, é recomendado para cinco dessas zonas bioclimáticas.

Assim sendo, fica evidente que o uso combinado da ventilação natural e do sombreamento das aberturas pode contribuir para a redução do condicionamento artificial e, conseqüentemente do consumo de energia nas edificações brasileiras. A ventilação natural também apresenta entre seus benefícios a promoção da qualidade do ar no interior dos ambientes e o resfriamento das estruturas da edificação. E possui grande alcance social, por ser tratar de uma estratégia gratuita (GIVONI, 1976; LIDDAMENT, 1996; TOLEDO, 1999; FROTA; SCHIFFER, 2001; ALLARD, 2002; SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008; LECHNER, 2009). Quanto aos elementos de sombreamento externos, estes, quando bem projetados², podem bloquear a radiação solar direta excessiva, reduzindo o ganho de carga térmica, diminuindo os riscos de ofuscamento e, resultando assim em maiores níveis de conforto visual e térmico aos usuários nas edificações (GIVONI, 1976; FROTA, 2004; VIANNA; GONÇALVES, 2001; LECHNER, 2009; DAVID et al., 2011; BELLIA; DE FALCO; MINICHIELLO, 2013; FREEWAN, 2014).

Embora a integração de ambas as estratégias seja pontuada como uma alternativa viável de ser aplicada em projetos de edificações brasileiras, pouca informação se tem acerca da ordem de grandeza do

¹ NBR 15 220- Desempenho Térmico em Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005).

² O dimensionamento de protetores solares externos pode ser realizado através da aplicação de cartas solares (BITTENCOURT, 1991).

impacto dos elementos de sombreamento externos na ventilação natural. É sabido que a ventilação natural em edificações consiste na trajetória do fluxo de ar no interior dos ambientes decorrente do diferencial de pressão gerado em suas superfícies. Este diferencial pode ser resultante da força mecânica exercida pelo vento nas superfícies da edificação, pela diferença de temperatura entre os ambientes internos e externos ou ainda por estes dois processos conjugados.

A ação mecânica dos ventos na envoltória de uma edificação pode ser avaliada através dos coeficientes de pressão de vento locais (C_p) que são variáveis de ponto a ponto nas superfícies. De acordo com Etheridge (2012), denomina-se coeficiente de pressão o quociente adimensional da pressão dinâmica aferida em um ponto da fachada da edificação pela pressão dinâmica do fluxo de ar não perturbado. A obtenção destes dados pode ocorrer a partir de fontes primárias (experimentos em escala real, ensaios experimentais de modelos reduzidos em túneis de vento de camada limite atmosférica, e simulações computacionais fluidodinâmicas, as chamadas *Computational Fluid Dynamics*, CFD); ou a partir de fontes secundárias (banco de dados ou métodos analíticos) (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009).

Os coeficientes de pressão do vento, além de serem sensíveis a vários parâmetros – rugosidade do terreno, ângulo de incidência do vento, formato da edificação e presença de obstáculos em seu entorno, entre outros – são dados de entrada requeridos nos principais programas de simulação para avaliação termoenergética de edificações que fazem uso da ventilação natural, os chamados *Building Energy Simulation* (BES) (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009). No entanto, um dos principais *software* BES, o *EnergyPlus* (EERE, 2016a), desconsidera o efeito da presença de elementos de sombreamento no seu algoritmo de cálculo do módulo de ventilação natural³. Segundo Leite e Frota (2013), o banco de dados de C_p do *EnergyPlus* é oriundo de pesquisas realizadas em modelos regulares (paralelepípedos) e isolados, logo para a simulação de ventilação natural em geometrias diferentes, o *software* adota fatores de correção nos dados de pressão incidente, o que pode acarretar em erros no cálculo de vazões de ar nos ambientes.

Bittencourt e Cândido (2008) afirmam que a distribuição do fluxo de ar no ambiente interno é influenciada pelas pressões no entorno das edificações e nas imediações de suas respectivas aberturas. Logo, a determinação do impacto de dispositivos de sombreamentos externos é um dado que se mostra, diante dos diversos pontos anteriormente apresentados, relevante no processo de projeto de edificações que fazem uso da ventilação natural.

³“It is assumed that the air flow through a window opening is unaffected by the presence of a shading device such as a shade or blind on the window” (EERE, 2016b, p.1071).

Na literatura científica, há trabalhos que contemplam, como objeto de estudo, a influência de elementos arquitetônicos junto às janelas ou a presença de detalhes nas fachadas da edificação como, por exemplo, protetores solares, prateleiras de luz, peitoris ventilados e sacadas (BITTENCOURT; BIANA; CRUZ, 1995; VETTORAZZI et al., 2016; CASTAÑO, 2017; ACCIOLY; OLIVEIRA; BITTENCOURT, 2016; BITTENCOURT et al., 2007; CHAND; KRISHAK, 1971; STATHOPOULOS; ZHU, 1988; CHAND; BHARGAVA; KRISHAK, 1998; MARUTA; KANDA; SATO, 1998; PRIANTO; DEPECKER, 2002; HIEN; ISTIADJI, 2003; AI et al., 2011; HILDEBRAND, 2012; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013; PÉREN et al., 2015; KIRIMTAT et al., 2016). No entanto, majoritariamente, as análises feitas são acerca do impacto destes elementos nos desempenhos térmico, lumínico ou energético de edificações. E quando o ponto focal é a ventilação, a maioria dessas investigações se referem ao impacto na velocidade ou na distribuição do fluxo de ar no ambiente.

Destaque se dá ao trabalho de Chand, Bhargava & Krishak (1998) e de Castaño (2017) que mensuraram os efeitos na distribuição de pressão do vento (C_p) a partir de ensaios em túnel de vento. No primeiro, observou-se o impacto nesta variável ocasionados pela presença ou não de sacadas em um modelo de edificação composto por cinco andares. Já, o segundo, concentrou-se no impacto do uso de diferentes dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural (C_p), nas temperaturas internas e no conforto térmico de uma habitação brasileira térrea e naturalmente ventilada, localizada em clima predominantemente quente e úmido.

A partir destes estudos e constatações, é possível observar que o uso de dispositivos de sombreamento apresenta impactos significativos, mas ainda pouco explorados, no desempenho da ventilação natural em edificações. Embora a distribuição de pressão na envoltória da edificação se configure como o parâmetro motriz para a ocorrência da ventilação natural, nota-se uma preponderância da literatura científica sobre esta temática em adotar geometrias lisas e de baixa porosidade como objeto de estudo, principalmente para a realização de ensaios em túneis de vento. Poucas são as investigações observadas acerca do impacto neste parâmetro, ocasionados pela presença de detalhes nas fachadas da edificação (MONTAZERI; BLOKEN, 2013), tais como dispositivos de sombreamento externos.

1.1. Objetivos

Na sequência são apresentados os objetivos geral e específicos da presente pesquisa de doutorado:

1.1.1. Objetivo Geral

- Avaliar o impacto das características projetuais de diferentes dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural em um modelo genérico, através das distribuições de pressão na sua envoltória.

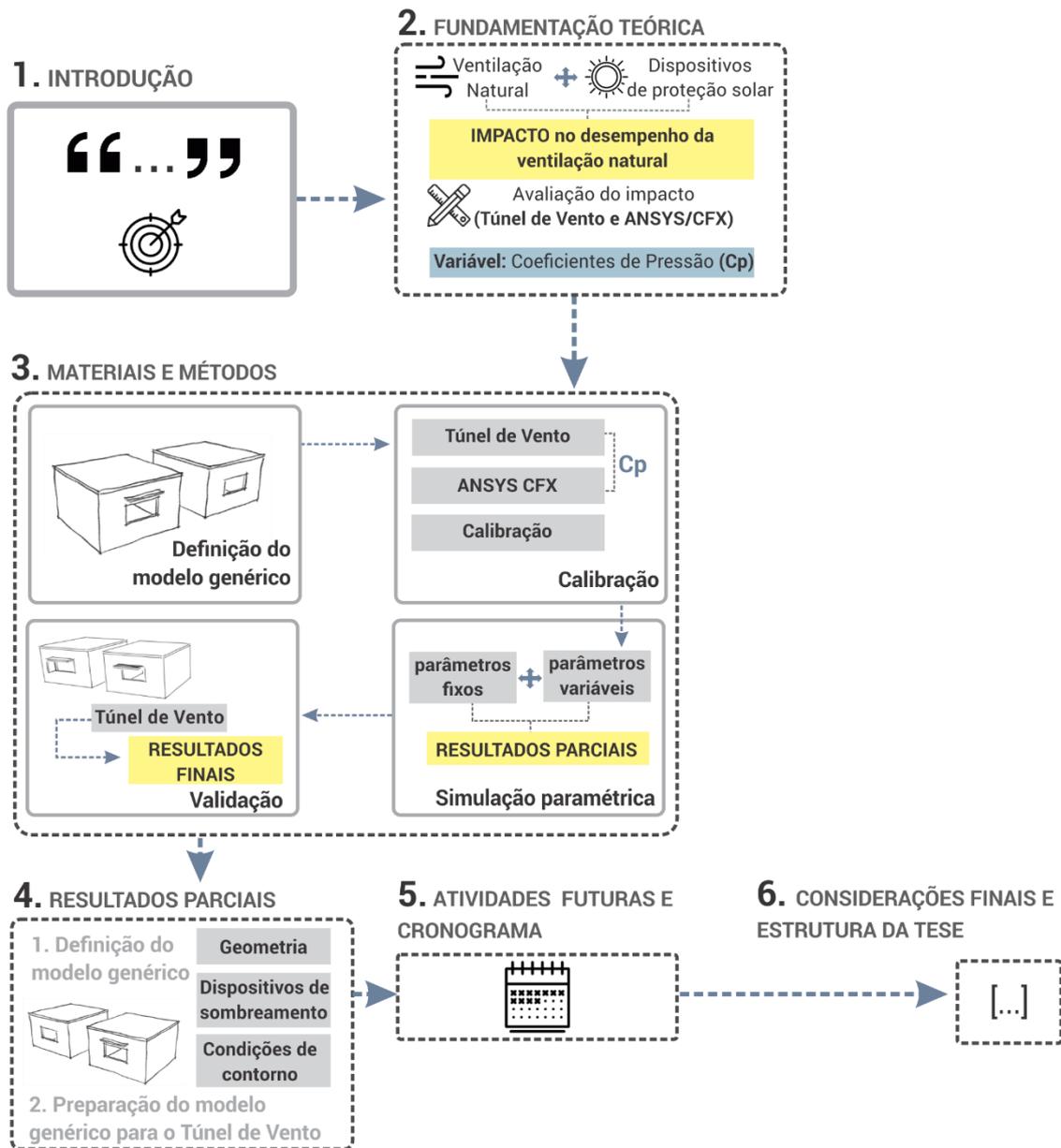
1.1.2. Objetivos Específicos

- Verificar a compatibilidade entre os resultados numéricos e experimentais, a fim de comparar diferentes ferramentas metodológicas (simulações CFD e ensaios em túnel de vento) na predição dos coeficientes de pressão (C_p) na envoltória de modelos com dispositivos de sombreamento.
- Verificar e classificar – caso sejam identificados padrões no decorrer das análises – o impacto que diferentes dispositivos de sombreamento podem resultar no desempenho da ventilação natural em ambientes internos, observando parâmetros qualitativos e quantitativos como: a distribuição e a velocidade do fluxo de ar, os coeficientes de pressão e a taxa de renovação de ar/hora.
- Desenvolver recomendações acerca do impacto da adoção de dispositivos de sombreamento em edificações que fazem uso da ventilação natural, a partir de dados qualitativos e quantitativos, ampliando deste modo a bibliografia sobre esta temática.

1.2. Estrutura preliminar da tese

A estrutura preliminar da tese está organizada em seis capítulos: **1. Introdução; 2. Fundamentação teórica; 3. Materiais e métodos; 4. Resultados parciais; 5. Atividades futuras e cronograma e; 6. Considerações finais e estrutura da tese**, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Estrutura preliminar da tese.



Fonte: A autora (2018).

Esta versão preliminar da Tese de Doutorado, inicia-se por um capítulo de “1. Introdução”, o qual apresenta a justificativa e a contextualização que embasam este trabalho. Além disso, é enunciada a lacuna científica identificada e delineados os objetivos (geral e específicos) propostos para contribuir no processo de resolução de tal lacuna.

No segundo capítulo “2. Fundamentação Teórica” são apresentadas as principais definições, conceitos gerais e contextualizações acerca do uso da ventilação natural e do sombreamento das aberturas como estratégias passivas de condicionamento térmico em edificações. Ao final, é abordado o uso conjunto de tais estratégias como uma vertente possível e coerente para auxiliar na redução do consumo

energético e na melhora dos níveis de conforto térmico aos usuários de edificações localizadas em clima quente e úmido, característico de grande parte do território brasileiro. No entanto, atenta-se a pouca quantidade de estudos na literatura científica que abordam o impacto na ventilação natural ocasionado pela presença de detalhamentos nas fachadas das edificações, reforçando assim a importância de uma maior investigação deste ponto.

Deste modo, o capítulo subsequente **“3. Materiais e métodos”** apresenta uma estrutura metodológica composta por quatro etapas – (a) Definição do modelo genérico; (b) Calibração; (c) Simulações Paramétricas, e (d) Validação – a partir da qual pretende-se atingir o objetivo geral deste trabalho que é avaliar o impacto das características projetuais de diferentes dispositivos de sombreamento externos na ventilação natural em um modelo genérico, através das distribuições de pressão na envoltória

O quarto capítulo **“4. Resultados parciais”** resume-se à apresentação do desenvolvimento da primeira etapa metodológica desta pesquisa: a definição do modelo genérico e da preparação deste modelo para os ensaios experimentais no túnel do vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo [IPT]. No quinto capítulo **“5. Atividades Futuras e cronograma”** são indicadas a descrição das próximas etapas metodológicas e o cronograma de execução. Por fim, finaliza-se com o capítulo **“6. Considerações finais e estrutura da tese”** que engloba os principais pontos encontrados até o estágio atual de desenvolvimento deste trabalho de Doutorado. Neste item, é apresentada também uma proposta de estrutura para a Tese de Doutorado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo de fundamentação teórica reúne os principais conceitos acerca das estratégias passivas de condicionamento térmico de edificações: ventilação natural e sombreamento das aberturas. Além disso, descreve trabalhos que analisaram o impacto na ventilação natural da combinação de tais estratégias. A partir desta revisão, a lacuna científica, a qual o presente trabalho pretende contribuir, é identificada e contextualizada.

2.1. Ventilação natural nas edificações

A ventilação natural nas edificações consiste no conjunto de processos que conduzem, de modo controlado, os fluxos de ar entre o ambiente interno e externo (Marques da Silva, 2010). De acordo com Toledo (1999), tal fenômeno é caracterizado como o deslocamento de ar através das aberturas da edificação que podem funcionar como entradas ou saídas de ar.

2.1.1. Funcionalidades, mecanismos e sistemas de ventilação natural

Segundo Givoni (1976), a ventilação natural é determinante na garantia da saúde, bem-estar e conforto dos usuários. E têm como funções básicas garantir e/ou promover: a) a qualidade do ar no interior das edificações, através de uma renovação do ar interno mínima pelo ar exterior, caracterizando a chamada ventilação higiênica que deve, por sua vez, ser assegurada em todas condições climáticas; (b) o conforto térmico dos usuários, a partir do incremento das trocas térmicas ocasionando, deste modo, a ventilação de conforto, necessária principalmente nos períodos de verão e por fim, (c) o resfriamento das estruturas das edificações, quando a temperatura interna é superior à externa, acarretando assim na ventilação de arrefecimento estrutural (GIVONI, 1976). Por ser um recurso gratuito, trata-se de uma estratégia bioclimática de grande alcance social (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008) que auxilia na economia do consumo de energia elétrica a partir da diminuição do uso de condicionamento artificial.

A ventilação natural em edificações ocorre devido ao diferencial de pressão gerado em suas superfícies pelo fluxo de ar. Este diferencial de pressão pode ser resultante da força mecânica exercida pelo vento nas superfícies da edificação, pela diferença de temperatura entre os ambientes internos e externos ou ainda por estes dois processos conjugados. Deste modo, os mecanismos de ventilação natural podem ser classificados em: (i) ventilação por ação dos ventos; (ii) ventilação por efeito chaminé e, (iii) ventilação por efeito conjugado.

(i) Ventilação por Ação dos Ventos: ocorre devido ao diferencial de pressão gerado no entorno do edifício resultante da ação mecânica do vento sobre tal edificação (RIVEIRO, 1985). O vento quando incide em

uma edificação gera zonas de sobrepressão e subpressão, ou seja, pressões maiores ou menores que a atmosférica, respectivamente (TOLEDO, 1999). Devido ao enfoque deste trabalho, maiores detalhes acerca deste mecanismo de ventilação natural serão abordados no item subsequente.

(ii) Ventilação por Efeito Chaminé: ocasionada a partir das diferenças de temperatura entre o ar interno e externo, ocasionando, por sua vez, um escalonamento de pressões no sentido vertical e, conseqüentemente, o movimento do fluxo de ar. No “efeito chaminé” as diferenças de temperatura entre o ar interno e o externo resultam distintas densidades do ar. O ar no interior da edificação ao se aquecer devido aos ganhos de calor (provenientes da excessiva radiação e/ou dos ganhos internos) se torna menos denso, o que ocasiona a sua respectiva ascensão. Logo, segundo Rivero (1985), há um deslocamento de ar da zona de maior pressão para a de menor pressão, e se estas contemplarem aberturas, um fluxo de ar de uma até a outra irá se consolidar

(iii) Ventilação por Efeito Conjugado: A simultaneidade dos processos pode tanto ocasionar a soma de efeitos, para incrementar a ventilação natural do edifício ou, se ocorrerem em sentidos contrários, podem prejudicar a ventilação interna, desencadeando condições de grande desconforto ou até mesmo um clima insalubre aos usuários. Para que a simultaneidade dos processos ocorra e ocasione o incremento da ventilação natural na edificação é necessário que seja configurado primeiramente, de modo isolado, o fluxo de ar no interior da edificação proveniente da ação do vento e o sentido do fluxo originado pelas diferenças de temperatura possa ser complementar ao primeiro, gerando assim um resultado mais favorável ao caso estudado (TOLEDO, 1999).

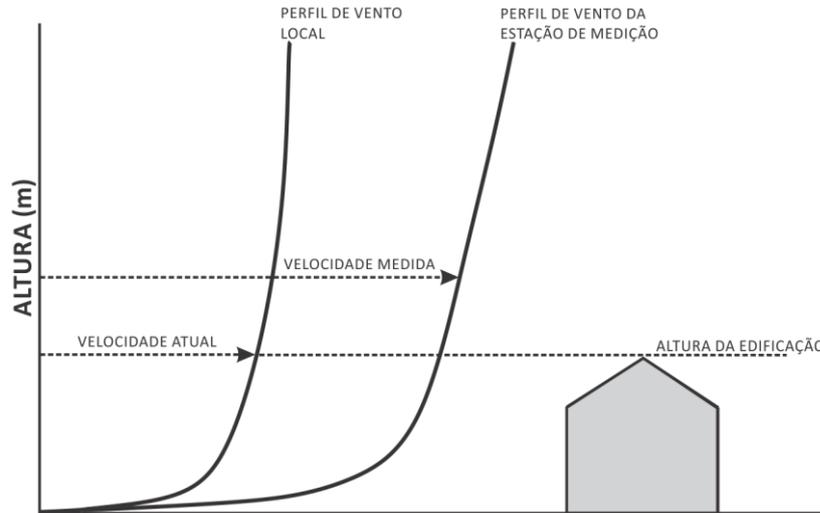
Dependendo da localização das aberturas na envoltória da edificação, a ventilação natural pode ser classificada como ventilação cruzada ou unilateral. A ventilação cruzada ocorre quando as aberturas estão situadas em faces distintas do edifício, sendo as de entrada localizadas em zonas sobrepressão e as de saída em zonas de subpressão; já a ventilação unilateral acontece quando existe apenas uma abertura para a troca de ar ou quando as aberturas de entrada e saída de ar se encontram na mesma fachada. As aberturas estão, deste modo, situadas em zonas de igual ou pequena diferença de pressão (GIVONI, 1976). Segundo Marques da Silva (2010), esses dois esquemas globais de ventilação podem ocorrer nos processos por ação dos ventos, efeito chaminé ou efeito conjunto.

2.1.2. Ventilação natural por ação dos ventos

O regime de escoamento dos ventos pode ser definido como: turbulento ou laminar, sendo o primeiro aquele que apresenta variação de sua velocidade e o segundo aquele em que velocidade tende a se manter constante. Lechner (2009) destaca que a velocidade do ar aumenta rapidamente com o incremento da altura em relação ao solo (Figura 4). De acordo com Marques da Silva (2010), isso ocorre

devido à força de atrito resultante do contato entre a superfície e o fluido que sobre ela escoar. Tal força é verificada na faixa atmosférica compreendida entre o escoamento com velocidade de vento igual à zero (no contato com a superfície) até a velocidade igual à do fluxo livre de obstruções, denominada Camada Limite Atmosférica (CLA).

Figura 4: Influência das características do terreno no perfil de vento local.



Fonte: Adaptado de Liddament (1996).

Assim, ao utilizar dados de velocidades do vento em projetos que visem à ventilação natural é importante considerar a necessidade de correção (coeficientes de rugosidade do terreno) de tais dados para serem utilizados na altura das aberturas da construção em estudo, uma vez que as medições-padrão são, normalmente, realizadas a uma altura de 10m acima do solo (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008).

O *Building Research Establishment* - BRE (1978), a partir da transposição das medidas adquiridas em estações meteorológicas e com base na variação da rugosidade de diversos tipos de terreno, define a equação (Equação 1) a seguir para determinar a velocidade do ar a uma determinada altura.

$$V = V_m \cdot k \cdot z^a$$

Equação 1

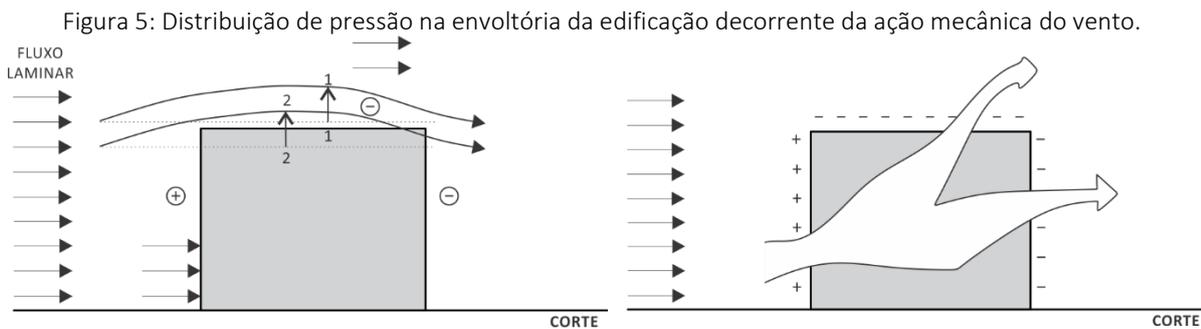
Onde:

- V Velocidade média do vento à determinada altura (m/s);
- V_m Velocidade média do vento na estação registrada a 10m (m/s);
- Z Altura determinada (m);
- k, a Coeficientes segundo a rugosidade da superfície do terreno (Tabela 2).

Tabela 2: Valores de k e a (coeficientes de rugosidade do terreno) para diferentes características do entorno.

COEFICIENTES DO TERRENO	k	a
Área aberta plana	0,68	0,17
Campo com obstáculos esparsos em relação ao vento	0,52	0,20
Área urbana (subúrbio)	0,35	0,25
Centro de cidade	0,21	0,33

Fonte: Bittencourt; Cândido (2008).



Fonte: Adaptado de Frota; Schiffer (2001).

O diferencial de pressão ocasionado em uma edificação pela ação dos ventos se dá, de forma genérica, do seguinte modo: as paredes expostas ao vento (barlavento) estão sob a ação de sobrepressões e os planos não expostos ao vento (sotavento), estão sujeitos à ação de sucções. Desta forma, os fluxos de ar se configuram através do espaço interior de barlavento para sotavento (Marques da Silva, 2010).

Fatores como direção do vento incidente, forma e dimensões da edificação alteram o modo como estas zonas de pressões se distribuem nas superfícies externas da edificação (TOLEDO, 1999). As resultantes da ação mecânica dos ventos na envoltória de uma edificação podem ser avaliadas através dos coeficientes de pressão de vento locais (C_p) que são variáveis de ponto a ponto nas superfícies.

De acordo com Etheridge (2012) denomina-se coeficiente de pressão o quociente adimensional da pressão dinâmica aferida em um ponto da fachada da edificação pela pressão dinâmica do fluxo de ar não perturbado (Equação 2). Liddament (1996), reforça que os valores de C_p são variáveis em relação ao seu posicionamento na fachada da edificação e da direção de vento incidente, no entanto são independentes da velocidade de vento.

$$C_p = (P_x - P_o) / P_d$$

Equação 2

Onde: C_p - coeficiente de pressão; P_x - pressão estática aferida em um determinado ponto da superfície [Pa]; P_o - pressão estática de referência [Pa] e P_d - pressão dinâmica do fluxo não perturbado [Pa].

A obtenção dos dados de C_p pode ocorrer a partir de fontes primárias (experimentos em escala real, ensaios experimentais de modelos reduzidos em túneis de vento de camada limite atmosférica, e simulações computacionais fluidodinâmicas, as chamadas *Computational Fluid Dynamics*, CFD); ou a partir de fontes secundárias, banco de dados ou métodos analíticos (AIVC; ASHRAE; CpCal+; Swami and Chandra model; CpGenerator) (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009).

Além de representar o parâmetro motriz para as análises de ventilação natural por ação dos ventos, os C_p são dados de entrada requeridos nos principais programas de simulação para avaliação termoenergética de edificações que fazem uso da ventilação natural, os chamados *Building Energy Simulation* (BES) (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009). Cóstola et al. (2010) enfatizam que tais programas têm, comumente, um banco de dados limitados de C_p apresentando esses dados somente para edifícios de geometrias simples, como cubos, paralelepípedos, entre outros. Informações para edifícios com geometria complexas, como por exemplo com protetores solares, não estão disponíveis nesses bancos de dados. Além disso, os valores de C_p s são adotados com base nos valores de coeficientes médios por fachada ao invés de valores locais. Santamouris e Wouters (2006) pontua que esta variável é sensível a pequenos detalhes da edificação, sendo assim indicada a aquisição destes valores para cada caso em específico. Por fim, Allard (2002) reforça a necessidade de maiores investigações acerca desta variável.

A eficácia da ventilação natural dos edifícios depende também de fatores fixos e variáveis da edificação. São considerados fatores fixos: a disposição dos edifícios, dos espaços abertos ou com presença de obstáculos no entorno, a localização, a orientação e a forma seguida das características construtivas do edifício, além da disposição das aberturas, seus respectivos tamanhos e tipologias. Já, os fatores variáveis consistem na direção, velocidade e frequência dos ventos, e também nas diferenças de temperatura do ar interior e exterior.

Bittencourt e Cândido (2008) apresentam os fatores que influenciam na ventilação natural das edificações segmentados em dois grupos: a) ventilação natural no exterior das edificações e; b) ventilação natural no interior das edificações. No primeiro grupo destacam-se como quesitos do exterior que interferem na ventilação natural de uma edificação: a conformação do tecido urbano, a configuração e arranjo do conjunto edificado, a forma e a tipologia das edificações, as inclinações e beirais de telhados e a existência de cercas, muros e massas de vegetação nos arredores da construção. Já, o segundo grupo remete ao tamanho, forma, localização e tipologia das aberturas, existência de elementos verticais (prolongamentos de paredes, protetores solares, elementos estruturais) ou horizontais (beirais, marquises, varandas), divisões internas e por fim, a vegetação (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008).

Etheridge (2012) enfatiza que a aplicação de conhecimentos científicos ao projeto não é um processo simples, uma vez que demanda não só um bom entendimento do fenômeno físico trabalhado, mas também o domínio das limitações das várias técnicas de análises disponíveis, para que assim possa ser definida a que melhor se adequa ao problema de projeto em questão. A complexidade inerente à ventilação natural é explicada pela complexidade dos fenômenos relacionados com o movimento dos fluidos (FORTUNA, 2000) e, portanto, de difícil mensuração a partir de ferramentas simples. Logo, é necessária a aplicação de métodos de predição da ventilação natural para avaliar o seu respectivo desempenho.

2.1.3. Modelos de predição do desempenho da ventilação natural

Os modelos de predição (teóricos, experimentais ou numéricos) configuram importantes ferramentas na avaliação do desempenho de estratégias de ventilação natural durante o processo projetual. Cada abordagem apresenta vantagens e limitações na resolução de problemas de mecânica dos fluidos conforme listados na Tabela 3 (Tannhehill et al. (1997)⁴ *apud* Fortuna (2000)).

De acordo com Chen (2009), os modelos de predição podem ser divididos em: (a) modelos analíticos; (b) modelos empíricos; (c) modelos experimentais em escala reduzida; (d) modelos experimentais em escala real; (e) modelos de rede (multi zonas); (f) modelos zonais; e (g) modelos de dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Além dos modelos híbridos que podem ser originados a partir do acoplamento de dois ou mais tipos anteriormente citados. A Tabela 4 resume as características, potencialidades e limitações peculiares de cada método de predição quantitativa do desempenho das estratégias de ventilação natural.

Tabela 3: Vantagens e desvantagens das técnicas experimental, teórica e numérica.

TÉCNICA	VANTAGENS	DESvantagens
EXPERIMENTAL	Mais realista	Equipamento exigido; Problemas de escala; Dificuldades de medição; Custo operacional.
TEÓRICA	Mais geral; Fórmula fechada.	Restrita à geometrias e processos físicos simples; Geralmente restrita à problemas lineares.
NUMÉRICA	Não há restrição à linearidade; Geometrias e processos complicados; Evolução temporal do processo.	Erros de truncamento; Prescrição das condições de contorno; Custo computacionais.

Fonte: FORTUNA (2000).

⁴ TANNHEHILL, J.C.; ANDERSON, D.A. & PLETCHER, R.H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. 2 ed. Washington, Taylor & Francis, 1997.

A escolha do modelo ou da combinação de modelos de predição a ser utilizada será dependente do problema estudado. Cada modelo apresenta suas vantagens e limitações. Deve-se analisar, diante de tais pontos, qual que melhor se adequa ao problema apresentado e qual fornece com maior eficiência e precisão, dentro das limitações de tempo, custo e conhecimento, a variável estudada.

Na sequência serão descritos, em detalhes, as potencialidades e limitações dos três tipos de modelos que serão utilizados como ferramentas metodológicas do trabalho em questão: (1) Modelos experimentais em escala reduzida – Mesa d' água; (2) Modelos experimentais em escala reduzida – Túnel de vento e; (3) *Computational Fluid Dynamics* [CFD].

Tabela 4: Características, vantagens e limitações dos modelos de predição do desempenho de estratégias de ventilação natural (continua)

MODELO DE PREDIÇÃO	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
ANALÍTICOS	<p>Derivados de equações fundamentais de fluidodinâmica e de transferência de calor;</p> <p>Modelos analíticos são provavelmente o mais antigo método de predição de ventilação natural.</p> <p>Os modelos empíricos usam mais aproximações que os modelos analíticos;</p>	<p>Amplamente utilizados;</p> <p>Simplicidade;</p> <p>Rico significado físico;</p> <p>Demandam pouco esforço computacional.</p>	<p>Não são uma ferramenta precisa para casos complexos de ventilação;</p> <p>Pouca contribuição à literatura;</p> <p>São dependentes do caso utilizado em seu desenvolvimento.</p>
EMPÍRICOS	<p>Modelos empíricos podem ser desenvolvidos a partir de dados oriundos de simulações computacionais ou ensaios experimentais.</p>	<p>São efetivos e;</p> <p>São simples e fáceis de usar;</p> <p>Menos custosos.</p>	<p>Pouca contribuição à literatura;</p> <p>São dependentes do caso utilizado em seu desenvolvimento.</p>
EXPERIMENTAIS EM ESCALA REDUZIDA	<p>Usam técnicas de medição para a predição ou para avaliação do desempenho da ventilação natural em modelos de escala reduzida.</p>	<p>Predição realista;</p> <p>São amplamente aplicados para validar casos analíticos, empíricos e numéricos;</p> <p>São mais viáveis economicamente que medições em modelos em escala real.</p>	<p>Questões relacionadas à escala dos modelos reduzidos podem ser aspectos limitantes quando geometrias complexas são consideradas.</p> <p>Uma precisa caracterização do modelo reduzido implica em uma alta demanda de tempo, e de equipamentos e profissionais especializados.</p>
EXPERIMENTAIS EM ESCALA REAL	<p>Usam técnicas de medição para a predição ou para avaliação do desempenho da ventilação natural em modelos de escala real ou edificação semelhante (experimentos em laboratórios/ medições <i>in loco</i>).</p>	<p>Predição mais realista;</p> <p>São amplamente aplicados para validar casos analíticos, empíricos e numéricos.</p> <p>Não apresentam limitações em relação à escala como nos modelos reduzidos.</p>	<p>Não são livres de erros;</p> <p>Os equipamentos de medição necessitam de constante calibração;</p> <p>Experimentos muito caros e demorados.</p>

Tabela 4: Características, vantagens e limitações dos modelos de predição do desempenho de estratégias de ventilação natural (conclusão).

MULTI ZONAS	<p>São utilizados para prever taxas de trocas de ar e distribuição de fluxo de ar nas edificações com ou sem sistemas de ventilação mecânicos;</p> <p>São utilizados para o cálculo da demanda energética, eficiência da ventilação, transporte de poluentes ou controle de fumaça;</p> <p>Calcula o fluxo de ar ou o transporte de poluentes entre as zonas da edificação ou entre as zonas e o ambiente externo;</p> <p>Assumem temperatura uniforme do ar na zona analisada.</p>	Ferramentas potentes para o cálculo do fluxo de ar em médias e grandes edificações.	<p>Não são muito precisos nos resultados atribuídos a cada zona;</p> <p>Interface pouco amigável para inserção dos dados;</p> <p>Não têm uma forma gráfica de apresentação dos resultados.</p>
ZONAIIS	<p>Pressuposto de temperatura uniforme do ar na zona analisada usada nos modelos multi zonas não é válido em espaços interiores de grandes dimensões ou com variação de temperatura;</p> <p><i>Zone models</i> são utilizados para resolver tal pressuposto;</p> <p>São desenvolvidos a partir de dados medidos ou de equações do balanço de massa e energia.</p>	A temperatura do ar é calculada para cada célula e mostra a distribuição não uniforme do ar.	<p>Não resolvem equações dinâmicas para tentar minimizar tempo e demanda computacional;</p> <p>Não é tão significativa a diferença de tempo em relação aos programas de simulação computacional fluidodinâmica.</p>
DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL [CFD]	Ferramentas baseadas em um conjunto de equações diferenciais para a conservação de massa, quantidade de movimento (<i>Navier-Stokes</i>); energia, concentrações de compostos químicos, quantidade de turbulências.	<p>São amplamente utilizados no estudo da qualidade do ar, conforto térmico, entre outros;</p> <p>As ferramentas CFD consistem no mais preciso dos métodos numéricos.</p>	<p>Demandam que o usuário tenha uma boa base de mecânica dos fluidos;</p> <p>Simulações CFD demandam validação a partir de dados experimentais.</p> <p>Não substituem modelos de predição experimentais.</p> <p>Demandam computadores de alta performance.</p>

Fonte: Adaptado de CHEN (2009); CHEN et al. (2010); BLOCKEN (2014).

2.1.3.1. Modelos experimentais em escala reduzida – Mesa d' água

A mesa d' água (Figura 6) consiste em um equipamento que possibilita visualizações analógicas do comportamento da ventilação natural em edificações, a partir da passagem de água misturada com um indicador por uma base plana em que é disposto o modelo de análise em escala reduzida (Figura 7) (TOLEDO; PEREIRA, 2003).

Figura 6: Mesa d' água.



Fonte: A autora (2018).

Figura 7: Visualização analógica do fluxo de ar a partir de ensaios experimentais de modelo reduzido em mesa d' água.



Fonte: A autora (2018).

O modelo reduzido deve reproduzir de forma fidedigna todos os detalhamentos encontrados no modelo em escala real, além de ser elaborado em material resistente e impermeável. A sua escala deve atender às limitações da área de ensaio, de modo que as paredes laterais do equipamento não influenciem no escoamento resultante (TOLEDO; PEREIRA, 2003).

As análises de resultados dos ensaios experimentais em mesa d' água são possibilitadas a partir da captura de fotografias e vídeos. De acordo com Accioly; Oliveira e Bittencourt (2016), a análise dos resultados a partir de vídeos é de extrema importância para que não haja interpretações incoerentes ou imprecisas do comportamento do fluxo de ar no ambiente analisado decorrente da limitação encontrada na captura por meio de fotos.

De acordo com Toledo e Pereira (2003), as vantagens da mesa d' água consistem: (a) no baixo custo de aquisição; (b) na baixa demanda de espaço físico; (c) na facilidade de opção e manutenção do equipamento; (d) na possibilidade de alteração instantânea dos parâmetros relacionados às aberturas; e (e) no registro continuado, a partir de fotografias e filmagens, da visualização do escoamento de ar. Ribeiro e Bittencourt (2016) enfatizam que embora as análises qualitativas do fluxo de ar em edificações

sejam possíveis a partir de programas de simulação, a mesa d'água também permite estas análises, no entanto de forma simplificada.

Em contraponto, as limitações deste equipamento se resumem em: (a) análises bidimensionais de um fenômeno que é estritamente tridimensional; (b) possibilidade de avaliações somente isotérmicas e; (c) impedimento de medições quantitativas das grandezas aerodinâmicas (velocidade, pressão) (TOLEDO; PEREIRA, 2003).

2.1.3.2. Modelos experimentais em escala reduzida – Túnel de vento

Ensaio de modelos experimentais em escala reduzida em túneis de vento aerodinâmicos (Figura 8) embasam grande parte do conhecimento científico produzido acerca da ação dos ventos em edificações, a partir de dados oriundos de ensaios para o estudo de problemas de ventilação (na escala urbana e na escala do edifício) ou de estabilidade de estruturas (TOLEDO, 1999). Recentemente, estes mesmos ensaios estão sendo utilizados para a estudos fundamentais, em que as avaliações não são direcionadas à investigação de um determinado modelo em escala real, mas sim em fornecer dados para a validação de modelos teóricos ou numéricos (ETHERIDGE, 2012).

Figura 8: Túnel de vento de camada limite atmosférica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo [IPT].



Fonte: A autora (2018).

Ensaio experimentais em túnel de vento estão entre um dos métodos mais robustos para o estudo do comportamento da ventilação natural no interior ou no exterior das edificações. Tais experimentos podem embasar análises qualitativas (ensaio de fumaça ou de erosão) ou quantitativas (aferição de

grandezas aerodinâmicas como pressão ou velocidade. De modo geral, apresentam como limitações o alto custo e tempo demandados para sua execução. O problema da escala, também pode se configurar em uma barreira na avaliação do fenômeno em casos de geometrias complexas (CHEN, 2009). De acordo com Toledo (1999), a área máxima de projeção do modelo não deve ser maior que 5% da área da seção transversal de ensaio do túnel de vento.

Deste modo, definida a escala do modelo reduzido, suas peças devem ser planificadas e cortadas em cortadoras de alta precisão, como por exemplo, as *a laser*. É importante que o modelo físico reproduza de forma fidedigna todos os detalhes do modelo real.

A definição do material a ser utilizado na confecção do modelo reduzido (acrílico, mdf, compensado, gesso) é dependente do estudo que se deseja realizar (qualitativo ou quantitativo), no entanto em ambos os casos deve ser garantido que o material permita o fácil manuseio para a instalação dos sensores e da fixação da maquete no piso do túnel (MATSUMOTO; LABAKI; CARAM, 2011).

Para ensaios cujo objetivo é mensurar a pressão exercida pelo vento nas superfícies do modelo, é previamente estabelecida uma malha de pontos nas suas superfícies. Estes pontos são perfurados e neles são instalados tubos de plástico com diâmetro interno de 1mm (Figura 9) que se conectam a um *scanner* de pressão de vários canais (Figura 10), possibilitando assim a aferição simultânea da pressão estática nos diferentes pontos. A conexão deste *scanner* a uma placa de aquisição de dados em um computador garante o conhecimento dos dados de pressão em cada ponto.

A aferição da pressão dinâmica do fluxo de ar é realizada a partir do tudo de *Pitot* que deve estar posicionado em um local em que o fluxo esteja livre de interferências ocasionadas pelo modelo reduzido ou pelas paredes do túnel de vento (TOLEDO, 1999). A partir dos dados de pressão estática e dinâmica, os coeficientes de pressão nas superfícies do modelo são facilmente determinados.

Para ensaios experimentais em modelos reduzidos é essencial que relações de similaridade sejam mantidas (TOLEDO, 1999; ETHERIDGE, 2012). Logo, para a reprodução da camada limite atmosférica correspondente à existente no modelo em escala real, obstáculos geradores de turbulência devem ser fixados no piso do túnel de vento a fim de reproduzir o perfil de vento desejado no ensaio (MATSUMOTO; LABAKI; CARAM, 2011).

Figura 9: Instalação dos tubos plásticos nas orifícios da maquete para aferição da pressão estática nos respectivos pontos.

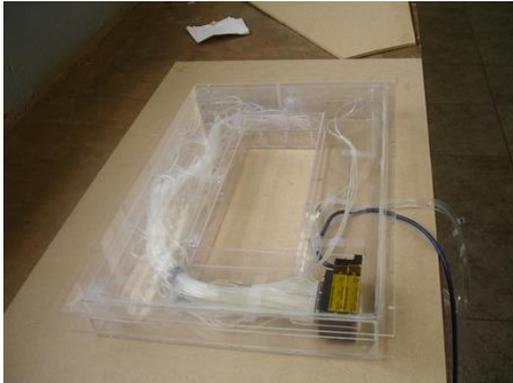


Figura 10: Scanner de pressão com vários canais.



Fonte: A autora (2010).

2.1.3.3. Computational Fluid Dynamics [CFD]

Historicamente, o desenvolvimento da dinâmica de fluidos computacional [CFD] foi impulsionado, nas décadas de 60 e 70, pela comunidade aeroespacial. No entanto, no contexto atual, ferramentas CFD são aplicadas nas diversas áreas do conhecimento que têm o fluxo de um fluido como objeto de estudo (ANDERSON, 1995), como por exemplo: (a) aerodinâmica de veículos e aeronaves; (b) hidrodinâmica de navios; (c) engenharia biomédica; (d) usinas de energia; (e) ambiente interno e externo de edificações, entre outras (ANSONI, 2015).

Os programas CFD são baseados em um conjunto de equações diferenciais que abordam os princípios de conservação da quantidade de movimento (equações de *Navier-Stokes*), conservação de massa e conservação de energia térmica. De acordo com Chen (2009), são amplamente utilizados no estudo do conforto térmico dos usuários e da qualidade do ar interno dos mais variados tipos de edificações.

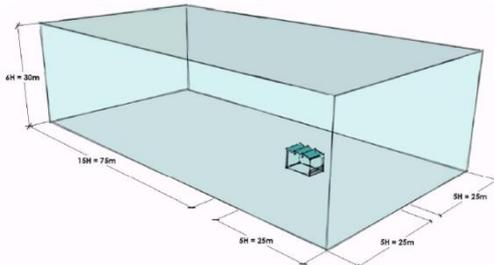
Segundo Etheridge (2012), as principais aplicações de ferramentas CFD no estudo de ventilação natural em edificações consistem: (a) no cálculo dos campos de velocidade e temperatura no interior ou no exterior das edificações; (b) no cálculo das distribuições de pressões e do fluxo nas superfícies das edificações e, por fim, (c) no cálculo das características do fluxo através das aberturas, como por exemplo, a avaliação de coeficientes de descarga.

Fluent, CFX, Phoenics, Flovent, OpenFOAM são exemplos de programas CFD. De acordo com Etheridge (2012), a grande maioria dos programas comerciais são estruturados em três partes: 1) pré-processamento; 2) *solvers* e; 3) pós-processamento. O pré-processamento engloba a definição das condições de contorno, do domínio e da malha computacional. O *solver* consiste na resolução numérica propriamente dita, em que as iterações ocorrem até que a convergência seja atingida. E, por fim, o pós-

processamento caracteriza a transformação da grande quantidade de dados gerados em produtos gráficos de formatos adequados e acessíveis.

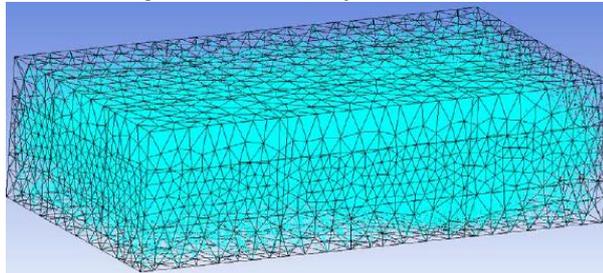
Fortuna (2000) enfatiza que a resolução computacional de um problema de mecânica dos fluidos demanda a definição de um domínio computacional, região em que as equações matemáticas utilizadas serão válidas (Figura 11). Em seguida, esta região é discretizada em pontos. O conjunto de pontos é denominado malha e são nestes pontos que as soluções são obtidas, a partir da aplicação e da resolução das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. (Figura 12). Cóstola e Alucci (2011) enfatizam que quanto maior o refinamento da malha, maior será a precisão dos resultados e a demanda computacional. Além disso, estes mesmos autores ressaltam a importância de se buscar a independência da malha em uma simulação CFD, ou seja, realizar testes de refinamento de malha até que seu refinamento não impacte significativamente nos resultados.

Figura 11: Definição do domínio.



Fonte: Lukiantchuki (2015).

Figura 12: Discretização da malha.



Fonte: Lukiantchuki (2015).

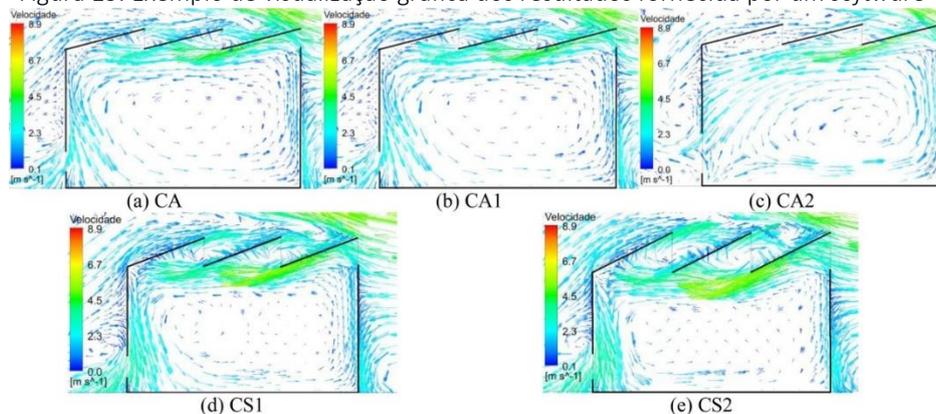
As simulações CFD fornecem basicamente como resultado as distribuições da velocidade, temperatura e pressão do ar, além da concentração de contaminantes e turbulências (WANG; WONG, 2009). Os materiais gráficos produzidos na etapa de pós-processamento podem permitir análises qualitativas e quantitativas. Para as análises qualitativas podem ser gerados planos verticais e horizontais onde são plotados contornos por gradação de cores, para avaliação das velocidades do ar ou distribuições de pressão; e os vetores de intensidade e direção do fluxo de ar (Figura 13 e Figura 14). Estes aspectos podem ser analisados no interior ou no exterior do modelo analisado. A escala de cores representa os valores de velocidade e/ou de coeficiente de pressão correspondentes. Já, para análises quantitativas, é possível o estabelecimento de pontos internos e externos, tais como: (a) coeficientes de pressão nas envoltórias do modelo, (b) coeficientes de pressão, velocidades e distribuições do fluxo de ar no interior e, (c) dados de vazão para o cálculo das taxas de renovações de ar por hora. A aferição das grandezas aerodinâmicas nos pontos previamente estabelecidos, é possível a partir das equações disponíveis no programa.

Blocken (2014) enfatiza que as ferramentas CFD apresentam algumas vantagens em relação aos métodos experimentais (medições em escala real ou em modelos reduzidos), como: informações detalhadas das variáveis do fluxo em todo o domínio de cálculo, já que o modelo é simulado em escala real e; domínio em relação às condições de contorno, além de não apresentar restrições de similaridade. Já, as limitações observadas no uso de ferramentas CFD consistem: (a) na demanda de alta capacidade computacional; (b) na utilização de programas com licenças comerciais de alto custo; e (c) na exigência de um usuário com um bom conhecimento de mecânica dos fluidos (CHEN, 2009; CHEN et al., 2010; BLOCKEN, 2014). Segundo Van Hooff et al., 2011, a validação dos resultados a partir de ensaios experimentais também é imprescindível.

De acordo com Fortuna (2000), os resultados de uma simulação não devem ser adotados sem um questionamento crítico em relação à física do problema. Logo, duas etapas são muito importantes na avaliação de um programa de simulação: (a) de verificação; e (b) de validação (AIAA, 1998⁵ apud Fortuna, 2000).

- **Etapas de verificação:** É observado se o modelo em questão está adequadamente implementado. Esta verificação é realizada a partir da comparação dos resultados fornecidos pelo modelo com valores “de referência” que podem ser obtidos a partir de dados numéricos, analíticos ou experimentais. Esta etapa não busca averiguar a confiabilidade do modelo, mas sim do processo de resolução do problema.
- **Etapas de validação:** São confrontados de modo sistemático os resultados das simulações aos dados experimentais, buscando aferir se o modelo consegue representar o fenômeno físico estudado.

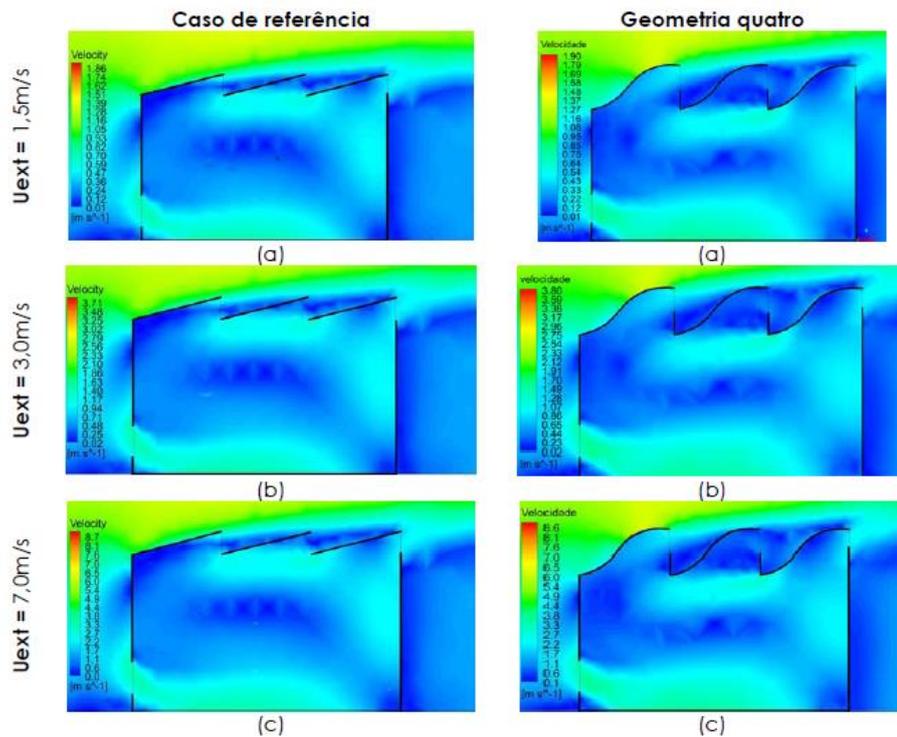
Figura 13: Exemplo de visualização gráfica dos resultados fornecida por um *software* CFD.



Fonte: Lukiantchuki et al. (2016).

⁵ AIAA - American Institute of Aeronautics and Astronautics. *Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations*. Reston, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA G-007-1998.

Figura 14: Exemplo de visualização gráfica dos resultados fornecida por um *software* CFD.



Fonte: Lukiantchukl (2015).

Estudos paramétricos e de otimização da ventilação natural em edificações podem ser potencializados a partir do uso de ferramentas CFD. No entanto, é válido ressaltar a necessidade de se refazer a validação do modelo todas as vezes em que houver mudanças nas características do fluxo (CHEN et al., 2010). Logo, em um estudo paramétrico ou de otimização se valida primeiramente o caso-base e se procede a parametrização ou otimização, desde que não haja mudança significativa nas características do fluxo, o que culminaria em um novo processo de validação.

2.2. Dispositivos de proteção solar

O sombreamento das aberturas é uma estratégia primordial para se alcançar níveis de conforto térmico adequados nas edificações, principalmente no verão em que a insolação é intensa e as temperaturas externas são elevadas. Logo, sua aplicação pode ser observada ao longo da história e nos mais diversos contextos culturais (LECHNER, 2009).

De acordo com Lechner (2009), os pórticos e as colunatas nas culturas grega e romana já cumpriam a finalidade de sombrear tanto o edifício quanto seu entorno imediato, mas é na América do Sul que o uso de elementos de sombreamento se evidencia devido à preponderância de climas quentes e úmidos.

Em razão da localização geográfica do Brasil, o clima sempre representou um fator físico de grande influência em sua arquitetura, exigindo dos arquitetos a busca por meios de controle da luminosidade

e do ganho de calor excessivos (BRUAND,2002). Modificações no desenho das janelas acompanharam os avanços tecnológicos, o que acarretou em uma predominância de poucas aberturas em obras do final do século XVI e na adoção de grandes vãos nas edificações do começo do século XIX (VIANNA; GONÇALVES, 2001). Com o advento da Arquitetura Moderna, a proposição de grandes aberturas nas edificações demandou uma adequação aos países de climas quentes, a partir da utilização de elementos arquitetônicos que cumprissem a finalidade de combater a luminosidade e o calor excessivos (BRUAND, 2002).

Em climas quentes e úmidos, devido à baixa amplitude térmica diária e aos altos níveis de umidade do ar, o uso de grandes aberturas nas edificações pode potencializar o efeito da ventilação natural, mas também intensificar os ganhos térmicos provenientes da radiação solar direta nas superfícies de vedação (translúcidas ou transparentes). Deste modo, o *brise-soleil* (quebra-sóis), idealizado por Le Corbusier, tinha essa como sua principal funcionalidade e foi fortemente incorporado pela arquitetura brasileira (BRUAND,2002).

A proteção de superfícies translúcidas ou transparentes pode ser realizada a partir de dispositivos de sombreamento. Denomina-se dispositivos de sombreamento ou de proteção solar todos os elementos arquitetônicos que têm como principal funcionalidade a proteção do ambiente contra à radiação solar inadequada (RIVERO, 1985). Além disso, estes dispositivos, quando projetados de acordo com a sua funcionalidade, orientação e localidade, podem auxiliar na redução do ganho de carga térmica, dos riscos de ofuscamento no interior dos ambientes e, conseqüentemente, resultar em maiores níveis de conforto visual e térmico aos usuários nas edificações (GIVONI, 1976; FROTA, 2004; VIANNA; GONÇALVES, 2001; LECHNER, 2009; DAVID et al., 2011; BELLIA; DE FALCO; MINICHIELLO, 2013; FREEWAN, 2014).

Tais dispositivos podem ser classificados de acordo com a sua localização (internos, externos ou intermediários, no caso de vidros duplos) ou pela sua mobilidade (fixos ou móveis). Geralmente, os dispositivos de sombreamento externos são apontados como os mais eficazes, pois barram uma significativa parcela da radiação solar incidente antes mesmo que ela seja transmitida ao ambiente interno e se transforme em onda longa (calor), a qual grande parte dos vidros são opacos (RIVERO, 1985; LECHNER, 2009; FROTA, SCHIFFER, 2001). Além disso, os dispositivos de sombreamento externos podem configurar em um importante aspecto na qualidade estética da edificação (LECHNER, 2009).

O dimensionamento dos elementos de sombreamento é realizado a partir da aplicação da carta solar, que consiste em uma representação gráfica bidimensional da trajetória do sol na abóboda celeste para uma determinada latitude, e de um transferidor auxiliar. A partir destas ferramentas é possível identificar, ainda durante a concepção projetual, os períodos de insolação indesejáveis em cada fachada

da edificação ao longo do ano, definir as máscaras de sombra e, assim dimensionar os elementos de proteção solar.

Além da sua eficiência no bloqueio da radiação solar direta indesejável, outros fatores podem ser analisados e assim auxiliar na seleção de um dispositivo de sombreamento como, por exemplo: (a) a sua plasticidade; (b) o quanto o mesmo interfere na luminosidade, (c) na ventilação; ou (d) na disponibilidade de visibilidade do ambiente analisado ao exterior e, por fim, (e) os de custos de instalação, (f) de manutenção e (g) a durabilidade deste elemento arquitetônico.

Portanto, conforme já elucidado, o uso de dispositivos de sombreamento auxilia na redução do ganho térmico nas edificações através, principalmente, das superfícies transparentes. O uso do vidro em tais superfícies resulta em um sistema termicamente frágil, devido à baixa resistência térmica conferida a este material. Deste modo, para que a resolução da problemática do calor seja efetiva em climas quentes e úmidos, é primordial o uso conjugado do sombreamento das aberturas e da ventilação natural, uma vez que esta última tem significativa influência nas cargas de aquecimento e resfriamento de edificações e, conseqüentemente, no desempenho térmico das mesmas (BRUAND, 2002; BITTENCOURT, CÂNDIDO, 2008; CÂNDIDO et al., 2010).

2.3. O uso combinado das estratégias passivas: ventilação natural e sombreamento das aberturas

A combinação da ventilação natural e do sombreamento das aberturas pode representar uma efetiva estratégia projetual em edificações localizadas em climas quentes e úmidos, auxiliando na manutenção dos níveis adequados de conforto térmico aos usuários e, conseqüentemente, na redução do consumo energético derivado do uso de condicionamento artificial (CÂNDIDO et al., 2010). No entanto, a utilização de dispositivos de sombreamento externos pode alterar a distribuição de pressão ao redor das aberturas e, assim, modificar a configuração do fluxo de ar no interior da edificação (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008).

Na literatura científica foram verificados trabalhos que investigaram a integração de elementos arquitetônicos junto às janelas como protetores solares, prateleiras de luz, peitoris ventilados e sacadas (BITTENCOURT; BIANA; CRUZ, 1995; VETTORAZZI et al., 2016; CASTAÑO, 2017; ACCIOLY; OLIVEIRA; BITTENCOURT, 2016; BITTENCOURT et al., 2007; CHAND; KRISHAK, 1971; STATHOPOULOS; ZHU, 1988; CHAND; BHARGAVA; KRISHAK, 1998; MARUTA; KANDA; SATO, 1998; PRIANTO; DEPECKER, 2002; HIEN; ISTIADJI, 2003; AI et al., 2011; HILDEBRAND, 2012; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013; PÉREN et al., 2015; KIRIMTAT et al., 2016). Os trabalhos mais relevantes à contextualização do estudo aqui apresentado serão detalhados na sequência.

Bittencourt, Biana e Cruz (1995) realizaram análises paramétricas, auxiliadas por um software baseado na dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*), para analisar a influência de protetores solares externos (horizontais e verticais) na eficácia da ventilação natural em uma sala de aula padrão (com dimensões de 6m x 6m x 3m de pé-direito). Os parâmetros variados foram: a profundidade e o espaçamento entre os protetores a partir de análises do modelo em planta (avaliações de protetores verticais) (Figura 15) e em corte longitudinal (avaliações de protetores horizontais) (Figura 16). A incidência do vento considerada nas simulações foi a oblíqua (45°) e a velocidade de 3m/s. Os resultados foram qualitativos e demonstraram que a redução do espaçamento entre os protetores promoveu um decréscimo na velocidade do ar, no entanto uma distribuição mais uniforme do mesmo no ambiente interno. Já quanto ao aumento da profundidade dos elementos, notou-se uma baixa influência deste parâmetro no fluxo, mas significativa redução da velocidade do ar.

Figura 15: Matriz de ensaios para avaliação da influência da variação da profundidade e do espaçamento de protetores solares verticais em uma sala de aula padrão.

Referência		PROFUNDIDADE			
		1.20	0.90	0.60	0.30
ESPAÇAMENTO	1.50				
	1.00				
	0.75				
	0.50				

Fonte: Bittencourt; Biana; Cruz (1995).

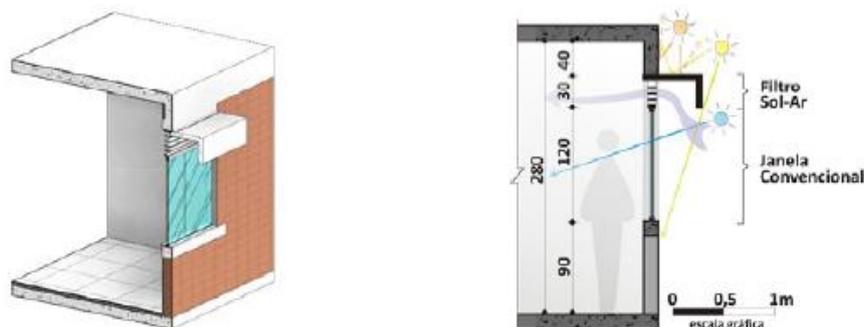
Figura 16: Matriz de ensaios para avaliação da influência da variação da profundidade e do espaçamento de protetores solares horizontais em uma sala de aula padrão.

Referência		PROFUNDIDADE			
		1.20	0.90	0.60	0.30
ESPAÇAMENTO	1.20				
	0.60				
	0.40				
	0.20				

Fonte: Bittencourt; Biana; Cruz (1995).

Vettorazzi et al. (2016) focaram no desenvolvimento de um dispositivo complementar às janelas (Filtro Sol-Ar) que proporcionasse o incremento da eficiência termoenergética da edificação. Este dispositivo de sombreamento em formato de “L” é posicionado logo acima da janela e apresenta venezianas móveis para promover a entrada de ar (Figura 17). Simulações computacionais auxiliadas pelos *softwares Revit 2016 e Flow Design, Daylight Visualizer 2.8.4 e Design Builder 4.2* comprovaram a contribuição deste elemento arquitetônico no desempenho lumínico e da ventilação natural. O desempenho da ventilação natural, em específico, foi analisado segundo os autores de modo qualitativo e inicial, uma vez que foi embasado em apenas duas simulações, a partir das quais observaram a distribuição do fluxo no interior do modelo.

Figura 17: Filtro Sol - Ar



Fonte: Vettorazzi et al. (2016)

Castaño (2017) avaliou os impactos: (a) do uso de distintas tipologias de dispositivos de sombreamento externos (horizontal básico, horizontal afastado, veneziana, tipo “L”, varanda) em aberturas de diferentes áreas ($1,2 \text{ m}^2$; $1,6 \text{ m}^2$ e 2 m^2) e, (b) do muro externo (caso com e sem varanda) na ventilação natural (C_p), nas temperaturas internas e no conforto térmico de uma habitação brasileira térrea e naturalmente ventilada, localizada em clima predominantemente quente e úmido (Natal/ Rio Grande do Norte). Todas variações foram analisadas para a edificação em duas orientações: Norte-Sul (N1) e Leste-Oeste (N2) (Figura 18).

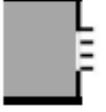
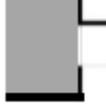
As avaliações ocorreram a partir de simulação computacionais no *software EnergyPlus*. A caracterização da ventilação natural foi realizada no módulo *AirflowNetwork* de tal programa, e os coeficientes de pressão inseridos foram oriundos de testes experimentais em túnel de vento de camada limite atmosférica para os ângulos de incidência do vento de 0° a 359° (com intervalos de variação de 15°).

As principais conclusões foram sintetizadas na Figura 19. As variações nos tamanhos das janelas não representaram alterações significativas nos coeficientes médios de pressão, deduzidos a partir de todos os pontos medidos nas janelas. Já, os dispositivos de sombreamento representaram impactos significativos em todas variáveis observadas (C_p , temperaturas internas e conforto térmico).

Os dispositivos de sombreamento (horizontal básico e varanda) ocasionou a redução dos valores de sobrepressão e subpressão na maioria dos ângulos de incidência avaliados, o que acarretou em uma diminuição de cerca de 25% no fluxo de ar e, conseqüentemente, o incremento da temperatura interna principalmente nos períodos noturnos. O dispositivo tipo “veneziana” apresentou o melhor desempenho térmico dentre as opções avaliadas, uma vez que para a maioria dos ângulos de incidência resultou no aumento dos valores de sobrepressão e sucção, e conseqüentemente, no aumento do fluxo de ar e na diminuição das temperaturas internas.

A inclusão de muros externos gerou um maior impacto nos coeficientes de pressão dentre as diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento analisadas. Todas as faces da edificação ficaram expostas a valores de sucção em todas incidências de vento, isto acarretou em uma redução do fluxo de ar de 50% para o caso com muro externo e de 75% para o caso de muro externo com varanda. Além disso, o aumento das temperaturas internas, configurou estes casos como os piores no que tange ao desempenho térmico das edificações.

Figura 18: Casos avaliados por Castaño (2017).

Elementos externos à fachada		Tamanho de janelas (m)	Orientação	Casos
	Sem elementos externos (R)	1X1,2	N1	R_1X1,2_N1
			N2	R_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	R_1X1,6_N1
			N2	R_1X1,6_N2
		1X2	N1	R_1X2_N1
			N2	R_1X2_N2
Horizontais		1X1,2	N1	H1_1X1,2_N1
			N2	H1_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	H1_1X1,6_N1
			N2	H1_1X1,6_N2
		1X2	N1	H1_1X2_N1
			N2	H1_1X2_N2
		1X1,2	N1	H2_1X1,2_N1
			N2	H2_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	H2_1X1,6_N1
			N2	H2_1X1,6_N2
		1X2	N1	H2_1X2_N1
			N2	H2_1X2_N2
	1X1,2	N1	H3_1X1,2_N1	
		N2	H3_1X1,2_N2	
	1X1,6	N1	H3_1X1,6_N1	
		N2	H3_1X1,6_N2	
	1X2	N1	H3_1X2_N1	
		N2	H3_1X2_N2	
Especiais		1X1,2	N1	E1_1X1,2_N1
		1X1,6	N1	E1_1X1,6_N1
		1X2	N1	E1_1X2_N1
		1X1,2	N1	E2_1X1,2_N1
			N2	E2_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	E2_1X1,6_N1
		N2	E2_1X1,6_N2	
	1X2	N1	E2_1X2_N1	
		N2	E2_1X2_N2	
Muros de fechamento		1X1,2	N1	RM_1X1,2_N1
			N2	RM_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	RM_1X1,6_N1
			N2	RM_1X1,6_N2
		1X2	N1	RM_1X2_N1
			N2	RM_1X2_N2
	Varanda + Muro (E2_M)	1X1,2	N1	E2M_1X1,2_N1
			N2	E2M_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	E2M_1X1,6_N1
			N2	E2M_1X1,6_N2
		1X2	N1	E2M_1X2_N1
			N2	E2M_1X2_N2

Fonte: Castaño (2017).

Figura 19: Impactos na distribuição de pressão, renovações de ar, temperaturas internas e conforto térmico correspondentes aos casos analisados por Castaño (2017).

Casos	Impacto nos Cps	Orient.	Impacto nas Renovações de ar	Impacto nas temperaturas internas	Impacto (Ti) predominante
H1	↓ ↓	N1	↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,1°C
		N2	↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,2°C
H2	↓ ↓	N1	↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,1°C
		N2	↓ 25%	↑ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,1°C
H3	↑ ↑	N1	↕ 25%	↓ ☀ ↓ ☾	↓ ☀ ☾ 0,1°C
		N2	↑ 25%	↓ ☀ ↓ ☾	↓ ☀ ☾ 0,1°C
E1	↓ ↓ ↑ ↑	N1	↑ 25%	↓ ☀ ↕ ☾	↓ ☀ 0,1°C
E2	↓ ↓		↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,1°C
			↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,3°C
RM	↓ ↓ ↓ ↓	N1	↓ 50%	↓ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,2°C
		N2	↓ 50%	↓ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,2°C
E2_M	↓ ↓ ↓ ↓	N1	↓ 75%	↓ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,2°C
		N2	↓ 75%	↓ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,2°C

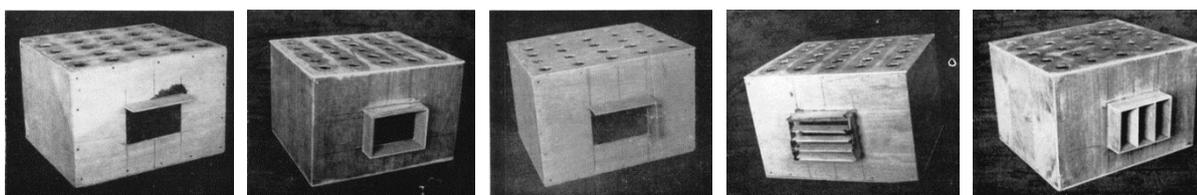
↑ Aumento	↓ Diminuição	☀ Período diurno	☾ Período noturno	
↓ Sobrepressão	↑ Sobrepressão	↓ Sucção	↑ Sucção	↕ Inversão da sobrepressão

Fonte: Castaño (2017).

Chand e Krishak (1971) discutiram a influência de diferentes tipos de dispositivos de proteção solar (horizontal, tipo caixa, tipo L, de múltiplas aletas horizontais e verticais) na velocidade do ar no interior de um modelo reduzido (30cm x 25cm x 20cm) confeccionado na escala de 1:15 e com aberturas (equivalentes a 10% da área do piso) dispostas em faces opostas (Figura 20). As aferições foram realizadas em três níveis (na altura do peitoril, no centro e, no topo das aberturas). Os resultados indicaram significativas alterações na velocidade do ar nas diferentes orientações analisadas (variação de 0° a 90° em intervalos de 15°) quando foram comparados os dados dos modelos com os dispositivos de sombreamentos ao caso de referência (sem a presença de dispositivos). A inclusão de um dispositivo de proteção horizontal logo acima da abertura acarretou no aumento do movimento de ar nos níveis mais elevados da abertura e em um decréscimo desta mesma variável quando aferida na altura do peitoril. Para o dispositivo tipo caixa, a velocidade do ar aumentou quando a incidência de vento era perpendicular à fachada e reduziu nas situações de incidência oblíqua. A proteção tipo L aumentou a velocidade interna do ar em todos os níveis independente do ângulo de incidência de vento analisado.

A inclusão de protetores de múltiplas aletas resultou na diminuição da velocidade do ar em todos os níveis da abertura para incidências oblíquas de vento, no entanto quando o vento incidia perpendicularmente à fachada, houve aumento desta variável nos níveis superiores e redução no nível do peitoril da janela.

Figura 20: Análise da influência de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento na velocidade média do ar.



Fonte: Chand e Krishak (1971)

Prianto e Depecker (2002) investigaram o efeito combinado de alguns elementos arquitetônicos (varanda, tipo da abertura e presença de divisões internas) na velocidade interna do ar em uma sala localizada no segundo piso de uma edificação de dois andares. A ferramenta utilizada para esta análise consistiu em simulações computacionais no *software* N3S⁶. Foram simuladas 46 configurações que combinaram de diferentes formas os elementos arquitetônicos analisados para esta edificação tipo, a fim de tornar a amostra representativa das edificações encontrados em diferentes cenários como, por exemplo: Cayenne, Guiana, França e Samarang, Indonésia. Os principais resultados apresentados por este estudo consistiram na importante influência do tipo de abertura de entrada e da varanda no incremento da velocidade interna do ar e o pouco impacto (para este parâmetro) das variações nas divisões internas.

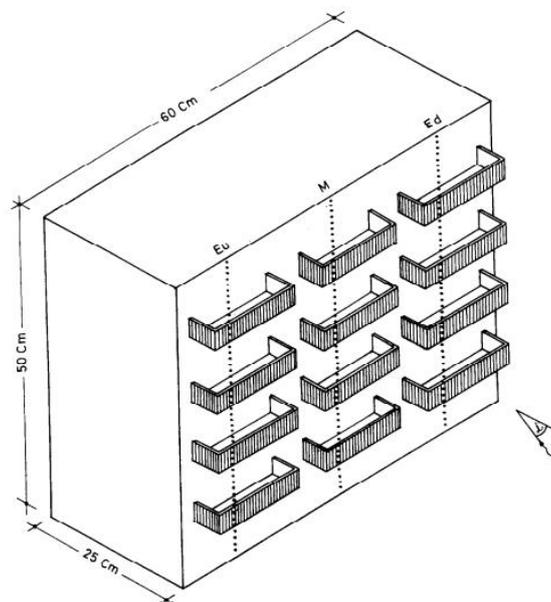
Hien e Istiadji (2003) também observaram importantes variações na velocidade e na distribuição do fluxo de ar no interior de um apartamento residencial em Cingapura, decorrente do uso de sete tipos de dispositivos de sombreamento. O desempenho lumínico e da ventilação natural foram avaliados a partir de simulações nos programas LIGHTSCAPE e PHOENICS (*software* CFD), respectivamente. A metodologia de tal estudo foi composta por duas fases: a primeira consistiu na verificação e validação das simulações a partir de dados de velocidade, temperatura e iluminância medidos durante dois dias (das 9h às 16h) no apartamento avaliado. Já a segunda etapa, foi caracterizada por simulações de sete tipologias de protetores solares para dois momentos pré-determinados. Entre as principais conclusões deste estudo estão: (a) a possibilidade de aumento da velocidade de ar do fluxo incidente quando as

⁶ O N3S é um programa desenvolvido pela LNH de la Direction des Etudes et Recherche d'EDF e distribuído pela SIMULOG. Trata-se de códigos industriais de mecânica e fluídos.

janelas estiverem com as suas respectivas folhas completamente abertas; (b) a redução insignificante, neste mesmo parâmetro, ocasionado pela presença de elementos de sombreamento e, (c) a falta de efetividade de elementos de sombreamento verticais em aprimorar a ventilação e a iluminação naturais.

Chand, Bhargava e Krishak (1998), baseados em ensaios experimentais em túnel de vento, mensuraram os efeitos na distribuição de pressão do vento ocasionados pela presença ou não de sacadas em um modelo de edificação composto por cinco andares sem aberturas, cujo modelo reduzido na escala de 1:30 apresentava 60 x 25 x 50 cm (Figura 21). Os dados de pressão foram aferidos em três eixos distribuídos ao longo da fachada do modelo (um central e dois laterais, próximos as bordas) e a partir destes dados os respectivos coeficientes de pressão foram deduzidos. A distribuição de pressão do vento na face à barlavento apresentou variação, no entanto a face à sotavento não foi afetada de modo relevante pela presença das sacadas nas duas orientações analisadas (vento incidindo a 0° e a 45°).

Figura 21: Modelo analisado por Chand, Bhargava e Krishak (1998)



Fonte: Chand, Bhargava e Krishak (1998).

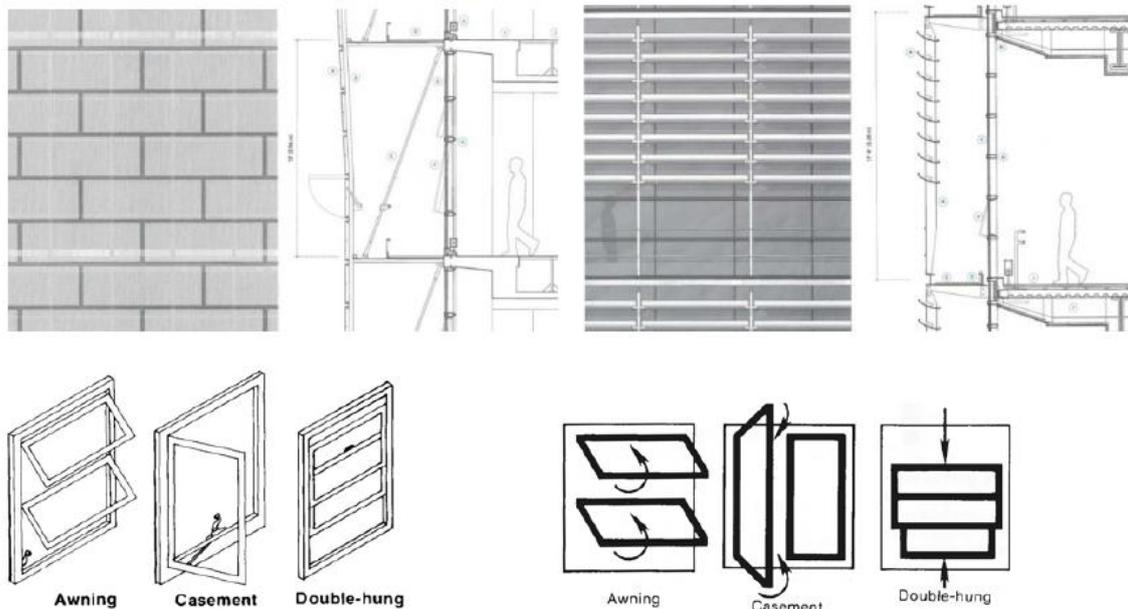
Ai et al. (2011), baseado nos dados experimentais produzidos no estudo de Chand, Bhargava e Krishak (1998), testaram a partir de simulações computacionais em um programa CFD (*Fluent*), a influência na ventilação natural da presença de sacadas em um modelo com aberturas, considerando ventilação cruzada e unilateral e incidências de vento perpendiculares e oblíquas às fachadas. Sendo os impactos analisados a partir de parâmetros como taxa de massa de fluxo e velocidade do ar aferidas a 1m do piso. Os resultados das simulações numéricas indicaram para situação de ventilação unilateral um aumento

na taxa de fluxo de massa de ar e uma redução da velocidade média do ar na altura do plano de trabalho para a maioria dos ambientes. Já, na situação de ventilação cruzada a inclusão das sacadas não resultaram em impactos significativos para ambas as incidências de vento analisadas.

Baseados nos mesmos ensaios de túnel de vento desenvolvidos no estudo de Chand, Bhargava e Krishak (1998), Montarezi e Blocken (2013), apresentaram uma análise sistemática da potencialidade e da compatibilidade de um *software* CFD na predição dos dados de distribuição média de pressão do vento nas fachadas da edificação com e sem a presença de sacadas (nas condições de vento incidindo perpendicularmente e de modo oblíquo) em relação aos dados experimentais. A ferramenta computacional se mostrou precisa na predição dos dados de pressão tanto para situação com e sem a presença de sacadas na fachada à barlavento, nas condições de vento incidindo perpendicularmente e de modo oblíquo. No entanto, grandes discrepâncias entre as duas ferramentas foram observadas na predição dos mesmos dados na face à sotavento na situação de vento oblíquo.

Hildebrand (2012), impulsionado pela falta de informações e de diretrizes projetuais acerca do impacto nos efeitos aerodinâmicos produzidos pela presença de dispositivos de sombreamento externos, elaborou um estudo para avaliar o impacto de tais elementos na velocidade média interna do ar e na distribuição do fluxo. Ensaios experimentais em túnel de vento foram conduzidos para um modelo de sala de aula de 4,25m x 4,5m x 2,9 m, sendo o modelo reduzido reproduzido na escala de 1:8. Foram examinadas duas tipologias de telas de sombreamento de mesma porosidade, se diferenciando apenas na sua geometria. Além disso, três tipos de esquadrias foram variadas (basculante, de abrir e guilhotina) (Figura 22). Os ensaios experimentais embasaram o estudo individual e combinado das variações a partir da aferição da velocidade do ar por meio de anemômetros e na visualização do comportamento de distribuição do fluxo por meio de ensaios de fumaça, para diferentes ângulos de incidência de vento (0°, 45° e 90°). Os resultados indicam a importância da escolha criteriosa dos tipos de janelas ou de sombreamentos por parte dos arquitetos, uma vez que tais escolhas podem resultar em impactos mínimos ou significativos na velocidade e na distribuição de ar no interior de um ambiente. As principais conclusões deste estudo foram: (a) a tipologia da janela foi determinante na forma, direção e intensidade da velocidade de ar interna; (b) telas de sombreamento promovem a redução da velocidade; (c) a escolha da orientação, do espaçamento e das dimensões das aletas dos dispositivos de sombreamento impactam significativamente no fluxo de ar; (d) telas de sombreamento instaladas em frente de janelas de abrir ou de projeção impactam na distribuição e velocidade do fluxo de ar.

Figura 22: Tipologias das telas de sombreamento e das esquadrias avaliadas por Hildebrand (2012).



Fonte: Hildebrand (2012).

Kirimtat et al. (2016) conduziram uma minuciosa revisão bibliográfica que compreendeu 109 artigos publicados entre 1996 e 2015 sobre as variadas formas de modelagem de elementos de sombreamento em programas de simulação computacional. Devido à expressiva utilização do condicionamento artificial nas edificações, apenas um estudo (HIEN; ISTIADJI, 2003) englobado por esta revisão abordou a integração de dispositivos de sombreamento às estratégias de ventilação natural. Os demais estudos citados analisaram o impacto dos elementos de sombreamento nos desempenhos térmico, lumínico ou energético de edificações.

Omrani et al. (2017) investigaram a influência de sacadas na ventilação natural e no desempenho térmico de um edifício residencial de 36 andares na Austrália. Medições *in loco* foram realizadas em um apartamento do quinto andar deste edifício. A velocidade do ar foi aferida em seis diferentes pontos localizados na sala e nas sacadas. O apartamento, composto por duas sacadas, permitiu que tais medições avaliassem os dois sistemas de ventilação natural (cruzada e unilateral). Os dados medidos foram utilizados para validar o modelo de simulação elaborado em um programa CFD e uma boa concordância foi verificada entre ambos. Deste modo, a partir das simulações computacionais foram avaliadas as influências da variação individual e combinada dos seguintes parâmetros: modos de ventilação natural (unilateral e cruzada); tipos de sacadas (aberta ou semi-enclausurada); profundidades das sacadas expressa como uma porcentagem do comprimento da área da sala (10%, 20%, 30% e 40%) e quatro direções de vento (0°, 45°, 90° e 180°); na velocidade do ar e no conforto térmico. As principais conclusões destas avaliações apontaram que: (a) o aumento na profundidade da sacada resulta na

diminuição da velocidade do ar; (b) em relação ao tipo de sacada, maiores velocidades internas do ar foram encontradas no modelo aberto quando comparado ao caso semi-enclausurado; (c) em relação à variação da direção do vento, maiores velocidades do ar foram observadas para incidências perpendiculares à fachada enquanto que menores ocorreram quando a incidência de vento foi paralela à fachada; (d) análises de sensibilidade indicaram que dentre os parâmetros variados, os mais sensíveis estavam relacionados às alterações na direção de vento; (e) em relação ao desempenho da ventilação natural, o modo de ventilação cruzada se mostrou superior, e o de ventilação unilateral mais sensível à variação dos parâmetros.

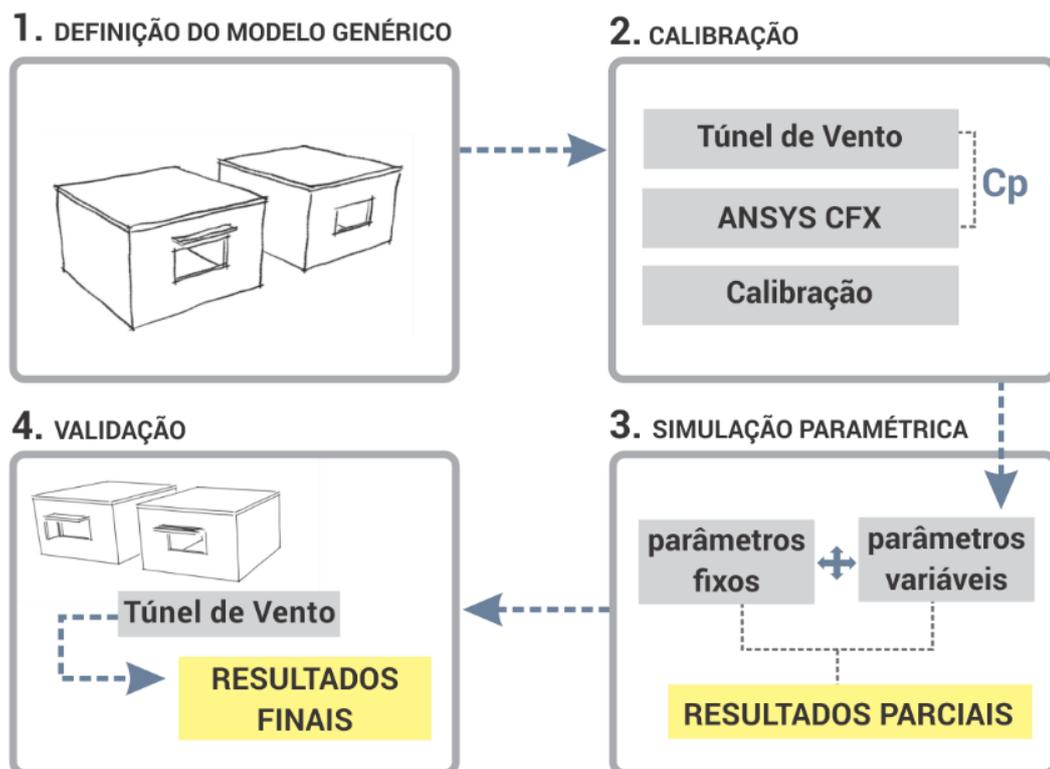
A partir destes estudos, é possível observar que o uso de dispositivos de sombreamento apresenta impactos significativos, mas ainda pouco explorados, no desempenho da ventilação natural em edificações. Embora a distribuição de pressão na envoltória da edificação se configure como o parâmetro motriz para ocorrência da ventilação natural, nota-se uma preponderância na literatura científica sobre esta temática em adotar geometrias lisas como objeto de estudo. Poucas são as investigações observadas acerca do impacto neste parâmetro, ocasionados pela presença de detalhes nas fachadas da edificação (MONTAZERI; BLOKEN, 2013), tais como dispositivos de sombreamento externos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 23 apresenta um esquema geral do método. Nesta investigação, o impacto de diferentes dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural será avaliado a partir da análise das distribuições de pressões (externas e internas) em um modelo genérico. Este modelo será ensaiado em Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica e simulado em um *software* de fluidodinâmica, o Ansys CFX® (ANSYS, 2012). Os dados oriundos dos ensaios experimentais serão utilizados para a calibração da ferramenta numérica. Após a calibração, as características projetuais dos dispositivos de sombreamento serão variadas parametricamente no *software* em questão. Por fim, os casos que apresentarem impactos relevantes no desempenho da ventilação natural serão ensaiados em Túnel de Vento para fins de validação dos dados.

O método se subdividirá em quatro etapas: **(1) Definição do modelo genérico;** **(2) Calibração;** **(3) Simulação Paramétrica,** e **(4) Validação.** Na sequência, as etapas serão apresentadas em detalhes.

Figura 23: Esquema geral do método.



Fonte: A autora (2018).

3.1. Etapa 01: Definição do modelo genérico

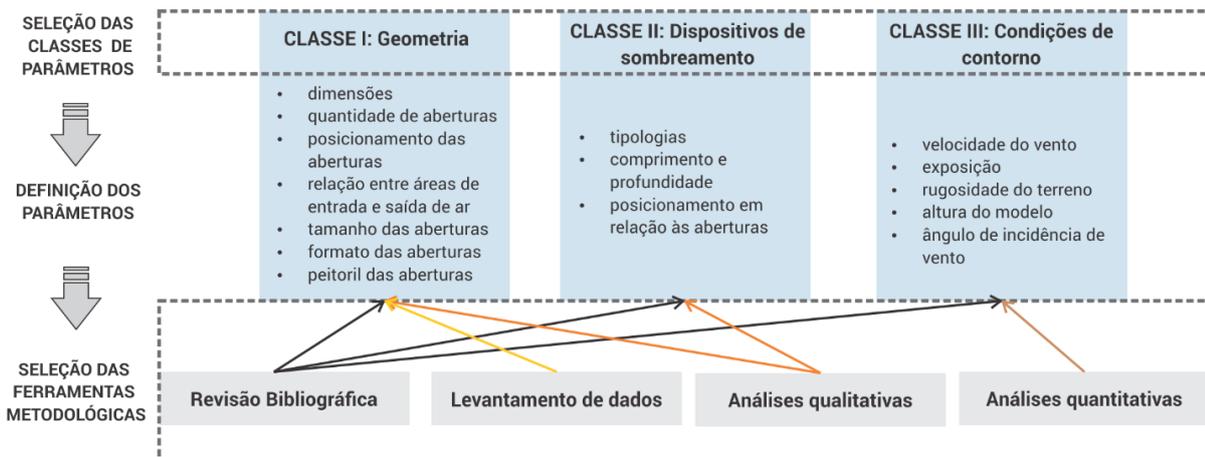
A primeira etapa metodológica desta pesquisa consiste na definição do modelo genérico. Dentro desta etapa foram definidos os casos que serão ensaiados no Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo [IPT] e, posteriormente, replicados no *software* baseado na dinâmica dos fluidos computacionais, o Ansys CFX®.

As definições dos parâmetros do modelo genérico são apresentadas em detalhes no capítulo subsequente “4. Resultados Parciais”. Neste subitem, é abordado apenas o procedimento metodológico para a definição deste modelo.

3.1.1. Procedimento metodológico para a definição do modelo genérico

A Figura 24 ilustra o procedimento metodológico para a definição do modelo genérico composto por três etapas: (1) **Seleção das classes de parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno;** (2) **Definição dos parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno;** (3) **Seleção das ferramentas metodológicas para a determinação de cada parâmetro.** Na sequência, tais etapas são apresentadas em detalhes:

Figura 24: Procedimento metodológico para a definição do modelo genérico.



Fonte: A autora (2018).

3.1.2. Seleção das classes de parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno

O modelo genérico terá a função de embasar avaliações experimentais e numéricas realizadas, respectivamente, em túnel de vento de camada limite atmosférica e por meio de simulações CFD. Deste

modo, o critério aplicado para a seleção dos seus parâmetros se restringe aos apontados como mais relevantes pela literatura científica para a sua respectiva modelagem nas ferramentas metodológicas descritas. Portanto, foram definidas três grandes classes, que agrupariam os parâmetros de interesse: Classe I: Geometria; Classe II: Dispositivos de sombreamento e; Classe III: Condições de contorno.

3.1.3. Definição dos parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno

Após a seleção das classes, os parâmetros relacionados a cada classe foram definidos. No total, foram selecionados 15 parâmetros.

A Classe I: Geometria, englobou características tanto do modelo quanto das aberturas, tais como: (a) dimensões do modelo (comprimento, largura e pé-direito); (b) quantidade de aberturas; (c) posicionamento das aberturas na fachada; (d) relação entre áreas de entrada e de saída de ar; (e) tamanho das aberturas; (f) formato das aberturas e (g) peitoril das aberturas.

A Classe II: Dispositivos de sombreamento, considerou os elementos necessários para a caracterização dos elementos de sombreamento externos, tais como: (a) tipologia; (b) dimensões (comprimento e profundidade) e; (c) posicionamento dos elementos em relação às aberturas (se serão localizados no limite da abertura ou se apresentarão algum afastamento).

Por fim, a Classe III: Condições de contorno, faz referência aos parâmetros que descrevem a situação em que o modelo genérico será avaliado como, por exemplo: (a) velocidade do vento; (b) grau de exposição do modelo (modelo isolado ou que considere o entorno); (c) rugosidade do terreno (terreno livre de interferência, subúrbio, urbano, entre outros); (d) altura em que o modelo será avaliado (térreo ou em altura) e, por fim, (e) ângulos de incidência do vento.

3.1.4. Seleção das ferramentas metodológicas

Após a definição dos parâmetros, que caracterizam o modelo e suas condições de contorno, foram selecionadas ferramentas metodológicas para auxiliar em sua definição, sendo elas: (a) revisão bibliográfica; (b) levantamento de dados; (c) análises qualitativas e; (d) análises quantitativas. O detalhamento e resultados das análises obtidos a partir da aplicação destas ferramentas constam no capítulo subsequente, “4. Resultados Parciais”.

(a) Revisão bibliográfica: A revisão da literatura científica foi uma ferramenta metodológica que permeou a escolha de todos os parâmetros considerados na definição do modelo genérico em

questão. Esta revisão englobou importantes referências nacionais e internacionais acerca das temáticas de ventilação natural em edificações, sombreamento das aberturas através de elementos externos e o uso combinado de tais estratégias passivas, principalmente em climas quentes e úmidos. Referências relevantes sobre modelos genéricos utilizados para avaliação de ventilação natural em edificações a partir de ensaios experimentais em túnel de vento, simulações fluidodinâmicas e ensaios qualitativos em mesa d' água também foram consultadas. Ademais, pesquisas anteriores desenvolvidas no Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos correlatas a esta pesquisa também subsidiaram as escolhas.

- (b) **Levantamento de dados:** Para embasar as dimensões geométricas do modelo genérico desta pesquisa foram analisados 20 projetos residenciais entre eles, habitações unifamiliares e multifamiliares, locados em diferentes porções do território brasileiro (em municípios dos estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso). Estes projetos estão catalogados em um banco de dados desenvolvido nas pesquisas de Rossi (2016); Anchieta (2016) e Favretto (2016). Foram consultadas também pesquisas como as de Santesso (2017) e Neves et al. (2017) que avaliaram e catalogaram características projetuais de saletas comerciais em edifícios de escritórios em São Paulo/SP.

- (c) **Análises qualitativas:** A definição das características das aberturas (dimensões e formato), assim como a caracterização dos dispositivos de sombreamento externos foi auxiliada por ensaios qualitativos realizados na mesa d' água do Laboratório de Conforto Ambiental do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos (IAU-USP). Como citado no capítulo de "1. Fundamentação teórica", a mesa d' água é um modelo analógico hidráulico com grande potencial para análises qualitativas da ventilação natural por ação dos ventos em edificações (TOLEDO; PEREIRA, 2003). Após estabelecidas as tipologias e as dimensões dos dispositivos de sombreamento externos, as suas máscaras de sombra foram definidas e plotadas sobre cartas solares elaboradas para todo território brasileiro (com latitudes abrangendo de 4°Norte a 32°Sul, com intervalos de 4°), a fim de caracterizar o potencial de sombreamento de tais dispositivos.

- (d) **Análises quantitativas:** Esta ferramenta metodológica foi aplicada para o estudo da velocidade média de ventos do território brasileiro. Inicialmente, partiu-se dos Atlas de potencial eólico

brasileiro de 2001 (AMARANTES et al., 2001) e sua atualização de 2017 (CEPEL, 2017). Os dados reunidos na primeira versão do Atlas são resultantes de uma modelagem numérica com o *MesoMap* e seus resultados representam regimes de ventos na altura de 50m. Já, na versão atualizada, a partir da implementação de um novo modelo numérico, o *Brams* (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*), foi possível estabelecer os regimes de ventos para as alturas de 30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200m para um ano representativo (2013). Os dados numéricos foram comparados à dados medidos e ajustes foram realizados. No entanto, mesma na nova versão, a menor cota de dados de regime de ventos é a de 30m, o que não é coerente para a análise deste trabalho. Logo, é importante ressaltar que os Atlas balizaram apenas o delineamento das cidades com maiores e menores potenciais eólicos nas macrorregiões brasileiras (norte, nordeste, centro-oeste, sudeste e sul), sendo que a partir deste momento toda a análise foi embasada nos arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012). Tais arquivos climáticos, atualizados em 2016 pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LabEEE – UFSC), têm como base medições meteorológicas realizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), cuja aferição dos regimes de vento ocorrem na altura de 10m. A partir deles, foram identificados os intervalos de velocidade média de ventos mais preponderantes para as referidas cidades, a fim de configurar um intervalo representativo para o território brasileiro.

3.2. Etapa 02: Calibração

A etapa de calibração será dividida em três sub etapas: (1) ensaios no Túnel de Vento; (2) simulações no *software* Ansys CFX® e; (3) Calibração.

3.2.1. Ensaio no Túnel de Vento

Detalhes acerca da preparação dos modelos para os ensaios em túnel de vento, assim como a ordem de ensaios, são apresentados no capítulo subsequente, “4. Resultados Parciais”. Neste item, a descrição se restringe ao procedimento metodológico desta etapa.

Os ensaios do modelo genérico serão realizados no Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo [IPT]. O impacto dos dispositivos de sombreamento externos nas distribuições de pressões (externas e internas) será averiguado a partir de aferições nos modelos **COM e SEM** tais dispositivos.

Para viabilizar estes ensaios foi confeccionada uma maquete física do modelo genérico em escala reduzida. A escala de construção desta maquete foi definida de modo a respeitar às exigências em relação à área de obstrução da seção de ensaio do Túnel de Vento⁷. Após definida a escala, a maquete teve seus componentes planejados no AutoCAD®. Por fim, será confeccionada em MDF no Laboratório de Modelos e Maquetes do IAU-USP com auxílio dos técnicos para a manipulação das cortadoras a *laser* e também para a devida montagem do modelo reduzido.

O modelo será ensaiado variando a sua orientação em relação ao vento incidente. E para garantir que estas tomadas de pressão ocorram de modo adequado, as superfícies do modelo serão perfuradas. Nestes furos serão instalados tubos plásticos que irão se conectar a um *scanner* de pressão de vários canais, possibilitando assim a aferição simultânea da pressão estática nos diferentes pontos. A conexão deste *scanner* a uma placa de aquisição de dados em um computador garantirá o conhecimento dos dados de pressão em cada ponto. Como serão aferidas as variações nas distribuições de pressões (internas e externas) o modelo apresentará paredes duplas, permitindo assim a dupla instrumentação. Por fim, estes dados de pressão serão utilizados para determinar os coeficientes de pressão (C_p) em cada ponto medido na envoltória e no interior do modelo.

3.2.2. Simulações no Ansys CFX®

Nesta sub etapa os modelos simulados no túnel de vento serão replicados no *software* Ansys CFX®. Os modelos baseados na dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) se fundamentam nas equações diferenciais de *Navier-Stokes* e são amplamente utilizados no estudo do conforto térmico, qualidade do ar, entre outros (CHEN, 2009). As simulações CFD podem fornecer como resultado: a velocidade interna do ar, temperatura e pressão do ar, além da concentração de contaminantes e turbulências (WANG; WONG, 2009). Embora os *softwares* CFD e ensaios de modelo reduzido em Túnel de Vento configurem fontes primárias de obtenção de dados de coeficientes de pressão (C_p) (CÓSTOLA, BLOCKEN, HENSEN, 2009), Van Hooff et al., 2011 pontuam que a validação dos resultados oriundos das simulações numéricas a partir de ensaios experimentais é imprescindível.

⁷ O túnel de vento do IPT apresenta 6m² de seção transversal e é indicado que a porcentagem de obstrução ocasionada pela maior face do modelo não seja superior a 5% da área da seção.

3.2.3. Calibração

Nesta etapa os dados de pressão (os Coeficientes de Pressão do Vento - C_p) oriundos dos ensaios experimentais em Túnel de Vento serão utilizados para calibrar a ferramenta de simulação numérica. Logo, serão confrontados os dados experimentais aos numéricos de modo a conseguir uma boa convergência entre ambos. A boa convergência entre os dados indicará que o refinamento da malha de discretização do domínio na modelagem computacional está adequada para a representação do fenômeno estudado.

Após realizado este processo de calibração do *software* CFX, este poderá ser utilizado de forma independente do Túnel de Vento nas simulações paramétricas, desde que não haja modificações significativas na geometria do modelo e nas condições de contorno, o que acarretaria na necessidade de um novo processo de calibração.

3.3. Etapa 03: Simulação paramétrica

A etapa de simulação paramétrica no *software* Ansys CFX® se iniciará no Brasil e será concluída no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Lisboa, Portugal sob a supervisão do Prof. Dr. Fernando Marques da Silva. A análise dos dados resultantes desta etapa também será assessorada pelo referido professor durante esta estadia no LNEC, em virtude do seu extenso conhecimento sobre os assuntos de ventilação natural, principalmente, relacionados à ensaios no túnel de vento.

Nesta etapa, serão realizadas simulações paramétricas a fim de identificar as características projetuais dos dispositivos de sombreamento externos que apresentam um maior impacto no desempenho da ventilação natural. Conforme supracitado, as dimensões do modelo genérico serão configuradas como parâmetros fixos. Inicialmente, os parâmetros variáveis serão: (a) o ângulo de incidência do vento; (b) a tipologia dos dispositivos de sombreamento externos; (c) a variação de suas respectivas dimensões; e (d) o posicionamentos em relação às aberturas (se estarão dispostos no limiar ou se apresentarão algum afastamento em relação aos limites das aberturas). Variações acerca do formato, do posicionamento ou das áreas efetivas das aberturas poderão ser inclusas caso sejam identificadas pertinências durante o processo, e se tenha tempo hábil para a avaliação destes impactos.

A definição dos parâmetros a serem variados assim com as suas respectivas faixas de variação ocorrerão a partir da revisão bibliográfica, das pesquisas anteriores realizadas no IAU-USP, e das avaliações dos primeiros ensaios realizados no túnel de vento. Os critérios de seleção de tais variações serão: a relevância no impacto na ventilação natural ou na aplicação arquitetônica.

Sucessivas análises comparativas entre os dados obtidos nas simulações do modelo genérico (**SEM** e **COM** a presença dos dispositivos de sombreamento analisados) possibilitarão aferir o impacto dos referidos dispositivos nas distribuições de pressões (externas e internas). Além disso, o impacto na distribuição e na velocidade do fluxo do ar no interior do modelo e, na taxa de renovação de ar por hora (dado obtido a partir dos valores de vazão) poderão ser observados, uma vez que estes dados se configuram como dados de saída do CFX.

3.4. Etapa 04: Validação

Nesta etapa, as configurações de dispositivos de sombreamento que apresentarem maior relevância nas simulações paramétricas serão simuladas no Túnel de Vento do IPT, a fim de validar os valores de pressão (C_p) alcançados nas simulações numéricas. De acordo com Fortuna (2000), os resultados de uma simulação não devem ser adotados sem um questionamento crítico em relação à física do problema. Logo, a etapa de validação é muito importante na avaliação de um programa de simulação. Nela, são confrontados de modo sistemático os resultados das simulações aos dados experimentais, buscando aferir se o modelo consegue representar o fenômeno físico estudado (AAIA, 1998 *apud* Fortuna, 2000).

Portanto, os resultados serão organizados em quadros, tabelas, gráficos e figuras a fim de facilitar a identificação de padrões e variações. A comparação entre as duas ferramentas estudadas será realizada a partir de um gráfico indicando a porcentagem (%) de erro adotada nas análises, com base em importantes pesquisas científicas sobre validação numérica e experimental, como: Montazeri e Blocken (2013), Ramponi e Blocken (2012), Calautit e Hughes (2014), entre outros. As conclusões destas análises apresentarão a ordem de grandeza do impacto de características projetuais de diferentes tipos de dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural e permitirão o desenvolvimento de recomendações práticas de projeto acerca da aplicação dos casos específicos de dispositivos de sombreamento em edificações que fazem uso da ventilação natural.

3.5. Forma de análise dos resultados

As análises comparativas dos resultados das simulações numéricas e dos ensaios experimentais dos modelos – **COM** e **SEM** a presença de dispositivos de sombreamento – resultarão na averiguação de dois importantes aspectos: (a) no impacto das características projetuais de tais dispositivos nas distribuições de pressões internas e externas e; (b) na precisão da ferramenta numérica em predizer, os coeficientes de pressão (externos e internos) para os casos analisados, quando comparada à ferramenta experimental.

Das simulações paramétricas no *software* CFX poderão ser obtidos resultados qualitativos e quantitativos do fluído em escoamento:

- Para análise do desempenho qualitativo da ventilação, serão gerados planos verticais e horizontais onde serão plotados: contornos por gradação de cores, para as velocidades do ar e os vetores de intensidade e direção do fluxo de ar. Além disso, será possível plotar a distribuição dos coeficientes de pressão (Cps) e a intensidade e direção do fluxo de ar na superfície do modelo. Será utilizada uma escala em que cada cor representa um valor de velocidade e/ou de coeficiente de pressão correspondentes.
- Para a análise quantitativa será possível obter diferentes variáveis a partir da localização de pontos internos e externos, tais como: (a) coeficientes de pressão nas envoltórias do modelo, (b) coeficientes de pressão, velocidades e distribuições do fluxo de ar no interior e, (c) dados de vazão, o que possibilitará o cálculo da taxa de renovações de ar por hora. Em cada ponto, será possível aferir a velocidade do fluxo de ar, através das equações disponíveis no *software*, visando uma análise geral da ventilação natural.

A avaliação da sensibilidade dos parâmetros individuais ou da combinação dos mesmos – orientação em relação ao vento incidente e a variação das características dos dispositivos e, se possível, das áreas efetivas de abertura – será analisada a partir da comparação sistemática do caso analisado (**COM** dispositivo de sombreamento) em relação ao caso de referência (**SEM** dispositivo de sombreamento) a fim de identificar qual parâmetro ou quais combinações de parâmetros refletirão em impactos mais significativos na ventilação natural.

4. RESULTADOS PARCIAIS

Neste capítulo, apresentam-se as definições da primeira etapa metodológica desta pesquisa de Doutorado, “Definição do modelo genérico”. O modelo genérico será caracterizado por uma geometria regular (paralelepípedo) e com dimensões equivalentes a um ambiente médio de edificações brasileiras (residenciais). A escolha por uma forma simples tem como objetivos: (a) tornar a geometria do modelo fixa; (b) simplificar o modelo, a fim de minimizar o efeito de parâmetros adicionais; (c) priorizar nas análises a quantificação do impacto dos dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural; e, por fim, (d) fornecer regras gerais acerca de tais impactos na eficácia da ventilação natural, de modo que as conclusões alcançadas não fiquem estritamente dependentes do caso analisado.

A caracterização deste modelo genérico, apresentada a seguir conforme a metodologia adotada (ver item 3.1.1) e sintetizada na Tabela 5, compreende parâmetros fixos e variáveis. De acordo com Passos; Lamenha; Bittencourt (2017), devido à complexidade inerente ao fenômeno da ventilação natural é necessário fixar alguns parâmetros a fim de permitir a investigação de outros, no caso deste estudo em específico, dos dispositivos de sombreamento externos. Na sequência, são apresentados, em detalhes, os parâmetros pertencentes a cada classe. As análises qualitativas (a partir de ensaios em mesa d’ água e da elaboração das máscaras de sombra) são apresentadas em um item separado devido à sua complexidade.

Tabela 5: Tabela - resumo da definição do modelo genérico.

CLASSES DE PARÂMETROS	PARÂMETROS	VALORES
I. Geometria	Dimensões do modelo	3m x 3m x 2,7m
	Quantidade de janelas	Duas aberturas (dispostas em faces opostas)
	Posicionamento das aberturas	Centralizada nas fachadas
	Relação entre as aberturas de entrada e saída de ar	Mesma área
	Tamanho das aberturas	1m x 1m
	Formato das aberturas	Quadradas
	Peitoril da abertura	1,1m
II. Dispositivos de sombreamento	Tipologia	Horizontal (DSH), Vertical (DSV), Combinado (DSC)
	Posicionamento em relação às aberturas	Posicionados no limiar das aberturas
	Dimensões (comprimento e profundidade)	0,5m de profundidade
III. Condições de contorno	Velocidade	0 – 5 m/s
	Exposição	Isolado
	Rugosidade	Área aberta e plana
	Altura em que o modelo será avaliado	Térreo
	Ângulos de incidência do vento	0° - 90° (intervalos de 15°)

Fonte: A autora (2018).

4.1. Classe I: Geometria

Esta classe reúne parâmetros relacionados às características geométricas tanto do modelo quanto de suas aberturas, sendo elas: (a) Dimensões do modelo (comprimento, largura e pé-direito); (b) Quantidade de janelas; (c) Relação entre as áreas de entrada e de saída de ar; (d) Posicionamento das janelas nas fachadas; (e) Formato das aberturas; (f) Tamanho das aberturas e por fim, (g) Peitoril da janela. As ferramentas metodológicas para embasar tais definições consistiram em revisão bibliográfica; levantamento de dados e; ensaios qualitativos.

4.1.1. Dimensões do modelo

Inicialmente, idealizava-se uma forma cúbica para caracterizar o modelo genérico. No entanto, muitos são os trabalhos encontrados na literatura científica que fazem uso desta forma como objeto de estudo para análises do desempenho da ventilação natural. Logo, visando à obtenção de regras gerais acerca dos impactos dos dispositivos de sombreamento na ventilação natural, de modo que as conclusões alcançadas não fiquem estritamente dependentes do caso analisado, buscou-se definir um modelo cujas as dimensões equivalassem a um ambiente médio de edificações residenciais brasileiras. Logo, as dimensões de largura, comprimento e pé-direito do modelo genérico foram definidas a partir de revisão bibliográfica e de levantamento de dados de três grupos de informação: (1) Modelos fundamentais experimentais (Evola & Popov, 2006; Meroney, 2009; Karava et al, 2011, entre outros); (2) Modelos residenciais de pesquisas anteriores (Rossi, 2016; Anchieta, 2016; Favretto, 2016); e (3) Modelos de edifícios de escritórios de pesquisas anteriores (Santesso, 2017; Neves et al., 2017). A primeira, apoiou-se em modelos encontrados na revisão da literatura que foram utilizados em análises experimentais, sendo seus dados aplicados ou não, posteriormente, para análises numéricas em ferramentas CFD. Já a segunda e a terceira, consistiram em levantamentos de dados em algumas pesquisas que catalogaram projetos residenciais e de edifícios de escritório, principalmente saletas de escritórios. Após a verificação destas fontes, optou-se que as dimensões do modelo genérico fossem iguais as propostas por Accioly; Oliveira e Bittencourt (2016): 3m x 3m x 2,7m (largura x comprimento x pé-direito).

4.1.1.1. Modelos fundamentais experimentais

Os modelos experimentais (escala reduzida e escala real) são amplamente utilizados na validação de casos teóricos e numéricos, uma vez que consistem em uma predição mais realista. Apresentam como limitações o alto custo e tempo demandados para sua execução. O problema da escala, no caso dos modelos experimentais de escala reduzida, pode se configurar em uma barreira na avaliação do

fenômeno em casos de geometrias complexas (CHEN, 2009). De acordo com Blocken (2014), os estudos conduzidos por Meroney e seus companheiros foram os percussores na avaliação sistemática que confronta dados de simulações numéricas aos dados oriundos de testes em Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica (CLA).

Ramponi e Blocken (2012) enfatizam a importância e a escassez de estudos de sensibilidade, genéricos e detalhados para simulações CFD que avaliam ventilação cruzada. Diante desta lacuna, os autores desenvolvem uma revisão da literatura de modo a identificar estudos de ventilação cruzada utilizando simulações CFD (considerando a abordagem “coupled”⁸). Tendo em consideração o objetivo deste trabalho, utilizou-se a tabela-resumo da revisão de literatura elaborada por Ramponi e Blocken (2012) como marco inicial, selecionando, por sua vez, somente os estudos genéricos que foram utilizados para a validação de simulações numéricas e com dados oriundos de ensaios em Túnel de Vento (Tabela 6).

Todos os estudos genéricos, citados na revisão de tais autores, consistiram em análises tridimensionais, de modelos isolados e compostos por uma única zona (KATO et al., 1992; KURABUCHI et al., 2000; LEE et al., 2005; EVOLA & POPOV, 2006; HU; OBHA; YOSHIE, 2008; KOBAYASHI et al., 2009; MERONEY, 2009; KOBAYASHI et al., 2010; NIKAS; NIKOLOPOULUS; NIKOLOPOULUS, 2010; LARSEN et al., 2011), sendo que apenas em um trabalho foi desenvolvida uma análise para o modelo isolado e em grupo (CHEUNG & LIU, 2011). Os trabalhos mais relevantes à contextualização do estudo aqui apresentado serão detalhados na sequência.

⁸ De acordo com Ramponi e Blocken (2012), simulações CFD que avaliam ventilação cruzada em modelos com grandes aberturas podem contar com duas formas de modelagem da interação do fluxo interno com o externo: a “coupled” e a “decoupled”. A primeira abordagem é caracterizada por apenas uma geometria e um domínio computacionais e as janelas são consideradas abertas, logo o fluxo interno e externo são resolvidos de modo acoplado. Já, na “decoupled” são consideradas duas geometrias e dois domínios computacionais, uma para a resolução do fluxo interno e outra para o cálculo do fluxo externo. Nesta abordagem, o modelo é considerado selado, ou seja, não apresenta aberturas. Deste modo, primeiro é avaliado o fluxo externo e na sequência os coeficientes de pressão obtidos nesta avaliação inicial são utilizados como condições de contorno na avaliação do fluxo interno na segunda geometria. Os mesmos autores reforçam que a primeira abordagem (“coupled”) é a mais utilizada, uma vez que a “decoupled” pode agregar erros quando utilizada na avaliação de modelos com grandes aberturas, uma vez que a distribuição de pressão considerada não considera as aberturas, assumindo que a energia cinética na janela a barlavento é dissipada além de desconsiderar a alteração na pressão dinâmica decorrente da passagem do fluxo pelas aberturas (RAMPONI; BLOCKEN, 2012).

Tabela 6: Estudos genéricos com validação a partir de dados experimentais oriundos de ensaios em Túnel de Vento.

	AUTORES	REFERENCIA	ESTUDO	CONFIGURAÇÃO	VALIDAÇÃO	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE
1	Kato et al. (1992)	21	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Geometria da edificação
2	Straw et al. (2000)	51	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (FS)	**
3	Kurabuchi et al (2000)	52	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Modelo de turbulência
4	Bartzanas et al (2002)	53	Genérico	3D/Isolado/SZ	N	Direção do vento, Telas
5	Mistriotis & Briassoulis	54	Genérico	2D/Isolado/SZ	N	Malha, geometria da edificação (aberturas)
6	Shkylar & Arbel (2004)	55	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (FS)	Direção do vento
7	Hu et al. (2005)	57	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Modelo de turbulência
8	Lee et al. (2005)	58	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Malhas
9	Evola & Popov (2006)	41	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Malhas
10	Chang (2006)	3	Genérico	3D/Hedge c/SZ d	Nf	Malha, altura da cobertura, porosidade e posição
11	Wright & Hargreaves	62	Genérico	3D/Isolado/SZ	**	**
12	Asfour & Gadi	63	Genérico	3D/Isolado/SZ	**	Tipo de célula, geometria da edificação, direção do vento
13	Wang & Wong (2008)	67	Genérico	3D/Isolado/MZ	N	Malhas
14	Hu et al. (2008)	68	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Direção do vento
15	Wang & Wong (2009)	69	Genérico	3D/Isolado/SZ	Nh	Malhas, direção do vento
16	Kobayashi et al. (2009)	71	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Geometria da edificação (aberturas), malhas
17	Meroney (2009)	72	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Geometria da edificação (aberturas), malhas, modelos de turbulência
18	Kobayashi et al. (2010)	73	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Geometria da edificação (aberturas)
19	Norton et al. (2010)	43	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (FS)	Malhas
20	Nikas et al. (2010)	75	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (FS), (WT)	Malhas, velocidade do vento, direção do vento
21	Larsen et al. (2011)	77	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (FS), (WT)	Malhas, velocidade do vento, direção do vento
22	Cheung & Liu (2011)	78	Genérico	3D/Isolado/SZ	Y (WT)	Posição da edificação, direção do vento
				3D/Group/SZ	N	**

Fonte: Adaptado de RAMPONI; BLOCKEN, 2012 a.

Kato et al. (1992) investigaram o mecanismo de ventilação natural cruzada em um modelo genérico com janelas abertas, a partir de simulações numéricas conduzidas considerando o método LES (*Large Eddy Simulation*) e ensaios experimentais em Túnel de Vento. O modelo cúbico (Figura 25) utilizado tinha como referência uma unidade habitacional, sendo que sua versão reduzida apresentou 18 cm de aresta. As variações consistiram na porcentagem de área das aberturas em relação às áreas das fachadas que as mesmas foram locadas (faces a barlavento e a sotavento, respectivamente). As variáveis observadas foram: campos de velocidade e de pressões (internas e nas envoltórias do modelo) e taxas de renovação de ar por hora. A boa concordância entre os dados medidos e os simulados para os parâmetros analisados, validaram as simulações LES. Por fim, foram avaliadas as pressões totais e suas respectivas perdas a partir da Equação de Bernoulli que considera o fluxo em um tubo virtual (equação esta aplicada na maioria dos programas que utilizam o modelo de rede como forma de predição da ventilação natural). A pressão foi definida de modo preciso pelo método LES e, posteriormente comparada com os valores oriundos da aplicação da equação teórica. As discrepâncias entre os métodos

(numérico e teórico) indicaram a ineficiência da equação para representação do fenômeno para os casos específicos.

Figura 25: Modelo genérico utilizado por Kato et al. (1992).

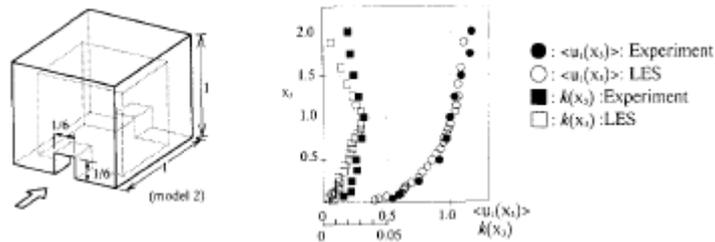


Fig. 1. Schematic view of model Fig. 2. Vertical profile of approaching wind

Table 1. Types of models analysed

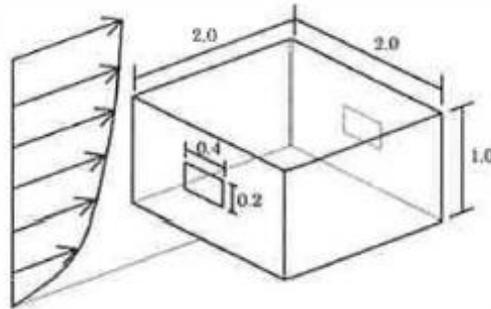
Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Tunnel type: windward and leeward wall is connected by a square duct of 1/6 x 1/6	Thick orifice type: Thickness of the wall is 1/6	Thin orifice type: thickness of the wall is 1/60	Thick orifice type with wind break: similar to model 2 but with a wind break panel	Thin orifice type with wind break: similar to model 3 but with a wind break panel

Fonte: Kato et al. (1992).

O objetivo do estudo desenvolvido por Kurabuchi et al. (2000) foi avaliar a validade de simulações numéricas CFD para aplicação em problemas de ventilação cruzada. Dados experimentais oriundos do ensaio de um modelo reduzido (0,3m x 0,3m x 0,15m) genérico (Figura 26) em túnel de vento foram confrontados com simulações numéricas. Nas simulações foram variados os modelos de turbulência (standard k-ε, LK, MMK e LES). Comparações entre dados medidos e simulados foram realizadas tendo como base as seguintes variáveis: (a) quociente de vazão, (b) padrão do fluxo de ar no exterior e no interior do modelo analisado, (c) distribuição da energia cinética turbulenta e (d) distribuição dos coeficientes de pressão nas envoltórias.

Os resultados apontaram que os modelos LK e MMK foram levemente superiores na predição das variáveis em relação ao modelo padrão k- ϵ , no entanto os autores enfatizam que este último pode ser aplicado em estudos de ventilação cruzada. Já, o modelo LES apresentou excelente concordância com os dados medidos.

Figura 26: Modelo genérico utilizado por Kurabuchi et al. (2000).

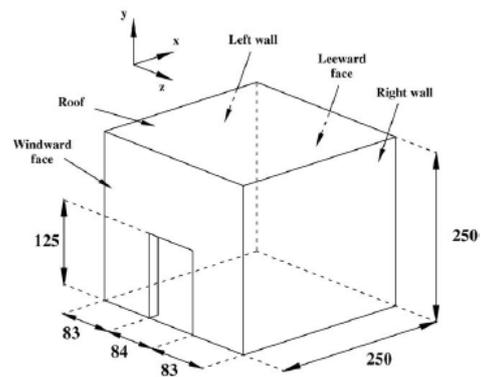


Fonte: Kurabuchi et al. (2000)

Evola e Popov (2006) aplicaram simulações CFD (RANS padrão e RGN k- ϵ) para prever a ventilação cruzada em um modelo cúbico isolado (Figura 27). A taxa de ventilação assim como a distribuição de velocidades e pressões dentro e fora do modelo foram avaliadas em três situações: (a) ventilação cruzada, (b) ventilação unilateral com abertura na face barlavento, e (c) ventilação unilateral com abertura na face a sotavento.

Foram utilizados o modelo cúbico (250 mm x 250 mm x 250 mm) genérico, dados experimentais e as simulações numéricas (LES) desenvolvidos no estudo de Jiang et al. (2003). Os resultados experimentais e numéricos apresentaram boa concordância. O modelo RGN apresentou resultados comparativos mais satisfatórios, sendo, portanto, indicado pelos autores, com uma boa ferramenta para este tipo de análise.

Figura 27: Modelo genérico de Jiang et al. (2003) adotado no estudo de Evola e Popov (2006).

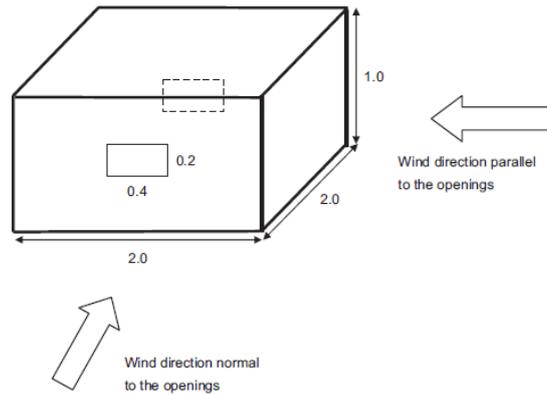


Fonte: Evola e Popov (2006)

Hu, Ohba e Yoshie (2008) utilizaram simulações CFD 3D LES para avaliar a ventilação natural em um modelo genérico (Figura 28), considerando duas situações: (1) incidência do vento normal às janelas, e (2) incidência do vento paralela a estas aberturas. Os dados numéricos foram comparados aos dados experimentais desenvolvidos para o mesmo modelo no trabalho de Ohba et al. (2001), apresentando boa concordância.

Os resultados indicaram a significativa influência do padrão de fluxo de vento ao redor da edificação nas taxas de ventilação no ambiente interno. Para o caso 1, que apresentou fluxo mais estável, o processo de troca de ar foi preponderante. Já, no caso 2, caracterizado por um fluxo mais instável, o mecanismo de ventilação foi o que sobressaiu.

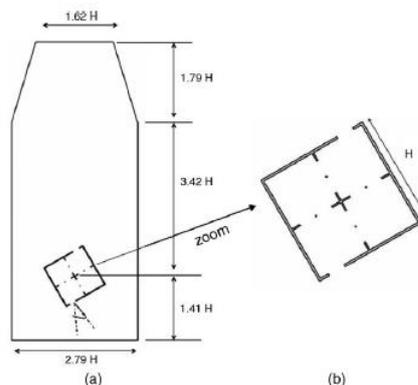
Figura 28: Modelo genérico de Ohba et. al (2001) adotado no estudo de Hu, Ohba e Yoshie (2008).



Fonte: Hu, Ohba, Yoshie (2008).

Visando um maior uso da ventilação natural como alternativa às fontes mecânicas e artificiais de condicionamento de ar, Nikas, Nikolopoulos, Nikolopoulos (2010) desenvolveram um estudo com o objetivo de prever o padrão de fluxo de ar dentro e ao redor de uma modelo genérico quando a ventilação cruzada era considerada. O modelo (5,56m x 5,56m x 3m) (Figura 29) analisado, assim como os dados experimentais foram baseados nas investigações de Larsen (2005) e Larsen e Heiselberg (2008) que realizaram estudo em escala reduzida em túnel de vento e escala real. Simulações 3D CFD (RANS $k-\epsilon$) foram conduzidas no *software* FLUENT. Dois parâmetros foram variados: a velocidade do vento incidente (1, 3 e 5 m/s), e a direção em relação ao vento incidente (0° , 30° e 60° e -90°). As comparações entre dados medidos e simulados apresentaram boa concordância, principalmente em relação às taxas de renovação de ar e ao perfil de velocidade do vento incidente. As simulações também permitiram uma maior exploração do fenômeno que, por sua vez, não foi possível nos ensaios experimentais. Além disso, tal estudo pontuou a importância significativa do perfil de velocidade do vento nos resultados das taxas de renovação de ar no ambiente interno.

Figura 29: Modelo genérico desenvolvido por Larsen (2005) e Larsen e Heiselberg (2008) e adotado no estudo de Nikas, Nikolopoulos, Nikolopoulos (2010).

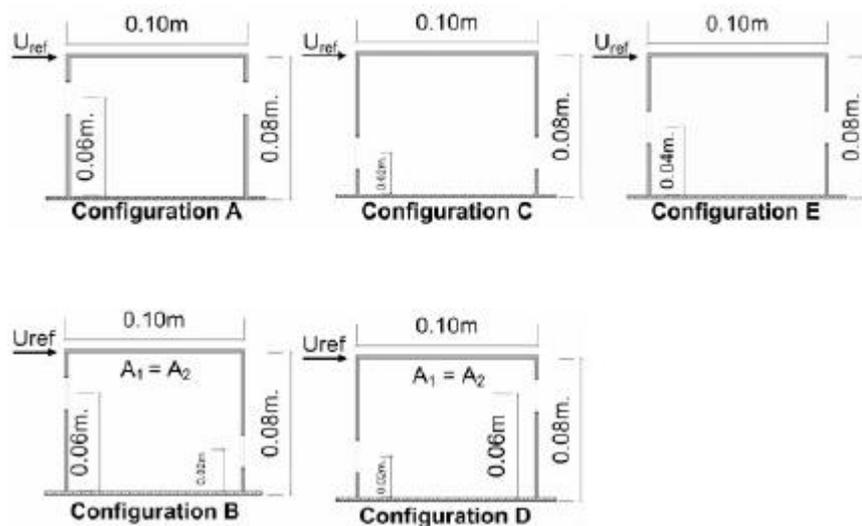


Fonte: Nikas, Nikolopoulos, Nikolopoulos (2010).

Meroney (2009) examinou a partir de extenso estudo a concordância de simulações FLUENT 6.3 CFD (2D e 3D) aos ensaios experimentais conduzidos em Túnel de Vento por Karava (2008). O modelo de Karava corresponde a uma edificação de quatro a cinco pavimentos (20 x 20 x 16m), sendo que sua versão reduzida assumiu a escala de 1:200 (10 x 10 x 8 cm) (Figura 30). Em seu estudo, Karava (2008) analisou a influência das seguintes variáveis: (a) porosidade da edificação, (b) proporção entre a janela de entrada e saída do fluxo, (c) configurações das aberturas e (d) obstruções internas. Neste estudo em questão, portanto, cinco configurações de janelas foram analisadas. Além disso, foram variados: os modelos de turbulência nas simulações numéricas (Standard, RNG and Realizable k- ϵ , kappa-omega, RMS, DES e LES) para fluxos estáveis e turbulentos, a geometria da malha e por fim, foi utilizado a decomposição do domínio computacional para a simulação dos fluxos internos. Ambos métodos reproduziram dentro da faixa de incerteza esperada os dados experimentais, sendo indicados como ferramentas de suporte ao estudo da ventilação natural.

A fim de trabalhar com um modelo genérico com extensa documentação experimental e assim passível de comparação, outros trabalhos utilizaram o modelo de Karava (2008) e Karava et al (2011) como referência (RAMPONI; BLOCKEN, 2012a; RAMPONI; BLOCKEN, 2012b; PÉREN et al., 2015a; PÉREN et al., 2015b; TOMINAGA; BLOCKEN, 2015; TOMINAGA; BLOCKEN, 2016).

Figura 30: Modelos desenvolvidos por Karava (2008) e adotados por Meroney (2009).



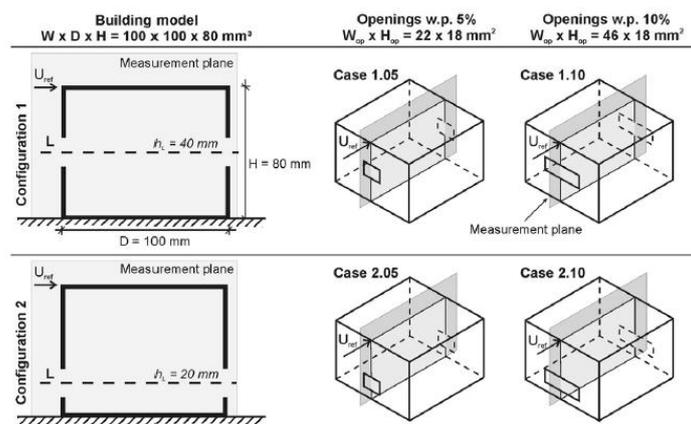
Fonte: Meroney (2009).

Ramponi e Blocken (2012a) preocupados com a significativa sensibilidade dos resultados de simulações CFD aos inúmeros dados de entrada modelados pelo usuário, realizaram um extenso estudo a fim de identificar o impacto de diferentes parâmetros. O modelo de Karava et al. (2011) e seus respectivos

dados experimentais (dados mensurados em Túnel de Vento a partir da aplicação do método *Particle Image Velocimetry* – PIV) foi utilizado como referência para as simulações CFD 3D RANS e para validação dos resultados numéricos. A partir dos resultados de simulações CFD de ventilação cruzada por ação dos ventos foram analisados os impactos decorrentes da variação dos seguintes parâmetros: (a) tamanho do domínio computacional; (b) resolução da malha computacional; (c) perfil da energia cinética turbulenta; (d) ordem dos esquemas de discretização e (e) critérios de convergência iterativa. Os impactos destes parâmetros foram avaliados em relação à velocidade média do ar. Dos parâmetros que apresentaram maior influência estão: os modelos de turbulência, a ordem dos esquemas de discretização, critérios de convergência e o perfil de energia cinética turbulenta de entrada, sendo esta importância e impacto deste último pela primeira vez reportada em estudos científicos, segundo os autores, para estudos sobre este recorte.

Em um segundo estudo (RAMPONI; BLOCKEN, 2012b), os mesmos autores, avaliaram o impacto da difusão física e numérica no fluxo de ventilação cruzada predito por simulações CFD 3D RANS (SST K- ϵ). Neste trabalho, o modelo de Karava et al (2011) (Figura 31) e seus respectivos dados experimentais (dados mensurados em Túnel de Vento a partir da aplicação do método *Particle Image Velocimetry* – PIV) foram também utilizados para a validação de quatro configurações de geometrias (variações ficaram restritas ao posicionamento da abertura na fachada e a porcentagem de porosidade). A avaliação da difusão que, segundo os autores, confirmou-se ser um importante mecanismo de transporte quando a ventilação cruzada é considerada, foi avaliada em duas etapas. A primeira etapa avaliou a difusão física a partir da variação do perfil de energia cinética turbulenta de entrada. Já, a segunda observou a difusão numérica a partir da variação dos esquemas de discretização (primeira e segunda ordem) e variações no refinamento da malha. Ambas as etapas demonstraram comportamento similares, sendo os efeitos no interior da edificação mais evidentes que no exterior.

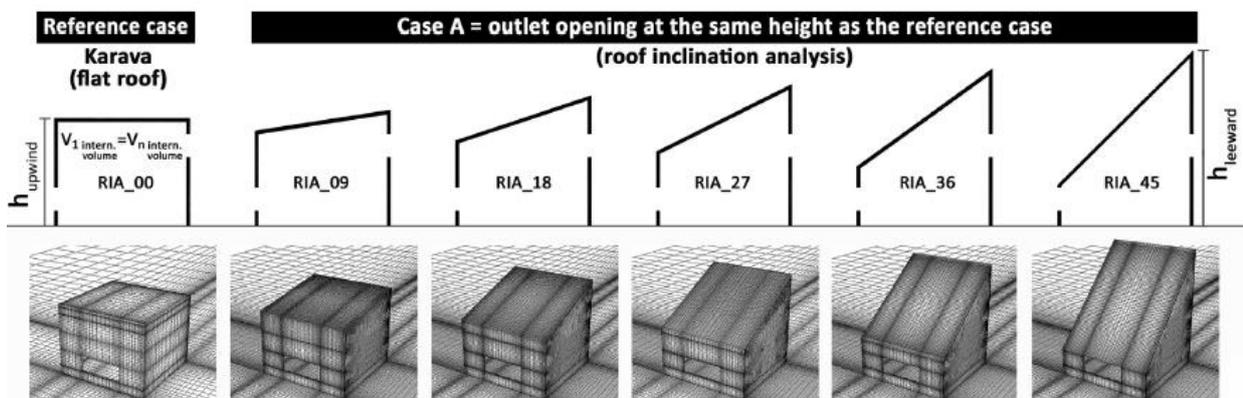
Figura 31: Modelo de Karava (2008) utilizado por Ramponi e Blocken (2012b)



Fonte: Ramponi e Blocken (2012b).

Motivados pela falta de estudos na literatura científica que avaliassem o impacto do posicionamento de janelas assimétricas e telhados inclinados na ventilação cruzada, Péren et al (2015a) estudaram, a partir de simulações CFD 3D RANS de um modelo genérico, o impacto no volume nas taxas de fluxo e no comportamento do fluxo (velocidades) resultante de variações na posição vertical da janela de saída e nas inclinações dos telhados. O estudo foi caracterizado por duas etapas de análise de sensibilidade: (1) sensibilidade dos parâmetros de modelagem da simulação; (2) sensibilidade de variações na geometria. Na primeira etapa, utilizou-se o modelo de Karava et al. (2011) e os dados experimentais de tal pesquisa para testar a sensibilidade, da resolução da malha computacional, modelos de turbulência e da energia cinética turbulenta de entrada. Após esta verificação, o modelo de Karava et al (2011) foi fixado como caso-base e os demais casos foram compostos por variações deste modelo tendo em consideração dois parâmetros geométricos (Figura 32): (a) inclinação do telhado (9°, 18°, 27°, 36° e 45°) e; (b) posicionamento vertical da janela de saída. É válido ressaltar que algumas características foram mantidas fixas dentre as variações propostas como: mesmo volume interno das geometrias, mesmo tamanho das aberturas de entrada e saída e mesma posição das aberturas nas fachadas. Os resultados apontaram que os modelos (SST) k-ε e o (RNG) k-ε apresentaram a melhor concordância com os dados experimentais. O aumento da inclinação do telhado ocasionou um aumento significativo do volume da taxa de fluxo e o incremento da velocidade interna do ar, principalmente no caso em que a janela de saída se encontrava posicionada mais próxima à cobertura.

Figura 32: Modelos com diversas inclinações de telhados resultantes de variações do modelo de Karava (2008).

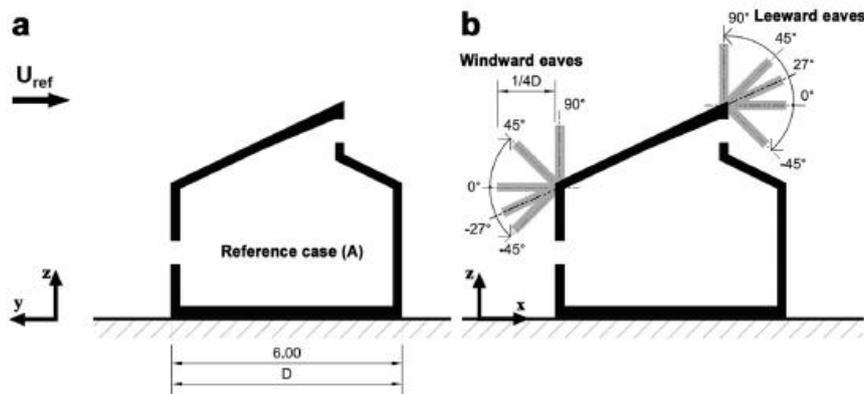


Fonte: Péren et al. (2015a).

Muitos são os estudos acerca do uso de beirais em edificações que avaliam o impacto nas cargas de vento e no potencial destes elementos em reduzir o ganho de calor através da radiação solar direta. No entanto, uma lacuna é identificada quando a discussão é o impacto destes elementos no desempenho da ventilação natural. Tendo isso considerado, Péren et al. (2015b) avaliaram o impacto de beirais (na

face a barlavento e a sotavento) no desempenho da ventilação natural de um modelo genérico isolado com telhado inclinado (tipo dente de serra). As simulações CFD 3D RANS foram validadas tendo como base os dados experimentais do modelo de Karava et al. (2011). Embora, as geometrias dos modelos não sejam idênticas, segundo os autores, a semelhança de algumas características como: ambas são isoladas, constituídas de uma única zona, com janelas assimétricas e com a mesma exposição ao vento incidente, garantem a validação das simulações CFD iniciais tendo como base o modelo de Karava et al. (2011). Após a validação inicial do modelo CFD, foram simulados os diferentes casos de beirais (ângulos de inclinação: -45° , -27° , 0° , 45° e 90°) (Figura 33): (a) somente na face a barlavento; (b) somente na face a sotavento; (c) em ambas as faces. Os resultados foram analisados tendo como base o volume da taxa de fluxo, a velocidade interna do ar e o padrão do fluxo no interior e exterior (a partir dos coeficientes de pressão). Os resultados apontaram que beirais na face a sotavento tem menor influência que quando disposto a barlavento. E que incremento no volume da taxa de fluxo decorrente do uso conjugado dos beirais (a barlavento e a sotavento) é superior que a soma dos respectivos usos individuais. Por fim, a inclinação que apresentou melhor desempenho foi a 27° quando disposta a barlavento, promovendo um aumento de 15% do volume da taxa de fluxo quando comparado aos resultados do modelo sem beirais.

Figura 33: Modelo genérico com variações nas inclinações dos beirais nas faces barlavento e sotavento.

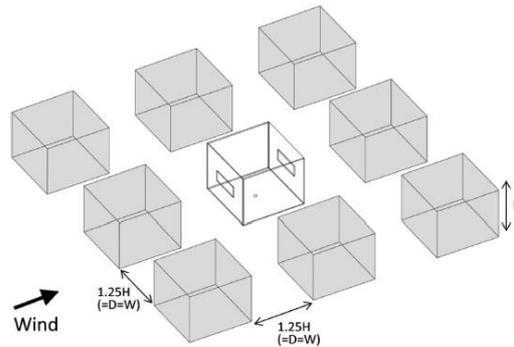


Fonte: Péren et al (2015b).

Tominaga e Blocken desenvolveram dois estudos, cujo principal objetivo era fornecer dados para a validação de simulações CFD de ventilação cruzada. No primeiro estudo (TOMINAGA; BLOCKEN, 2015) utilizaram como base o modelo genérico de Karava (2008) para executar novos ensaios experimentais em túnel de vento para averiguação dos campos de velocidade e dispersão de contaminantes. Os dados deste estudo foram também comparados aos de Karava et al (2011) e apresentaram boa concordância, mesmo sendo desenvolvidos com métodos de medição diferenciados. Esse ensaio serviu para a

validação das simulações CFD do estudo em questão. O modelo foi avaliado primeiro de forma isolada e em segundo momento considerando edificações em seu entorno de mesma dimensão e igualmente espaçadas (Figura 34). As edificações vizinhas eram seladas a fim de não atribuir maiores incertezas à análise proposta. Os resultados apontaram que as flutuações nos campos de velocidade e de concentração foram oriundas de diferentes mecanismos.

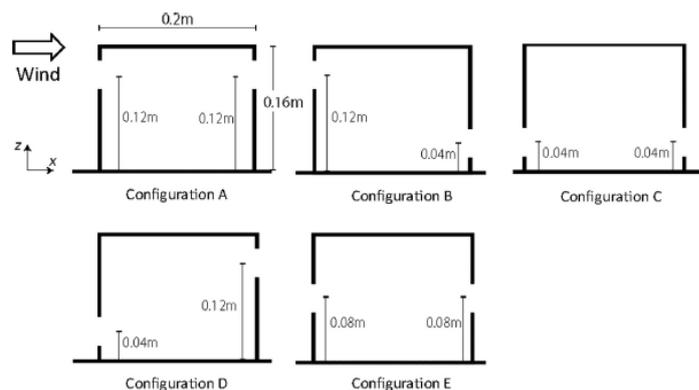
Figura 34: Modelo genérico desenvolvido por Karava (2008) e utilizado por Tominaga e Blocken (2015).



Fonte: Tominaga e Blocken (2015).

Já o segundo estudo desenvolvido pelos mesmos autores (TOMINAGA; BLOCKEN, 2016) também compreendeu ensaios experimentais em túnel de vento para cinco modelos genéricos, sendo que neste momento o impacto avaliado foi o da posição das aberturas. Os modelos foram baseados nas diferentes configurações de posicionamento de janelas exploradas por Karava et al (2011) e utilizados tanto nos ensaios experimentais quanto nas simulações numéricas (Figura 35). Os resultados buscaram observar o impacto destas variações no posicionamento das aberturas na visualização do fluxo, nos campos de velocidade, nos campos de concentração e nas taxas de renovação de ar.

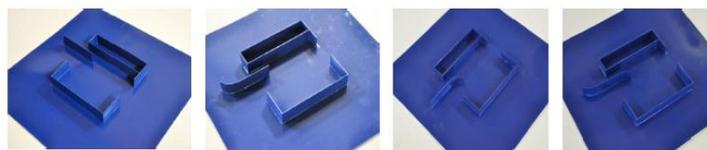
Figura 35: Modelo genérico desenvolvido por Karava (2008) e suas variações adotadas no estudo de Tominaga e Blocken (2016).



Fonte: Tominaga e Blocken (2016).

Esta revisão abordou, prioritariamente, a bibliografia internacional. Sobre os estudos nacionais, destaque se dá ao modelo analisado por Accioly, Oliveira e Bittencourt (2016) que utilizaram um ambiente de 9 m² (3m x 3m x 2,7 m) para analisar o impacto de diferentes tipologias de prateleiras de luz no comportamento da ventilação cruzada no interior deste ambiente a partir de ensaios qualitativos com o auxílio da Mesa d' Água (Figura 36).

Figura 36: Modelo avaliado na pesquisa de Accioly; Oliveira; Bittencourt (2016).



Fonte: Accioly; Oliveira; Bittencourt (2016).

4.1.1.2. Modelos residenciais de pesquisas anteriores

Neste tópico foram analisados 20 projetos residenciais (Tabela 7) entre eles, habitações unifamiliares e multifamiliares, locados em diferentes porções do território brasileiro (em municípios dos estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso). Estes projetos estão catalogados em um banco de dados desenvolvido nas pesquisas de Rossi (2016); Anchieta (2016) e Favretto (2016). Nestes projetos foram observadas as dimensões (largura, comprimento e pé-direito) apenas dos ambientes de maior permanência: dormitórios e sala. E em situações em que a sala era conjugada com a cozinha foi observada a menor dimensão deste ambiente.

Após esta análise foram elaboradas as seguintes métricas tendo como base os dados catalogados: (a) média; (b) mínimo; (c) máximo e (d) moda (Tabela 8).

O banco de dados que contempla as unidades habitacionais analisadas foi utilizado para o desenvolvimento de um modelo de habitação de interesse social típica brasileira e utilizado nas avaliações desenvolvidas por Rossi (2016); Anchieta (2016) e Favretto (2016), em suas respectivas pesquisas (Figura 37).

Tabela 7: Dimensões internas dos ambientes (m) de maior permanência das unidades residenciais presentes no banco de dados elaborado por Rossi (2016); Favretto (2016) e Anchieta (2016).

DIMENSÕES INTERNAS DOS AMBIENTES [m]															
Unidade	Quarto_01			Quarto_02			Quarto_03			Sala			Pé direito	Obs.	
1	2,4	x	2,95	2,4	x	2,96	**			2,95	x	3,08	2,8	**	
2	3,0	x	3,77	2,4	x	3,6				conjugada			2,7	largura: 2,95	
3	2,8	x	2,8	2,8	x	2,8				conjugada			2,6	largura: 2,80	
4	2,57	x	3,04	2,57	x	3,04				2,57	x	3,24	2,6		
5	2,57	x	3,05	2,57	x	3,05				2,58	x	3,25	2,6	**	
6	2,4	x	2,95	2,1	x	3,15				conjugada			2,4	largura: 2,4	
7	3,4	x	3,4	2,4	x	3,1				3,25	x	4,45	2,6		
8	2,4	x	3,1	2,4	x	3,45	2,2	x	2,4	4,0	x	4,0	2,5		
9	2,4	x	3,25	2,3	x	3,85	**			3,25	x	3,85	2,5	**	
10	2,51	x	3,06	2,51	x	4,11				3,01	x	3,06	2,52		
11	2,51	x	3,06	2,51	x	3,46				2,51	x	4,31	2,55		
12	2,57	x	2,94	2,94	x	3,09				2,61	x	5,38	2,52		
13	2,85	x	2,99	2,0	x	3,84				3,84	x	5,19	2,63		
14	2,79	x	3,02	2,0	x	3,87				3,51	x	5,21	2,63		
15	2,43	x	3,02	2,63	x	3,02				conjugada			2,6		largura: 2,68
16	2,88	x	3,25	2,88	x	3,25				3,2	x	3,33	2,8		**
	2,7	x	3,2	2,7	x	3,2				3,29	x	3,47	2,8		
	2,4	x	3,0	2,4	x	3,0				3,0	x	3,02	2,8		
17	2,57	x	3,13	2,57	x	3,13	3,24	x	4,32	2,7					
18	3,0	x	3,0	3,0	x	3,0	conjugada			2,5	largura: 2,9				
19	2,6	x	3,01	2,6	x	3,1	3,1	x	3,76	2,5					
20	2,4	x	3,0	2,4	x	2,9	2,98	x	3,0	2,6	**				

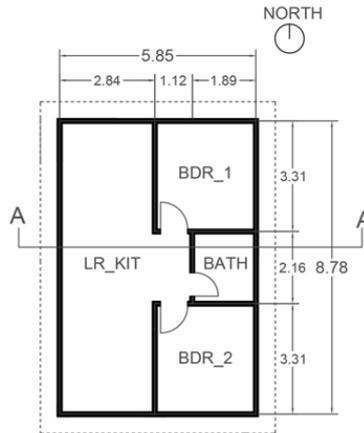
Fonte: Rossi (2016); Favretto (2016) e Anchieta (2016).

Tabela 8: Métricas elaboradas a partir dos dados das unidades habitacionais do banco de dados elaborados por Rossi (2016); Favretto (2016) e Anchieta (2016).

MÉTRICAS													
	Quarto_01			Quarto_02			Quarto_03			Sala			Pé direito
MÉDIA	2,6	x	3,1	2,5	x	3,3	2,2	x	2,4	3,1	x	3,9	2,6
MÍNIMO	2,4	x	2,8	2,0	x	2,8				2,5	x	3,0	2,4
MÁXIMO	3,4	x	3,8	3,0	x	4,1				4,0	x	5,4	2,8
MODA	2,4	x	3,0	2,4	x	3,1				3,3	x	**	2,6

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Rossi (2016); Favretto (2016) e Anchieta (2016).

Figura 37: Modelo de uma habitação de interesse social típica brasileira desenvolvida por Rossi (2016); Favretto, (2016) e Anchieta (2016).



Fonte: Rossi (2016); Favretto, (2016) e Anchieta (2016).

4.1.1.3. Modelos de edifícios de escritórios de pesquisas anteriores

Para embasar a definição das dimensões do modelo genérico desta pesquisa, as análises não se restringiram apenas à tipologia habitacional. Foram observadas também pesquisas que avaliaram estes aspectos em tipologias comerciais, como por exemplo, saletas em edifícios de escritórios em São Paulo/SP. Santesso (2017) a partir de dados disponibilizados pela *Empresa Buildings* (2016) catalogou 55 exemplares de saletas comerciais e observou que a área média correspondia a 36,4 m². Neves et al. (2017) analisaram comparativamente as características de edifícios de escritórios com ventilação híbrida pontuadas pela literatura científica aos dados oriundos de uma pesquisa de campo. A fonte de dados da pesquisa de campo foi a mesma utilizada por Santesso (2017), no entanto neste contexto foram catalogados 153 diferentes tipos de edifícios de escritórios. A partir desta análise, constataram que um tamanho médio das saletas comerciais de 42 m² (Figura 38), sendo preponderante o formato retangular com largura de 5 a 9m (Figura 39).

Figura 38: Área das saletas comerciais (m²) (% do total).

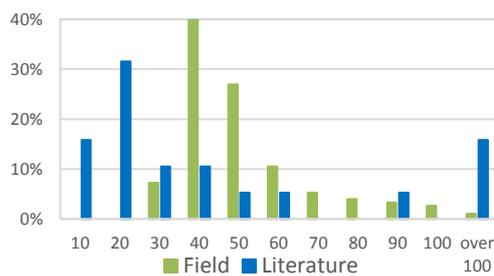
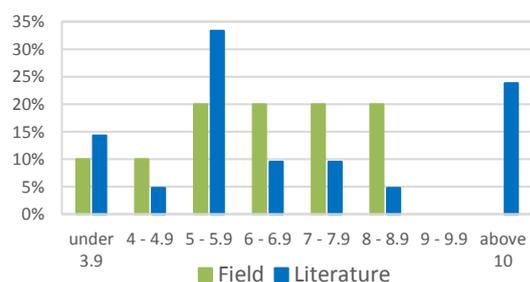


Figura 39: Largura da saleta (m) (% do total).



Fonte: NEVES et al. (2017).

4.1.1.4. Conclusão do item

Após a verificação destas fontes, optou-se que as dimensões do modelo genérico sejam iguais as propostas por Accioly, Oliveira e Bittencourt (2016): **3m x 3m x 2,7m** (largura x comprimento x pé-direito). O pé-direito de 2,7 m é representativo tanto de tipologias comerciais quanto habitacionais, conforme foi observado nos trabalhos anteriores e embora as dimensões de largura e comprimento sejam mais representativas de unidades habitacionais, se este modelo genérico for considerado como um módulo de 9 m², ao se conectar com outros módulos, alcançaria facilmente as dimensões de outros ambientes, como por exemplo, as representativas de ambientes comerciais (4 módulos = 36 m², mesma dimensão média encontrada por Santesso (2017)).

4.1.2. Quantidade de janelas

Segundo Marques da Silva (2010), o fluxo de ar resultante dos processos eólicos, térmicos ou ação conjunta podem caracterizar uma ventilação cruzada ou unilateral. Na primeira, as aberturas estão dispostas em fachadas opostas ou adjacentes, já na segunda se encontram localizadas na mesma fachada. Deste modo, a fim de se configurar uma situação de ventilação cruzada, optou-se por dispor duas aberturas, localizadas em fachadas opostas do modelo genérico.

4.1.3. Posicionamento das aberturas

As janelas foram centralizadas nas fachadas do modelo genérico. Segundo Lechner (2009), maiores valores de pressão são encontrados no centro da face à barlavento. Bittencourt e Cândido (2008) enfatizam que quando a incidência de vento é perpendicular a abertura de entrada de ar, uma maior diferença na distribuição das pressões é observada, sendo a diferença máxima obtida se as aberturas de entrada e saída de forem localizadas nas máximas pressões positivas e negativas, respectivamente.

4.1.4. Relação entre as aberturas de entrada e saída do ar

Givoni (1976) observou os impactos da variação do tamanho das aberturas de entrada e saída de ar em ambientes com ventilação cruzada e unilateral. Foram realizados incrementos nas larguras das aberturas de entrada e saída de ar em intervalos de 1/3 em relação à área da fachada em que tais aberturas estavam localizadas. Os valores de velocidade do ar interno (médias e máximas) encontrados são uma porcentagem da velocidade externa do vento aferida na altura da abertura.

O referido autor notou em suas análises que os impactos da variação do tamanho das aberturas são mais preponderantes em ambientes com ventilação cruzada e que ganhos efetivos na velocidade interna do ar podem ser alcançados com o incremento simultâneo das áreas de aberturas de entrada e saída de ar (Tabela 9). Diante destas constatações, foi definido que as janelas no modelo genérico seriam idênticas,

Tabela 9: Porcentagens da velocidade média interna do ar em relação à velocidade externa resultantes da variação da relação entre as aberturas de entrada e saída de ar.

Largura da abertura de entrada do ar	Largura da abertura de saída do ar	Aberturas em faces opostas	
		Incidência perpendicular de vento	Incidência oblíqua de vento
1/3	1/3	35	42
1/3	2/3	39	40
2/3	1/3	34	43
2/3	2/3	37	51
1/3	3/3	44	44
3/3	1/3	32	41
2/3	3/3	35	59
3/3	2/3	36	62
3/3	3/3	47	65

Fonte: Adaptado de Givoni (1976).

4.1.5. Tamanho das aberturas

As aberturas do modelo genérico são de 1,0m x 1,0m. Análises qualitativas do fluxo de ar realizados em mesa d' água foram fundamentais para aperfeiçoar a definição deste parâmetro. Os resultados destas análises são apresentados no item 4.4. Análises qualitativas: visualizações analógicas em mesa d' água e elaboração de máscaras de sombra.

4.1.6. Formato das aberturas

Conforme já citado no subitem anterior, as aberturas do modelo genérico são quadradas.

Sobin (1981) *apud* Bittencout e Cândido (2008) e Givoni (1991) investigou, a partir de ensaios experimentais em túnel de vento, o impacto da variação do formato das aberturas (retangular, vertical ou quadrada) na velocidade do ar interna, aferida na zona do usuário (de 0,5 a 1,5 m acima do piso). Tal autor verificou que para o mesmo tamanho de abertura, as retangulares apresentaram melhor rendimento médio, sendo a sua eficácia obtida quando o vento incidia de modo oblíquo na edificação.

Embora, o formato retangular seja apontado nesta referência como preponderante em relação as demais formas observadas, optou-se por aberturas quadradas, uma vez que os ensaios qualitativos em

mesa d' água (ver item 4.4) apontaram uma maior abrangência do fluxo de ar no ambiente interno para valores menores de largura de abertura. Quando as aberturas apresentaram maiores dimensões de largura, o fluxo se apresentou mais linearizado.

4.1.7. Peitoril das aberturas

O levantamento de dados de projetos residenciais indicou uma preponderância de aberturas com peitoril de 1,1m para os ambientes de maior permanência (sala e dormitórios). Logo, este valor foi adotado.

4.2. Classe II: Características dos dispositivos de sombreamento

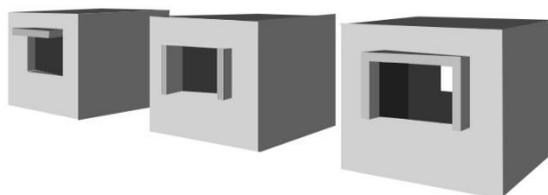
As características dos dispositivos de sombreamento externos consideradas, foram: (1) Tipologia; (2) Posicionamento em relação às aberturas (se serão localizados no limite da abertura ou se apresentarão algum afastamento em relação às mesmas) e, por fim; (3) Dimensões (comprimento e profundidade).

Análises qualitativas acerca do comportamento de distribuição do fluxo de ar diante da variação destes parâmetros foram realizadas na mesa d' água. Após, a definição dos tipos e dimensões dos protetores a serem ensaiados, foram elaboradas as máscaras de sombra correspondentes. As descrições destas análises qualitativas são apresentadas no item 4.4. Análises qualitativas: visualizações analógicas em mesa d' água e elaboração de máscaras de sombra.

4.2.1. Tipologias

Três tipologias de elementos de sombreamento externos foram selecionadas para compor as variações do modelo genérico: dispositivos de sombreamento horizontal (DSH), vertical (DSV) e combinado (DSC), por serem as formas mais usualmente encontradas (Figura 40).

Figura 40: Tipologia de dispositivos de sombreamento externos para compor as variações do modelo genérico.



4.2.2. Dimensões e posicionamento dos elementos em relação às aberturas

As definições de tais parâmetros foram embasadas pelas análises qualitativas: visualizações analógicas em mesa d'água e elaboração de máscaras de sombra, sendo apresentadas neste respectivo item (ver item 4.4).

4.3. Classe III: Condições de contorno

Este subitem engloba a descrição dos aspectos que caracterizam os cenários que o modelo genérico será avaliado. Os parâmetros categorizados nesta classe, condições de contorno, são: (1) Velocidade; (2) Exposição; (3) Rugosidade do terreno; (4) Altura em que o modelo será ensaiado e, (5) Ângulos de incidência do vento.

4.3.1. Velocidade

A fim de caracterizar o intervalo representativo da velocidade média dos ventos no território brasileiro, iniciou-se uma análise quantitativa acerca do potencial de vento das cinco macrorregiões do país: norte, nordeste, centro-oeste, sudeste e sul.

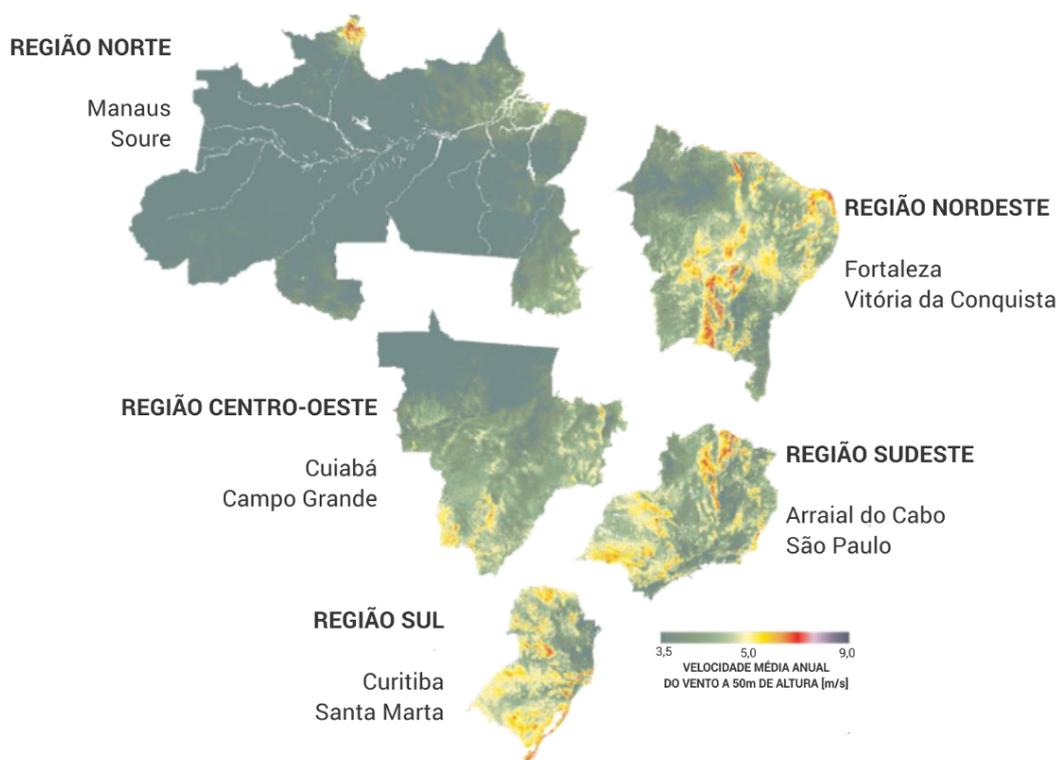
Inicialmente, partiu-se dos Atlas de potencial eólico brasileiro de 2001 (AMARANTES et al., 2001) e sua versão atualizada de 2017 (CEPEL, 2017). Os dados reunidos na primeira versão do Atlas são resultantes de uma modelagem numérica com o *MesoMap* e seus resultados representam regimes de ventos na altura de 50m. Já, na versão atualizada, a partir da implementação de um novo modelo numérico, o *Brams* (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*), foi possível estabelecer os regimes de ventos para as alturas de 30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200m para um ano representativo (2013). Os dados numéricos foram comparados à dados medidos e ajustes foram realizados. A utilização dos dados oriundos destes Atlas guiou a seleção de cidades de menor e maior potencial eólico brasileiras dentro de cada macrorregião. As cidades selecionadas são apresentadas na Figura 41: Manaus e Soure (região norte); Fortaleza e Vitória da Conquista (região nordeste); Cuiabá e Campo Grande (região centro-oeste); Arraial do Cabo e São Paulo (região sudeste) e; Curitiba e Santa Marta (região sul).

No entanto, como o objetivo deste trabalho é a quantificação dos impactos da variação das características de dispositivos de sombreamento externos na ventilação natural, ou seja, uma análise na escala do edifício, julgou-se mais coerente analisar os dados de ventos das cidades selecionadas a partir dos dados compilados nos arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012) e atualizados, recentemente, pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de

Santa Catarina (LABEEE, 2016), uma vez que tais arquivos climáticos reúnem dados de medições de vento a 10m de altura.

Os arquivos climáticos foram desenvolvidos a partir de dados horários, oriundos de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), registrados durante o intervalo de 10 anos. Para a análise destes arquivos, foram definidos intervalos de variação da velocidade do vento a serem observados, tais como: < 2; de 2 a 3; de 3 a 5; 5 a 9 e >9 m/s. A aplicação deste critério permitiu delinear o intervalo de velocidade de vento com maior frequência de ocorrência.

Figura 41: Cidades selecionadas para embasar as análises quantitativas acerca da velocidade média de ventos no território brasileiro.



Fonte: Adaptado de Amarantes et al. (2001).

Em geral, as velocidades de vento de até 5 m/s são as mais recorrentes dentre as cidades analisadas, como pode ser observado na tabela-resumo (Tabela 10). As frequências de ocorrência de velocidades de vento para cada intervalo em cada cidade analisada, assim como as respectivas rosas dos ventos podem ser verificadas no Apêndice A ao final deste documento.

Tabela 10: Intervalos de velocidade média do vento [m/s] com maior frequência de ocorrência das cidades selecionadas.

MACRORREGIÃO	CIDADES	INTERVALO DE VELOCIDADE MÉDIA DE VENTO COM MAIOR FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA [m/s]	FREQUÊNCIA [%/ANO]
Norte	Soure	3 a 5	45
	Manaus	<2	74
Nordeste	Vitória da Conquista	<2	46
	Fortaleza	2 a 3 3 a 5	33 33
Centro-oeste	Cuiabá	< 2	55
	Campo Grande	3 a 5	42
Sudeste	São Paulo	<2	48
	Arraial do Cabo	3 a 5	30
Sul	Curitiba	<2	46
	Santa Marta	5 a 9	31

Fonte: A autora (2018) baseada nos dados apresentados nos arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012) e atualizados por LabEEE (2016).

4.3.2. Exposição

De acordo com Leite e Frota (2013a, 2013b), a complexidade do C_p , inerente à variação de aspectos como, por exemplo, o efeito do entorno imediato, formato das edificações, ângulos de incidência de vento, limitam a aplicação dos dados provenientes de diversos estudos sobre a avaliação de C_p realizados em modelos paralelepípedos e isolados. Entretanto, a adoção de um modelo isolado foi estabelecida para este estudo a fim de diminuir a influência de parâmetros adicionais na análise das variações nas distribuições de pressões verificadas nas faces internas e externas do modelo genérico, decorrentes da inclusão de protetores solares externos.

4.3.3. Rugosidade do terreno

Conforme abordado no capítulo “1. Fundamentação teórica”, a Camada Limite Atmosférica (CLA) varia da velocidade de vento igual à zero, no contato com a superfície, até a velocidade de escoamento livre. Segundo Marques da Silva (2010), a CLA é a região do escoamento próxima a superfície em que se sente o impacto do atrito decorrente da interação do fluido sobre a superfície que o mesmo escoar. Deste modo, as variações de coeficientes de rugosidade do terreno resultam em diferentes espessuras de CLA, além de alterar o gradiente de velocidade de vento. Por este motivo, optou-se em considerar um coeficiente de rugosidade do terreno equivalente a uma área aberta e plana.

4.3.4. Altura em que o modelo será ensaiado

O modelo analisado configurará uma situação térrea. Para averiguar de forma efetiva o impacto dos dispositivos de sombreamento externos na ventilação natural em um modelo em altura, seria necessário a confecção de uma geometria que reproduzisse um módulo sobre o outro, uma vez que em altura o dispositivo de sombreamento do módulo inferior poderia facilmente impactar o desempenho da ventilação natural do módulo superior, o que agregaria complexidade a análise, logo esta opção foi desconsiderada.

4.3.5. Ângulos de incidência de vento

O ângulo de incidência de vento consiste no ângulo formado no sentido horário entre a direção de vento incidente e a normal da face a barlavento. Tal ângulo é primordial na configuração das distribuições de pressão nas respectivas fachadas da edificação. Logo, nos ensaios experimentais em túnel de vento, os ângulos de incidência de vento serão variados de 0° a 90°, em intervalos de 15°. Por se tratar de uma geometria regular, os dados para as demais situações poderão ser facilmente deduzidos.

4.4. Análises qualitativas: visualizações analógicas em mesa d' água e elaboração de máscaras de sombra

Análises qualitativas foram utilizadas através de dois métodos: (1) nas visualizações analógicas do fluxo de ar a partir de ensaios em mesa d' água e; (2) na elaboração de máscaras de sombra. Tais análises, auxiliaram na definição do formato e das dimensões das aberturas, além de contribuir para a caracterização dos dispositivos de sombreamento externos.

4.4.1. Visualizações analógicas do fluxo de ar a partir de ensaios em mesa d' água

As visualizações analógicas a partir de ensaios em mesa d' água caracterizaram uma etapa do processo de definição do modelo genérico a ser utilizado nesta pesquisa. Deste modo, o objetivo de tais ensaios foi subsidiar a seleção dos parâmetros que compõem este modelo.

Portanto, o modelo reduzido avaliado nos ensaios em mesa d' água apresenta as dimensões equivalentes às do modelo genérico (3m x 3m x 2,7m de pé-direito), peitoril padrão de 1,10m e aberturas centralizadas e em faces opostas.

Devido à limitação da mesa d' água, em permitir visualizações analógicas bidimensionais de um fenômeno que é tridimensional, foram realizados ensaios em planta e em corte longitudinal.

A metodologia desta análise qualitativa foi dividida em três etapas: (1) Etapa de definições; (2) Etapa experimental: visualizações analógicas em mesa d' água e; (3) Etapa de análise dos resultados, sendo os detalhamentos de cada etapa descritos na sequência.

4.4.1.1. Etapa de definições

Esta etapa consistiu na definição da matriz de ensaios e na confecção das maquetes para a realização dos ensaios experimentais em mesa d' água.

Os ensaios dos modelos em planta auxiliaram na verificação dos impactos no fluxo de ar: (a) de dispositivos de sombreamento externos verticais e; (b) da variação da largura da abertura (0,6m; 1,0m; 1,2m; 1,6m; 2,0m), Já, a partir dos ensaios em corte longitudinal se avaliou o impacto no fluxo de ar: (c) da presença dos dispositivos de sombreamento externos horizontais e; (d) da variação da altura da abertura (0,6m e 1,0m), Ambos os ensaios contemplaram variações nas dimensões de profundidade dos elementos de sombreamento externos (0,1m; 0,5m e; 1,0m), conforme ilustrado na matriz de ensaios proposta (Tabela 11).

Para a realização dos ensaios foram confeccionadas maquetes físicas. As peças do modelo foram planejadas no *software* AutoCad e cortadas na cortadora *a laser* do Laboratório de Modelos, Maquetes e Plástica do IAU-USP, a fim de garantir uma alta precisão de corte.

Estas maquetes foram feitas em acrílico transparente de 3mm por ser um material resistente, impermeável e não interferir nas visualizações. Os modelos foram confeccionados na escala de 1:10 com uma base de 40cm x 40cm, no caso do modelo em planta, e de 40cm x 35cm, no caso do modelo em corte longitudinal, uma vez que uma das suas faces é apoiada na borda da mesa d' água (Tabela 12). Em ambos os modelos, a altura dos elementos foi de 5cm. É importante ressaltar que a escala da maquete deve ser definida tendo em consideração a largura da área de ensaio, de modo a evitar que as bordas laterais do equipamento não interfiram no escoamento e, conseqüentemente, nas análises (TOLEDO; PEREIRA, 2003).

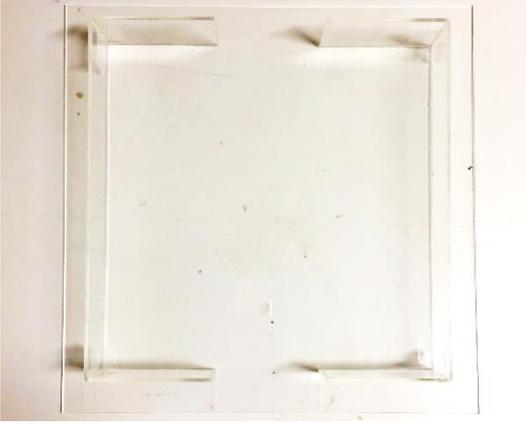
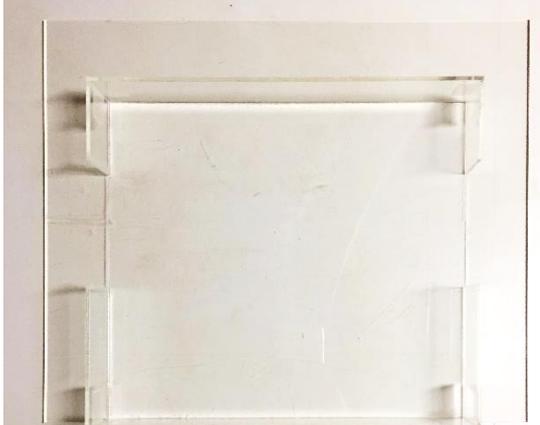
As paredes com aberturas tiveram seus elementos alterados durante os testes, a fim de representar as diferentes larguras (modelos em planta) ou alturas (modelos em corte longitudinal) das aberturas. Os elementos que caracterizaram os dispositivos de sombreamento também foram trocados entre um teste e outro. A fixação dessas peças variáveis, entre um teste e outro, nas demais que eram fixas ocorreram a partir do uso de clorofórmio.

Tabela 11: Matriz de ensaios experimentais em mesa d' água.

ENSAIOS EM PLANTA				
Vão	Caso sem proteção	Proteção solar (0,1m)	Proteção solar (0,5m)	Proteção solar (1,0m)
0,6m				
1,0m				
1,2m				
1,6m				
2,0m				
ENSAIOS EM CORTE LONGITUDINAL				
Vão	Caso sem proteção	Proteção solar (0,1m)	Proteção solar (0,5m)	Proteção solar (1,0m)
0,6m				
1,0m				

** As medidas (referentes aos vãos da abertura e das dimensões dos dispositivos de sombreamento) apresentadas nesta tabela em metros equivalem às dimensões encontradas no modelo em escala real. Os ensaios experimentais em mesa d' água foram realizados com o auxílio de um modelo reduzido na escala de 1:10.

Tabela 12: Modelos físicos (em planta e em corte longitudinal) elaborados em acrílico 3mm para os ensaios experimentais em mesa d'água.

MAQUETE FÍSICA DO MODELO EM PLANTA	MAQUETE FÍSICA DO MODELO EM CORTE LONGITUDINAL
	

Fonte: A autora (2018).

4.4.1.2. Etapa experimental: visualizações analógicas em mesa d'água

Esta etapa consistiu nos ensaios experimentais em mesa d' água propriamente ditos. Logo, este item engloba a descrição: (a) dos equipamentos; (b) dos ensaios e; por fim, (c) do cálculo da velocidade média da água durante os ensaios.

(a) Descrição dos equipamentos

Os ensaios experimentais foram realizados na mesa d' água do Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos. Este é um equipamento em que se visualiza a passagem da água a partir de um aditivo (sabão) em uma mesa plana, representando o fluxo do vento que pode ser desviado caso tenha obstáculos, na escala urbana e também na escala do edifício (TOLEDO; PEREIRA, 2003). O equipamento do LCA, é composto por dois tanques de água com capacidade de 92,5 litros (0,74 m x 0,25 m x 0,50 m) cada e conectados por uma bomba 0,75CV e 60 Hz. Um inversor de frequência, modelo CFW08 da WEG, atrelado à bomba é responsável por controlar a velocidade e frequência do fluxo de água. A área de ensaio apresenta 1,10 m de comprimento e 0,74m de largura (Figura 42).

Figura 42: Mesa d'água do Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do IAU-USP.



Fonte: A autora (2018).

(b) Descrição dos ensaios experimentais

Para a realização dos ensaios experimentais na mesa d'água do LCA, os reservatórios foram enchidos e o indicador (detergente) foi acrescido. A frequência do sistema elétrico foi elevada a 50 Hz a fim de garantir o turbilhamento necessário para a formação da espuma. Após alguns minutos, a frequência foi ajustada a 20 Hz que, de acordo com Toledo e Pereira (2003), tem se mostrado adequada para visualizações analógicas de fluxo laminar. Os referidos autores apontam a necessidade do aumento periódico da frequência do inversor e, conseqüentemente, do turbilhamento durante os testes, devido à rápida perda de consistência da espuma, algo também verificado e executado nestes ensaios.

Nos ensaios em planta, a maquete foi disposta no centro da área de ensaio, sendo que nos em corte longitudinal, o modelo reduzido foi também centralizado nesta área, no entanto teve sua base encostada em uma das bordas do equipamento. Em ambos os casos, os modelos foram simulados com a base para cima, de modo que estas não interferissem no escoamento. Segundo Toledo e Pereira (2003), é importante que as aberturas cheguem até a base da mesa, em razão da pequena espessura da lâmina de água formada no canal de escoamento.

Todos os ensaios foram realizados considerando a incidência de vento perpendicular a face barlavento. Os dispositivos de sombreamento externos avaliados também foram locados nesta mesma face.

A captura de imagens, assim como a elaboração de vídeos para posterior análise de resultados, foi garantida a partir da instalação de uma câmera digital em um sistema de tripé disposto sobre uma mesa de apoio (Figura 43).

Figura 43: Sistema elaborado para a captura de imagens e vídeos dos ensaios em mesa d'água no LCA (IAU-USP).



Fonte: A autora (2018).

(c) Cálculo da velocidade média da água durante os ensaios

Após terminado os experimentos, foram realizados testes para determinar a velocidade média da água, com o auxílio de um cubo de isopor de aresta de 1 cm. Assim, foi aferido o tempo que o módulo de isopor levava para percorrer a extensão de comprimento (1,1m) da área de ensaio. A partir dos dados de 20 tomadas de tempo, foi aplicada a equação ($V_{\text{média}} = \Delta s / \Delta t$) para determinar as velocidades médias (m/s) correspondentes (Tabela 13).

Com o domínio dos valores de velocidades médias referentes a cada tomada, foi calculado o desvio padrão da amostra, sendo este de $\pm 0,021$.

Tabela 13: Cálculo da velocidade média [m/s] da água nos ensaios realizados na mesa d'água do IAU-USP (continua).

Tomada	Tempo [s]	Comprimento da base de ensaio [m]	Velocidade [m/s]
1	4,98	1,1	0,221
2	4,93	1,1	0,223
3	4,4	1,1	0,250
4	4,12	1,1	0,267
5	4,58	1,1	0,240
6	5,39	1,1	0,204
7	4,7	1,1	0,234
8	4,44	1,1	0,248
9	4,28	1,1	0,257

Tabela 13: Cálculo da velocidade média [m/s] da água nos ensaios realizados na mesa d'água do IAU-USP (conclusão).

10	4,4	1,1	0,250
11	3,55	1,1	0,310
12	4,24	1,1	0,259
13	4,42	1,1	0,249
14	4,24	1,1	0,259
15	4,37	1,1	0,252
16	4,71	1,1	0,234
17	4,36	1,1	0,252
18	4,16	1,1	0,264
19	4,41	1,1	0,249
20	4,48	1,1	0,246

Fonte: A autora (2018).

4.4.1.3. Etapa de análise dos resultados

Para a realização da etapa de análise de resultados foram utilizados: (a) fotografias; (b) vídeos e; (c) desenhos que simplificaram os padrões de fluxo de ar observados a partir dos meios anteriores. Accioly; Oliveira e Bittencourt (2016) enfatizam a importância de fundamentar as análises em vídeos e não somente em fotografias, uma vez que a limitação imposta por esta última pode resultar em imprecisões ou incoerências nas análises do escoamento do fluxo de ar interno.

Primeiramente, as análises dos resultados englobaram a avaliação do impacto: da variação da largura da abertura (modelo em planta) e, da sua altura (modelo em corte longitudinal). Estas duas etapas anteriores, fomentou a definição das dimensões das aberturas que iriam caracterizar o modelo genérico. Assim, a avaliação do impacto das proteções verticais (modelo em planta) e das proteções horizontais (modelo em corte longitudinal) ocorreram exclusivamente para o vão definido, e auxiliaram na definição das dimensões dos protetores solares do modelo genérico.

Findadas estas avaliações foi inclusa, à matriz de ensaios inicial, uma nova etapa de ensaios que auxiliaram na avaliação do impacto da variação do ângulo de incidência do vento (0°, 45°, 90° e 180°) no modelo sem protetor solar e com protetor solar (vertical), considerando as dimensões da abertura e da profundidade dos elementos de sombreamento definidos nas etapas anteriores.

Deste modo, a estrutura de apresentação e análises dos resultados foi hierarquizada nos seguintes itens: (1) avaliação do impacto da variação da largura da abertura (modelo em planta); (2) avaliação do impacto da altura da abertura (modelo em corte longitudinal); (3) avaliação do impacto das proteções verticais (modelo em planta); (4) avaliação do impacto das proteções horizontais (modelo em corte

longitudinal) e; (5) avaliação do impacto dos ângulos de incidência de vento, sendo estes itens detalhados na sequência.

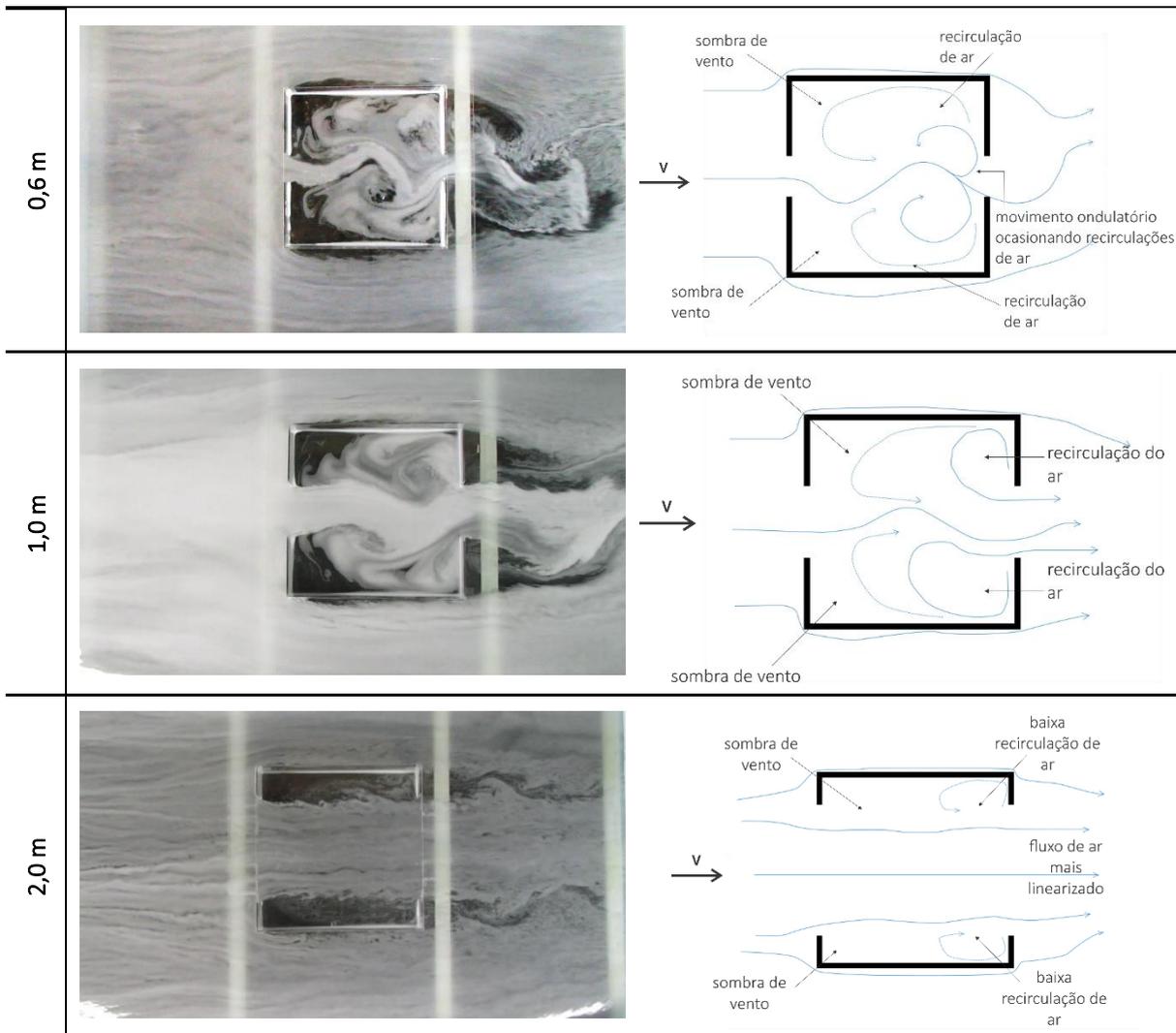
As análises de resultados acerca das visualizações analógicas a partir dos ensaios experimentais em mesa d'água se restringiram ao comportamento do fluxo no interior dos modelos avaliados e se pautaram na observação dos seguintes parâmetros: (a) comportamento do fluxo de ar incidente; (b) comportamento da distribuição do fluxo de ar no ambiente (tendências à formação de recirculações de ar, de sombras de vento ou do fluxo ficar mais linear, entre outros).

(1) Avaliação do impacto da variação da largura da abertura (modelo em planta)

Foram ensaiadas as variações de largura de abertura equivalentes à: 0,6m; 1,0m; 1,2m; 1,6m e 2m. Os resultados dos casos de 1,2m e 1,6m foram omitidos devido às semelhanças dos padrões encontrados nos casos de 1,0m e 2,0m, respectivamente.

Na sequência, são apresentados os dados das análises do impacto da variação da largura da abertura para os vãos equivalentes à 0,6m; 1,0m e 2,0m (Tabela 14). No caso do vão de 0,6 m, o fluxo de ar incidente ao adentrar no ambiente apresentou um movimento ondulatório originando, por sua vez recirculações que abrangeram a porção superior e inferior do ambiente analisado. Com o incremento da largura da abertura, o fluxo de ar no interior do ambiente tendeu a se linear. Zonas de sombra de vento mais definidas também foram observadas ao comparar os comportamentos dos fluxos de ar no interior dos ambientes com o menor e maior vãos avaliados.

Tabela 14: Avaliação do impacto da variação da largura da abertura para os vãos equivalentes à 0,6m; 1,0m e 2,0m.

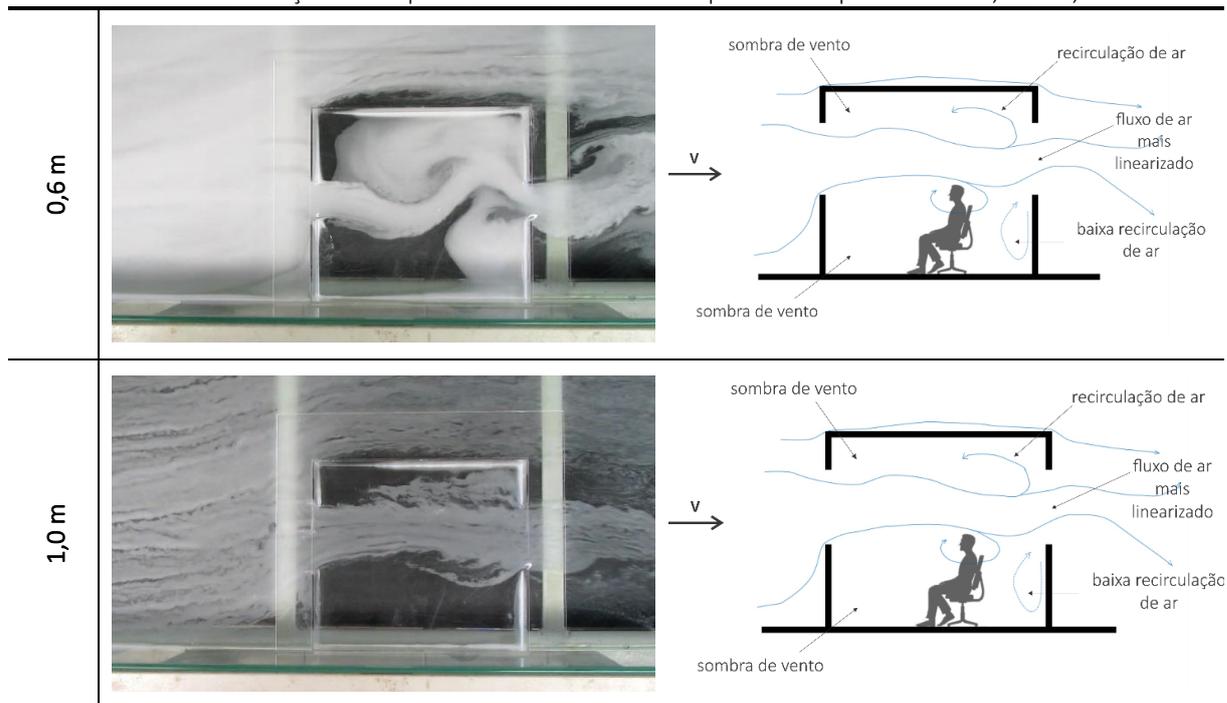


Fonte: A autora (2018).

(2) Avaliação do impacto da altura da abertura (modelo em corte longitudinal)

Foram ensaiadas as variações de altura de abertura equivalentes aos vãos de: 0,6 m e 1,0 m (Tabela 15). Os mesmos comportamentos observados para as visualizações analógicas do modelo em planta são verificados nas avaliações em corte longitudinal. No caso da abertura de menor altura, o movimento ondulatório do fluxo de ar reapareceu, assim como as recirculações de ar decorrentes dele. Estas recirculações promoveram uma maior abrangência do fluxo de ar no ambiente interno. Ao aumentar a altura do vão para 1,0m, o fluxo de ar ficou mais linearizado. Menores recirculações de ar foram observadas no ambiente interno (apenas baixas recirculações de ar próximas a face a sotavento), o que promoveu zonas de sombra de vento mais definidas no interior do ambiente.

Tabela 15: Avaliações do impacto da altura da abertura para vãos equivalentes à 0,6m e 1,0m.



Fonte: A autora (2018).

A partir das avaliações do impacto do incremento das dimensões de largura e altura das aberturas, - possibilitadas a partir de visualizações analógicas do fluxo de ar em modelos em planta e em corte longitudinal, respectivamente -, optou-se pela abertura quadrada de aresta de 1,0m para caracterizar as aberturas do modelo genérico. Esta dimensão de vão, ainda proporcionou recirculações de ar como pode ser observado no vão de 0,6m, o que auxiliou na maior distribuição do ar no ambiente interno. Além disso, estas dimensões de abertura são mais representativas dos valores encontrados em ambientes de maior permanência de tipologias habitacionais no país.

Após a definição das dimensões das aberturas do modelo genérico, foram delineados ensaios para a avaliação do impacto de proteções verticais (modelo em planta) e horizontais (em corte longitudinal) para esta dimensão de vão, em específico. Foram avaliadas três variações de profundidade dos elementos de sombreamento equivalentes a 0,1m; 0,5m e 1,0m.

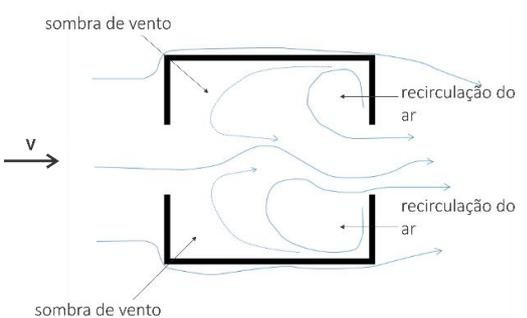
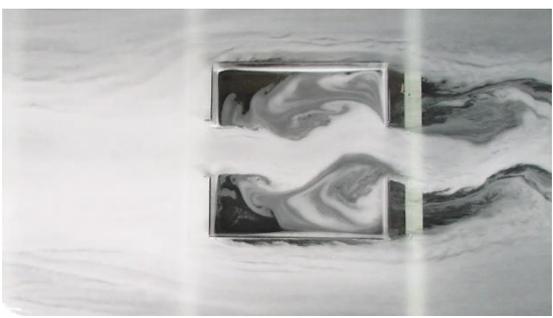
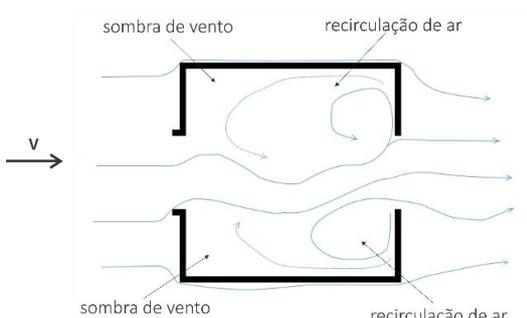
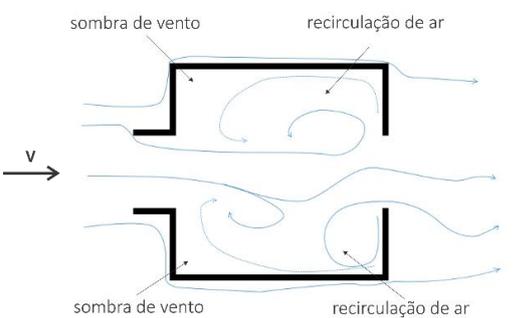
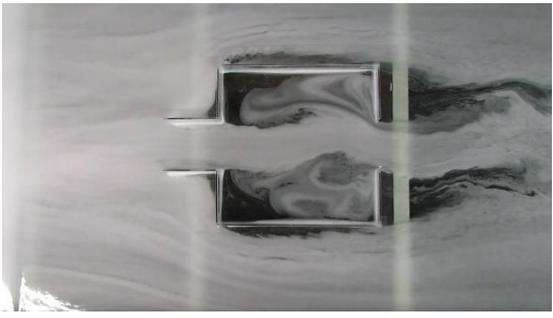
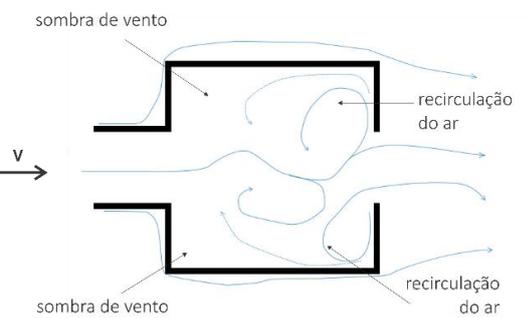
(3) Avaliação do Impacto das proteções verticais (modelo em planta)

As avaliações do impacto das proteções verticais foram realizadas a partir de visualizações analógicas do fluxo de ar interno no modelo em planta e com aberturas de dimensões equivalentes a 1,0m. Foi ensaiado o modelo sem proteção solar e com protetores verticais dispostos em ambos os lados da

abertura na face a barvalento. As dimensões de profundidade dos elementos de sombreamento ensaiados eram equivalentes à 0,1m; 0,5m e 1,0m (Tabela 16).

Pouca influência foi observada a partir da inclusão dos elementos equivalentes a 0,1m. A medida que os protetores foram aumentados (0,5m e 1,0m), o fluxo se tornou mais linear quando comparado com o caso anterior. As recirculações de ar foram verificadas em todos os modelos analisados, no entanto com a inclusão e aumento da profundidade dos protetores, as mesmas perderam gradativamente a intensidade.

Tabela 16: Avaliações do impacto de protetores solares verticais.

Caso sem proteção		
Protetor solar de 0,1m		
Protetor solar de 0,5m		
Protetor solar de 1,0 m		

Fonte: A autora (2018).

(4) Avaliação do impacto das proteções horizontais (modelo em corte longitudinal)

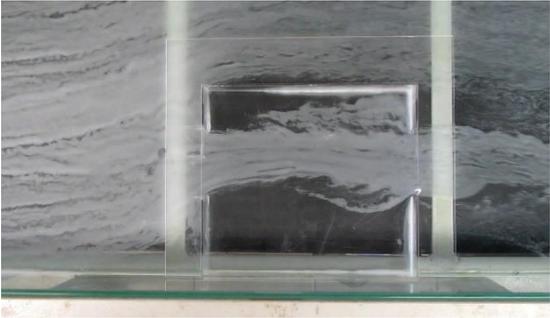
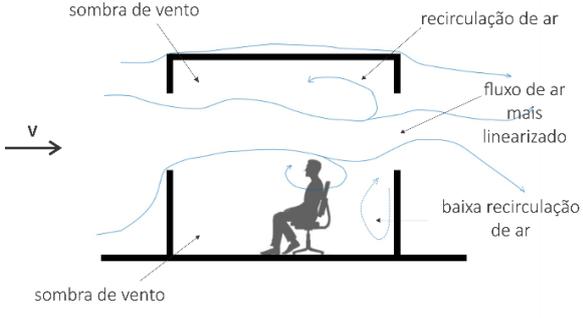
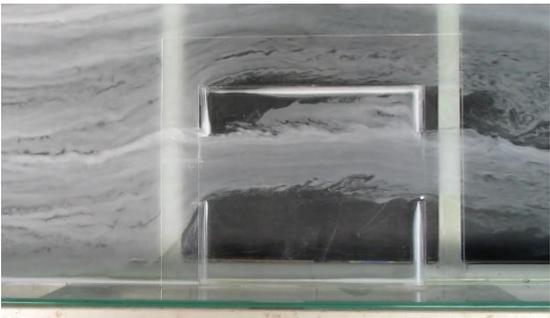
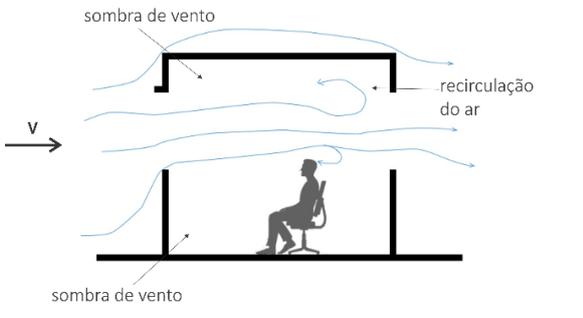
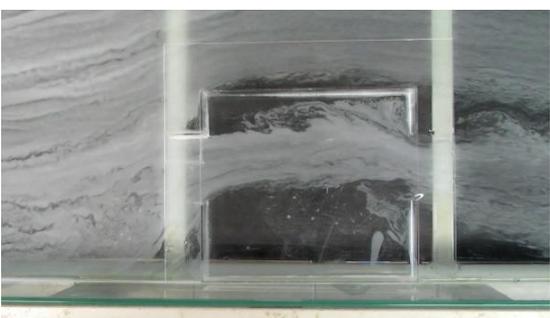
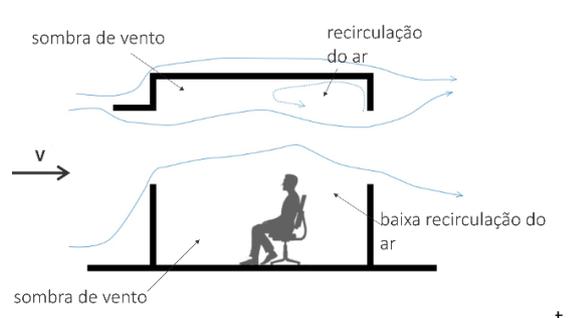
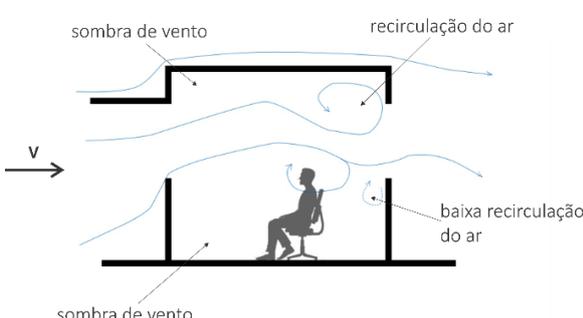
O mesmo procedimento descrito anteriormente foi adotado para avaliar o impacto das proteções horizontais. Estas avaliações ocorreram a partir de análise das visualizações analógicas dos modelos em corte longitudinal sem protetor solar e com variações da profundidade do elemento de sombreamento disposto na face a barvalento equivalentes a 0,1m; 0,5m e 1,0m (Tabela 17).

Assim como na avaliação anterior, pouca influência no comportamento do fluxo de ar interno foi observada a partir da inclusão do elemento de sombreamento com profundidade equivalente a 0,1m. Os protetores de maiores profundidades (0,5m e 1,0m) resultaram em uma maior linearidade do fluxo de ar ao adentrar pela primeira abertura, no entanto o encontro deste fluxo com a face a sotavento ocasionou em recirculações do ar, sendo estas maiores na parte superior do ambiente e menores na porção inferior. Em ambos os casos o fluxo de ar interno esteve acima da zona do usuário e com formações de zonas de sombra de vento na parte superior, logo após a face a barlavento e na parte inferior do ambiente.

Quanto à variação na dimensão de profundidade tanto dos protetores horizontais quanto dos verticais, pouca influência no fluxo de ar foi notada quando foi acrescentado um protetor equivalente à 0,1m. Maiores interferências foram observadas a partir da inclusão dos protetores de 0,5m e 1,0m. Optou-se pelos protetores de 0,5m, uma vez que estes configuram uma dimensão mais realista de ser encontrada em edificações brasileiras. Além disso, quanto ao impacto na distribuição de fluxo de ar no interior do ambiente, a opção de 0,5m continua sendo válida, por permitir maiores recirculações do ar, diminuindo assim as zonas de sombra de vento no interior do ambiente analisado.

Quanto à variação na dimensão de profundidade tanto dos protetores horizontais quanto dos verticais, pouca influência no fluxo de ar foi notada quando foi acrescentado um protetor equivalente à 0,1m. Maiores interferências foram observadas a partir da inclusão dos protetores de 0,5m e 1,0m. Optou-se pelos protetores de 0,5m, uma vez que estes configuram uma dimensão mais realista de ser encontrada em edificações brasileiras. Além disso, quanto ao impacto na distribuição de fluxo de ar no interior do ambiente, a opção de 0,5m continua sendo válida, por permitir maiores recirculações do ar, diminuindo assim as zonas de sombra de vento no interior do ambiente analisado.

Tabela 17: Avaliação do impacto de protetores solares horizontais.

Caso sem proteção		
Protetor solar de 0,1m		
Protetor solar de 0,5m		
Protetor solar de 1,0 m		

Fonte: A autora (2018).

(5) Avaliação do impacto dos ângulos de incidência de vento

Foi analisado apenas para o caso que irá configurar o modelo genérico (modelo com abertura equivalente a 1m x 1m e protetor solar de 0,5m) o impacto da variação do ângulo de incidência do vento (0° , 45° , 90° e 180°) no escoamento do ar no interior do ambiente (Tabela 18). Estas avaliações foram

realizadas apenas para o modelo em planta, devido à impossibilidade de variar o ângulo de incidência do vento em análises em corte longitudinal.

Quando o vento incidiu a 0° , a presença dos elementos de sombreamento verticais na abertura de entrada auxiliou a linearizar o fluxo de entrada, no entanto a partir da parte central, o escoamento de ar apresentou um movimento ondulatório o que ocasionou recirculações de ar na parte superior e inferior do ambiente, próximas a face a sotavento.

Na incidência de vento a 45° , a presença dos elementos de sombreamento auxiliou no direcionamento do fluxo de ar para o interior do ambiente. O escoamento de ar, nesta situação, mostrou-se mais linear, com sombras de vento bem definidas na parte inferior do ambiente e na parte superior logo após a parede barlavento. Recirculações de ar foram geradas na parte superior do ambiente, principalmente próximo a face a sotavento.

Quando o vento incidiu a 90° , praticamente não houve circulação do ar no interior do ambiente, uma vez que a incidência de vento sobre uma parede opaca, ocasionou sombras de vento nas paredes laterais, nas quais as aberturas estavam dispostas. A presença dos dispositivos de sombreamento, intensificou esta sombra na parede lateral superior.

Por fim, para incidência de vento de 180° , é possível observar que o escoamento de ar apresenta comportamento inverso ao verificado na incidência de vento a 0° , uma vez que o fluxo de ar incidente foi caracterizado por um movimento ondulatório bem definido, ocasionando sombras de vento nas extremidades superior e inferior logo após a face a barlavento e recirculações de ar próximas a face a sotavento. Devido a presença dos protetores solar na abertura de saída, o fluxo de ar tendeu a ficar mais linearizado.

Tabela 18: Avaliação do impacto da variação dos ângulos de incidência de vento (0°, 45°, 90°, 180°) para o modelo que caracterizará o modelo genérico (aberturas equivalentes a 1m x 1m e protetor solar de 0,5m).

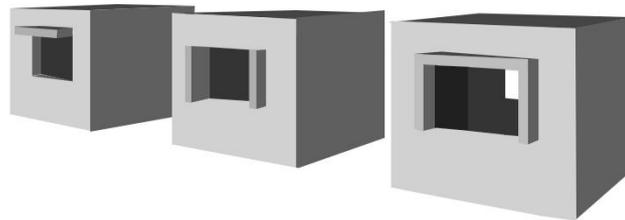
<p>Vento 0°</p>		
<p>Vento 45°</p>		
<p>Vento 90°</p>		
<p>Vento 180°</p>		

Fonte: A autora (2018).

4.4.2. Elaboração de máscaras de sombra

A partir dos ensaios em mesa d'água, estabeleceu-se que os protetores solares, independente da tipologia (horizontal, vertical ou combinado) apresentariam elementos com 0,5m de profundidade. Além disso, tais elementos seriam locados no limiar das janelas e suas dimensões de comprimento não ultrapassariam as da abertura. Tendo isso considerado, utilizou-se o transferidor auxiliar para verificar os ângulos verticais frontais (α), horizontais (β) e verticais laterais (γ), sendo estes respectivamente: 63°, 63° e 0° (Tabela 19).

Tabela 19: Máscaras de sombra dos dispositivos de sombreamento externos (horizontal, vertical e combinado).



Dispositivo de sombreamento horizontal		Dispositivo de sombreamento vertical		Dispositivo de sombreamento combinado		
$\alpha: 63^\circ$	$\gamma: 0^\circ$	$\beta_e = \beta_d : 63^\circ$	$\gamma_e = \gamma_d: 0^\circ$	$\alpha: 63^\circ$	$\beta_e = \beta_d : 63^\circ$	$\gamma_e = \gamma_d: 0^\circ$
Eficiência total		Eficiência parcial				

Fonte: A autora (2018).

A fim de fornecer uma avaliação mais abrangente do potencial de sombreamento de tais dispositivos, foram elaboradas as máscaras de sombra correspondentes e aplicadas sobre as cartas solares para latitudes de 4°N a 32°S, considerando intervalos de 4°. Este critério de avaliação foi reproduzido para as

três tipologias de dispositivos de sombreamento (horizontal, vertical ou combinado). Considerou-se que a abertura do modelo genérico que receberia a proteção dos dispositivos de sombreamento externos era a localizada na fachada Norte devido ao ganho solar significativo durante o ano nesta orientação para as diferentes latitudes do território brasileiro. O dispositivo de sombreamento horizontal apresentou a sua eficiência total ao meio dia e o vertical na primeira e na última hora do dia. Foi o dispositivo combinado que apresenta um melhor potencial de sombreamento das três opções avaliadas, por bloquear a incidência direta principalmente nos momentos mais críticos.

No Apêndice B são apresentadas as tabelas-resumo das análises qualitativas do potencial de sombreamento dos protetores (horizontal, vertical, combinado) analisados. Estas análises foram realizadas a fim de verificar a efetividade da aplicação destas tipologias de protetores.

4.5. Definição do modelo genérico: síntese

Este item tem como objetivo apresentar de forma sintética, a partir de uma tabela-resumo (Tabela 20) todas as escolhas descritas neste capítulo, Logo, são apresentadas as classes de parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno e, os valores, que cada parâmetro, assumem para os ensaios experimentais em túnel de vento (TN) e, por fim, uma indicação inicial de como os mesmos parâmetros irão se comportar nas avaliações numéricas por meio de simulações paramétricas no programa de simulação fluidodinâmica (CFX). Os parâmetros possíveis de serem variados nas simulações computacionais são destacados e as possíveis variações indicadas no rodapé desta mesma tabela.

Tabela 20: Tabela - resumo dos valores que cada parâmetro que caracteriza o modelo genérico e suas condições de contorno irão assumir nos ensaios experimentais (túnel de vento) ou nas simulações numéricas (CFD)(continua).

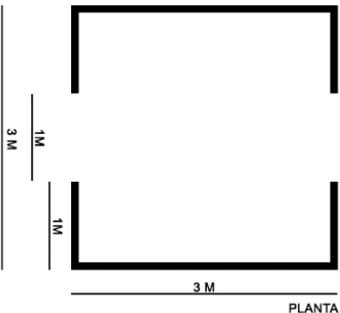
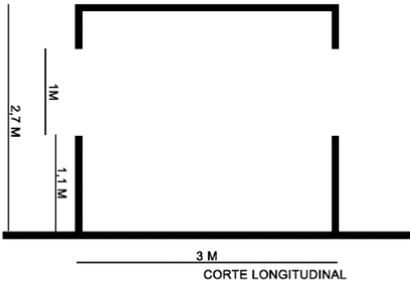
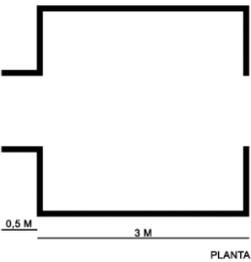
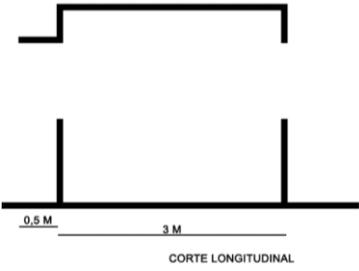
MODELO GENÉRICO			
MODELO GENÉRICO SEM DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO			
 <p style="text-align: center;">3 M 1 M 1 M 3 M PLANTA</p>		 <p style="text-align: center;">2,7 M 1 M 1,1 M 3 M CORTE LONGITUDINAL</p>	
MODELO GENÉRICO COM DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO			
 <p style="text-align: center;">0,5 M 3 M 3 M PLANTA</p>		 <p style="text-align: center;">0,5 M 3 M 3 M CORTE LONGITUDINAL</p>	
CLASSE DE PARÂMETRO	PARÂMETRO	TÚNEL DE VENTO	CFX
I. Geometria	Dimensões do modelo	Escala reduzida	3m x 3m x 2,7m ⁽¹⁾
	Quantidade de janelas	Duas aberturas (faces opostas)	Duas aberturas (faces opostas)
	Posicionamento das aberturas	Centralizada nas fachadas	Centralizada nas fachadas ⁽²⁾
	Relação entre as aberturas de entrada e saída de ar	Mesma área	Mesma área
	Tamanho das aberturas	Escala reduzida	1,00 m x 1,00m ⁽³⁾
	Formato das aberturas	Quadradas	Quadrada ⁽⁴⁾
	Peitoril da abertura	Escala reduzida	1,10 m ⁽⁵⁾
II. Dispositivos de sombreamento	Tipologia	Horizontal (DSH), Vertical (DSV), Combinado (DSC)	Horizontal, Vertical, Horizontal + Vertical e outras variações ⁽⁶⁾
	Posicionamento em relação às aberturas	Posicionados no limiar das aberturas	Variar o distanciamento ⁽⁷⁾
	Dimensões (comprimento e profundidade)	Escala reduzida	Variar as dimensões ⁽⁸⁾
III. Condições de contorno	Velocidade	0 – 5 m/s	0 – 5 m/s
	Exposição	Isolado	Isolado
	Rugosidade	Área aberta e plana	Área aberta e plana
	Altura em que o modelo será avaliado	Térreo	Térreo
	Ângulos de incidência do vento	0° - 90° (intervalos de 15°)	0° - 359° (intervalos de 15°) ⁽⁹⁾

Tabela 20: Tabela - resumo dos valores que cada parâmetro que caracteriza o modelo genérico e suas condições de contorno irão assumir nos ensaios experimentais (túnel de vento) ou nas simulações numéricas (CFD)(conclusão).

-
- (1) Nas simulações paramétricas a dimensão de pé-direito poderá ser variada.
 - (2) O posicionamento das aberturas na fachada também é um fator que poderá ser variado nas simulações.
 - (3) A área efetiva de abertura poderá ser variada.
 - (4) Poderão ser avaliadas formatos de aberturas distintos do inicial avaliado como, por exemplo, aberturas retangulares ou verticais.
 - (5) A altura do peitoril da janela também poderá sofrer variações.
 - (6) As tipologias dos dispositivos de sombreamento poderão ser amplamente variadas, já que configuram o ponto focal deste trabalho. Algumas tipologias já reconhecidas, como a “tipo L”, poderão ser analisadas, assim como ocorrer a proposição de novas tipologias, principalmente a partir dos resultados oriundos dos primeiros ensaios experimentais em túnel de vento.
 - (7) O distanciamento dos elementos de sombreamento dos limites da abertura também poderá ser variado.
 - (8) As dimensões tanto de comprimento quanto de profundidade dos elementos de sombreamento serão amplamente variadas nas simulações paramétricas.
 - (9) O ângulo de incidência de vento é um parâmetro que será variado a fim de cobrir todo o intervalo de 0° - 359°.
-

Fonte: A autora (2018).

4.6. Preparação do modelo reduzido para os ensaios no túnel de vento do IPT

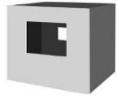
Os ensaios experimentais do modelo genérico serão conduzidos no túnel de vento de camada limite atmosférica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo [IPT]. Em atividade desde 2002, o túnel de vento do IPT se configura como o maior da América Latina com 40 m de comprimento e área de seção transversal de ensaio de 6m². Esta ferramenta experimental é altamente utilizada para estudos acerca do comportamento do vento em variadas áreas do conhecimento como, por exemplo, na construção civil, embarcações, energia sustentável e competições esportivas (IPT, 2018).

Neste item são apresentados, em detalhes, os procedimentos de preparação do modelo reduzido para os ensaios do concluídos até a data de finalização da redação deste memorial: (a) definição e quantificação dos ensaios; (b) definição da escala do modelo reduzido; (c) estudo acerca dos detalhamentos da maquete física.

(a) Definição e quantificação dos ensaios

Conforme citado no terceiro capítulo, Materiais e métodos, serão aferidos dados de pressão (externos e internos) a partir dos ensaios experimentais no túnel de vento do IPT. Logo, serão realizadas oito baterias de ensaios, uma vez que cada variação do modelo genérico (caso-base (CB); com dispositivo de sombreamento horizontal (DSH); com dispositivo de sombreamento vertical (DSV); e com dispositivo de sombreamento combinado (DSC)) será avaliada aberta e fechado. Os ângulos de incidência do vento também serão variados de 0° a 90° com intervalos de 15° (Tabela 21).

Tabela 21: Definição dos ensaios experimentais do modelo genérico a serem conduzidos no túnel de vento do IPT.

Modelo genérico		Variações	Ângulos de incidência do vento
	CB	Fechado	0°-90° (com intervalo de 15°: 0°; 15°; 30°; 45°; 60°; 75°; 90°)
		Aberto	
	DSH	Fechado	
		Aberto	
	DSV	Fechado	
		Aberto	
	DSC	Fechado	
		Aberto	

Fonte: A autora (2018).

(b) Definição da escala do modelo reduzido

No item de “Fundamentação teórica” foi elucidado a importância de se respeitar os limites de obstrução da seção transversal de ensaio do túnel de vento ocasionados pela área máxima de projeção do modelo reduzido. Segundo TOLEDO (1999), esta área de obstrução não deve ser maior do que 5%. Tendo isso considerado, foi calculada a escala do modelo reduzido. Duas situações foram avaliadas: (1) quando a incidência de vento é perpendicular a fachada do modelo reduzido e (Tabela 22); (2) quando a incidência de vento é oblíqua as fachadas do modelo reduzido (Tabela 23), sendo que esta última caracteriza a área máxima de projeção do modelo. Após esta verificação, foi definido que o modelo reduzido será confeccionado na escala de 1:7,5.

Tabela 22: Área de obstrução da seção transversal de ensaio do túnel de vento ocasionada pela área máxima de projeção do modelo reduzido na situação de incidência de vento perpendicular à sua fachada.

ESCALA 1:		7,5
DIMENSÕES ORIGINAIS (m)		DIMENSÕES DO MODELO (m)
altura	2,7	0,36
largura	3,0	0,40
comprimento	3,0	0,40
Área da seção de ensaio (m ²):		6,0
Área frontal do modelo (m ²):		0,144
Obstrução da seção de ensaio (%):		2,40

Fonte: A autora (2018).

Tabela 23: Área de obstrução da seção transversal de ensaio do túnel de vento ocasionada pela área máxima de projeção do modelo reduzido na situação de incidência de vento oblíqua às suas fachadas.

ESCALA 1:		7,5
DIMENSÕES ORIGINAIS (m)		DIMENSÕES DO MODELO (m)
altura	2,7	0,36
largura	3	0,40
comprimento	3	0,40
Área da seção de ensaio (m ²):		6
Área frontal do modelo (m ²):		0,288
Obstrução da seção de ensaio (%):		4,80

Fonte: A autora (2018).

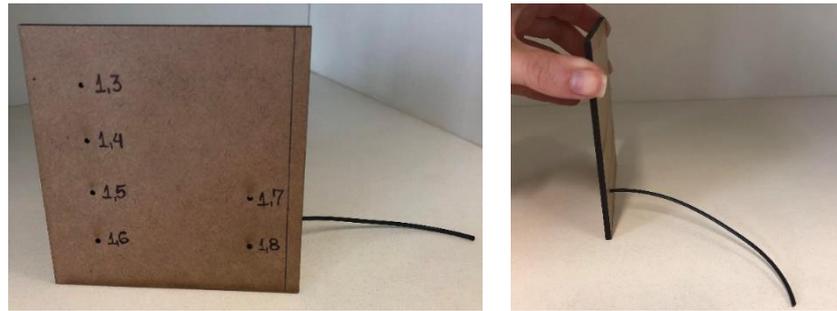
(c) Estudos acerca dos detalhamentos para a confecção da maquete física

Foram realizados alguns estudos para a definição dos detalhamentos para a confecção do modelo reduzido (maquete física) a ser utilizado nos ensaios experimentais em túnel de vento. As investigações se pautaram: (1) na definição do diâmetro ideal de perfuração para a instrumentação dos pontos de tomadas de pressão e; (2) no estudo acerca da espessura ideal da câmara de ar para permitir a dupla instrumentação do modelo reduzido para as aferições de pressões externas e internas.

(1) Definição do diâmetro ideal de perfuração para a instrumentação dos pontos de tomadas de pressão

Com o auxílio da cortadora *a laser*, foram realizadas perfurações de diferentes diâmetros (de 1,3 a 2,0mm com intervalo de 0,1mm) em uma placa de MDF de 3mm, mesmo material que será utilizado para a confecção da maquete física a ser utilizada nos ensaios experimentais em túnel de vento. A partir destas perfurações, foi possível verificar que o diâmetro de 1,8mm foi o que melhor se adequou às exigências da instrumentação, uma vez que permitiu a entrada do tubo plástico de diâmetro interno de 1mm, mas sem folgas. Tais folgas foram observadas nos diâmetros superiores (1,9mm e 2,0mm) e os menores (de 1,3mm a 1,7mm) não possibilitaram a passagem do tubo plástico (Figura 44). Para a instrumentação será utilizada cola instantânea para garantir a fixação do tubo plástico e a devida vedação do orifício. É de extrema importância a garantia de estanqueidade da tomada de pressão, para que não haja incoerências nas aferições de pressão.

Figura 44: Estudo acerca do diâmetro ideal de perfuração dos pontos de tomadas de pressão.



Fonte: A autora (2018).

- (2) Estudo acerca da espessura ideal da câmara de ar para permitir a dupla instrumentação do modelo reduzido para as aferições de pressões externas e internas,

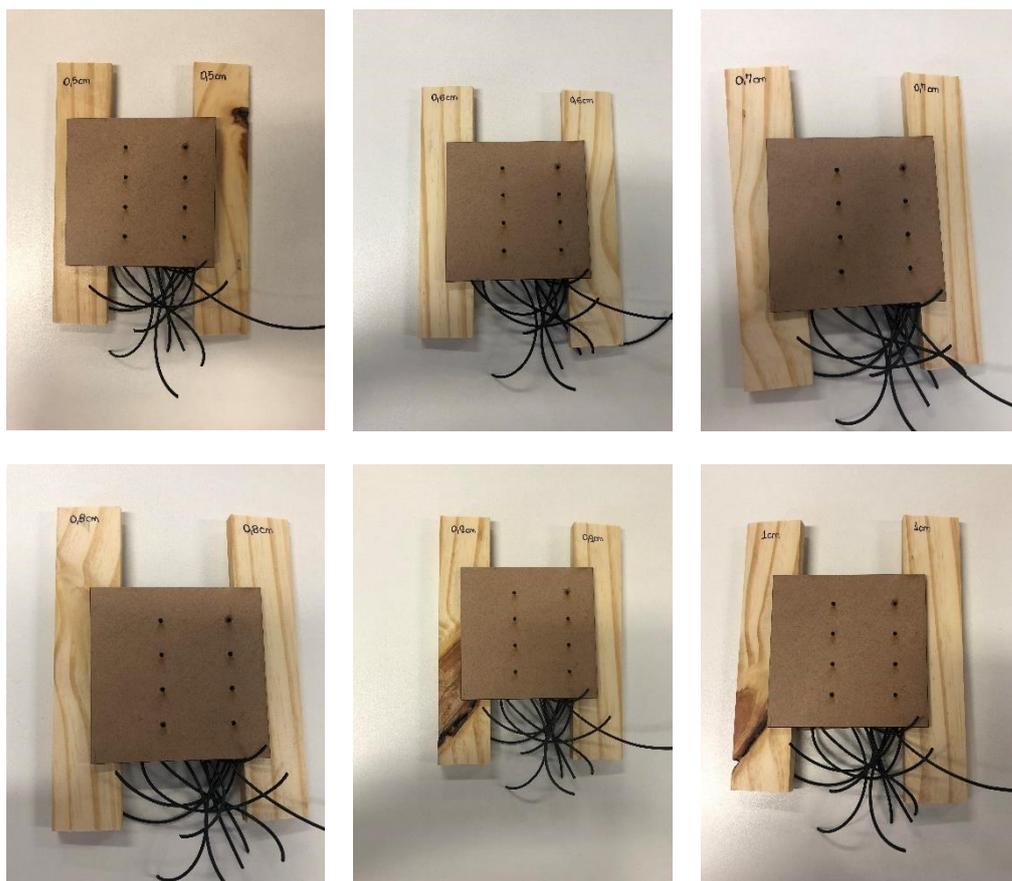
Outro ponto investigado foi a espessura ideal da câmara de ar para permitir a dupla instrumentação do modelo reduzido. Como serão aferidos valores de pressão interna e externa, a maquete física será confeccionada com uma parede dupla para atender este fim.

No entanto, o ideal é que a espessura desta câmara de ar, configurada entre as duas superfícies de MDF de 3mm, consiga alocar os tubos plásticos de modo que estes não apresentem vincos, o que acarretaria a interrupção do canal de aferição e comprometeria a qualidade dos resultados.

Logo, foi realizado um protótipo na cortadora a laser para permitir esta investigação. Perfurações (de 1,8mm de diâmetro) foram realizadas em duas placas de MDF de 3mm. Nestas perfurações, foram instalados os tubos de plásticos e fixados com cola instantânea. Na sequência, pares de placas de compensado com variadas espessuras (de 0,5 cm a 1,0cm, com intervalo de 0,1cm) foram alternados entre as placas de MDF instrumentadas, sempre verificando o impacto que a variação de espessura da câmara de ar resultante reproduzia nos tubos plásticos (Figura 45).

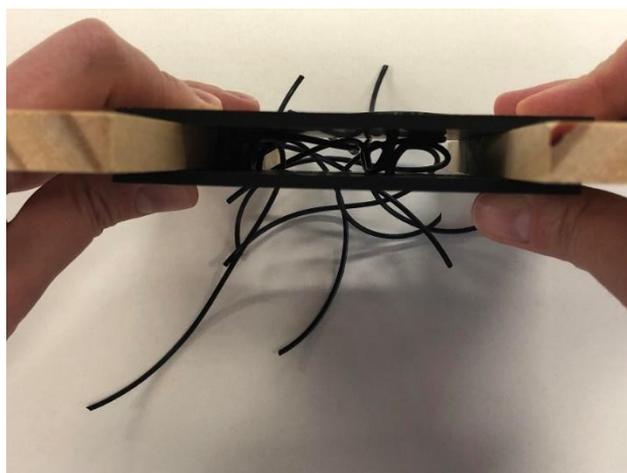
A partir destas verificações, definiu-se a espessura de 1cm para a elaboração da câmara de ar do modelo físico a ser empregado neste trabalho (Figura 46).

Figura 45: Estudo acerca da espessura ideal da câmara de ar para a permitir a dupla instrumentação do modelo reduzido para os ensaios em túnel de vento.



Fonte: A autora (2018).

Figura 46: Estudo acerca da espessura ideal da câmara de ar para a permitir a dupla instrumentação do modelo reduzido para os ensaios em túnel de vento.



Fonte: A autora (2018).

5. CONOGRAMA E ATIVIDADES FUTURAS

Neste item são apresentadas as atividades a serem desenvolvidas até o término deste doutorado (agosto/ 2020), assim como seu cronograma de execução (Tabela 24).

Continuação da Revisão Bibliográfica: Este item será complementado no decorrer da pesquisa conforme surjam referências consideradas relevantes ao assunto estudado.

Simulações no CFX: Nesta sub etapa, o mesmo modelo genérico e suas variações (COM e SEM protetores solares) ensaiadas no túnel de vento, serão replicados no *software* Ansys CFX®. Os modelos baseados na dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) se fundamentam nas equações diferenciais de *Navier-Stokes* e são amplamente utilizados no estudo do conforto térmico, qualidade do ar, entre outros (CHEN, 2009). As simulações CFD podem fornecer como resultado: a velocidade interna do ar, temperatura e pressão do ar, além da concentração de contaminantes e turbulências (WANG; WONG, 2009). Embora os *softwares* CFD configurem fontes primárias de obtenção de dados de coeficientes de pressão (Cps) (CÓSTOLA, BLOCKEN, HENSEN, 2009), a validação dos resultados oriundos das simulações numéricas a partir de ensaios experimentais é recomendada (BLOCKEN, 2014).

Calibração: Nesta etapa os dados de pressão (os Coeficientes de Pressão devido ao Vento – C_p , internos e externos) oriundos dos ensaios experimentais em Túnel de Vento serão utilizados para calibrar a ferramenta de simulação numérica. Logo, serão confrontados os dados experimentais aos numéricos de modo a conseguir uma boa convergência entre ambos. Após realizada a calibração do *software* CFX, este poderá ser utilizado de forma independente do Túnel de Vento nas simulações paramétricas, desde que não haja modificações significativas na geometria do modelo e nas condições de contorno, o que acarretaria na necessidade de um novo processo de calibração.

Elaboração de artigos: Serão redigidos artigos científicos relacionados ao trabalho, conforme forem observadas informações interessantes a serem divulgadas à comunidade acadêmica.

Simulações paramétricas no CFX: Nesta etapa, serão realizadas simulações paramétricas a fim de identificar as características projetuais dos dispositivos de sombreamento externos que apresentam um maior impacto na ventilação natural. Conforme supracitado, os aspectos geométricos do modelo genérico serão configurados como parâmetros fixos. Os parâmetros variáveis serão: (a) a orientação da fachada com dispositivo de sombreamento em relação ao vento incidente; (b) o tipo de dispositivo de sombreamento (verticais, horizontais ou mistos); (c) a variação de suas respectivas dimensões e; (d) o posicionamento destes elementos em relação às aberturas. Tais parâmetros serão selecionados tendo como base: relevância no impacto na ventilação natural; e relevância na aplicação arquitetônica. Além

dos dados obtidos a partir: (a) da revisão da literatura científica, (b) das pesquisas anteriores realizadas no IAU-USP e (c) dos ensaios experimentais realizados no túnel de vento de camada limite atmosférica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Variações acerca do formato, do posicionamento ou das áreas efetivas das aberturas poderão ser inclusas caso sejam identificadas pertinências durante o processo, e se tenha tempo hábil para a avaliação destes impactos.

Análise dos resultados parciais e estágio no exterior: Uma parte desta pesquisa ocorrerá no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa – Portugal, sob a supervisão do Prof. Fernando Marques da Silva. Tal estágio contemplará o final da etapa de simulações paramétricas no CFX (iniciadas no Brasil) e a análise destas simulações (resultados parciais).

Objetiva-se com a ida ao LNEC a continuação do estudo iniciado no Brasil, sendo que é de suma importância a participação do referido professor na pesquisa por se tratar de uma grande referência na área de ventilação natural, de ensaios em túnel de vento e por contribuído no desenvolvimento deste trabalho. Esta etapa resultará na definição dos casos que serão validados e auxiliará no estabelecimento de recomendações para o uso de dispositivos de proteção solar específicos em projeto. A presença de duas instituições (IPT e LNEC), é complementar e faz referência a etapas distintas do trabalho. Na primeira, serão realizados os testes experimentais, já na segunda serão finalizadas as simulações paramétricas e analisados os seus resultados.

Novos ensaios no Túnel de Vento: Nesta etapa, as configurações de dispositivos de sombreamento que apresentaram maior relevância nas simulações paramétricas serão ensaiadas no túnel de vento do IPT, a fim de validar os valores de pressão (C_p) alcançados nas simulações numéricas.

Validação: A etapa de validação é muito importante na avaliação de um programa de simulação. Nela, são confrontados de modo sistemático os resultados das simulações aos dados experimentais, buscando aferir se o modelo consegue representar o fenômeno físico estudado (AAIA, 1998 *apud* Fortuna, 2000). Os resultados serão organizados em quadros, tabelas, gráficos e figuras a fim de facilitar a identificação de padrões e variações. A comparação entre as duas ferramentas estudadas será realizada a partir de um gráfico indicando a porcentagem (%) de erro adotada nas análises.

Término da redação da Tese: A elaboração do texto da Tese ocorrerá ao longo de todo o período de doutorado. Esta etapa, no entanto, consistirá na finalização do texto e sua respectiva impressão.

Tabela 24: Cronograma de execução das atividades futuras.

ETAPAS	ANO	2016				2017				2018				2019				2020		
		TRIMESTRES	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3			
01	Cumprimento dos créditos																			
	Revisão Bibliográfica																			
	Definição do modelo genérico																			
	Aprendizado do programa CFX®																			
	Elaboração de artigos																			
02	Ensaio no Túnel de Vento																			
	Simulações CFX®																			
	Calibração																			
	Exame de qualificação																			
	Elaboração de artigos																			
03	Simulações paramétricas no CFX®																			
	Análise dos resultados parciais																			
	Estágio no exterior (3 meses)																			
	Elaboração de artigos																			
04	Novos ensaios no Túnel de Vento																			
	Validação																			
	Análise dos resultados finais																			
	Término da Tese																			
	Elaboração de artigos																			
	Depósito da Tese de Doutorado																			

LEGENDA:

	Atividades em desenvolvimento ou já concluídas
	Atividades a serem desenvolvidas)
	Data limite para o depósito do Exemplar de Qualificação
	Data limite para o depósito da Tese de Doutorado

Fonte: A autora (2018).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A complexidade inerente ao fenômeno da ventilação natural é uma das principais barreiras para que esta estratégia de condicionamento passiva seja implementada com efetividade nos projetos arquitetônicos. Análises quantitativas quando aplicadas durante o processo de projeto podem ser importantes aliadas na tentativa de mudança desta realidade. No entanto, muitas vezes essas análises demandam o uso de ferramentas que não estão no domínio dos projetistas, como ensaios experimentais no túnel de vento e simulações computacionais CFD.

As ferramentas baseadas na dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) são amplamente utilizadas para a avaliação da ventilação natural em diferentes tipologias de edificações. No entanto, devido à significativa sensibilidade dos seus resultados aos inúmeros parâmetros modelados pelo usuário, é imprescindível sua verificação e validação através de dados experimentais (BLOCKEN, 2014; HOOFF et al., 2011).

A revisão de estudos fundamentais – baseados em geometrias simples e genéricas, cujo principal objetivo é o maior entendimento acerca do comportamento do fluxo – confirma esta afirmação. Além disso, apresenta vários outros pontos a serem investigados como, por exemplo: (a) ensaios de conjuntos edificados, uma vez que a grande maioria dos estudos são realizados em modelo isolado; (b) ventilação cruzada em modelos considerando grandes aberturas, situação esta em que não é possível a adoção sem um questionamento crítico dos coeficientes de pressão mensurados em modelo selado e; (c) a investigação, ainda em modelo genérico, de variações na geometria como, por exemplo, consideração de beirais, dispositivos de proteção solar, diferentes tipos de telhados, diferentes configurações de janelas e seus respectivos impactos no desempenho da ventilação natural e no comportamento do fluxo de ar, entre outros aspectos.

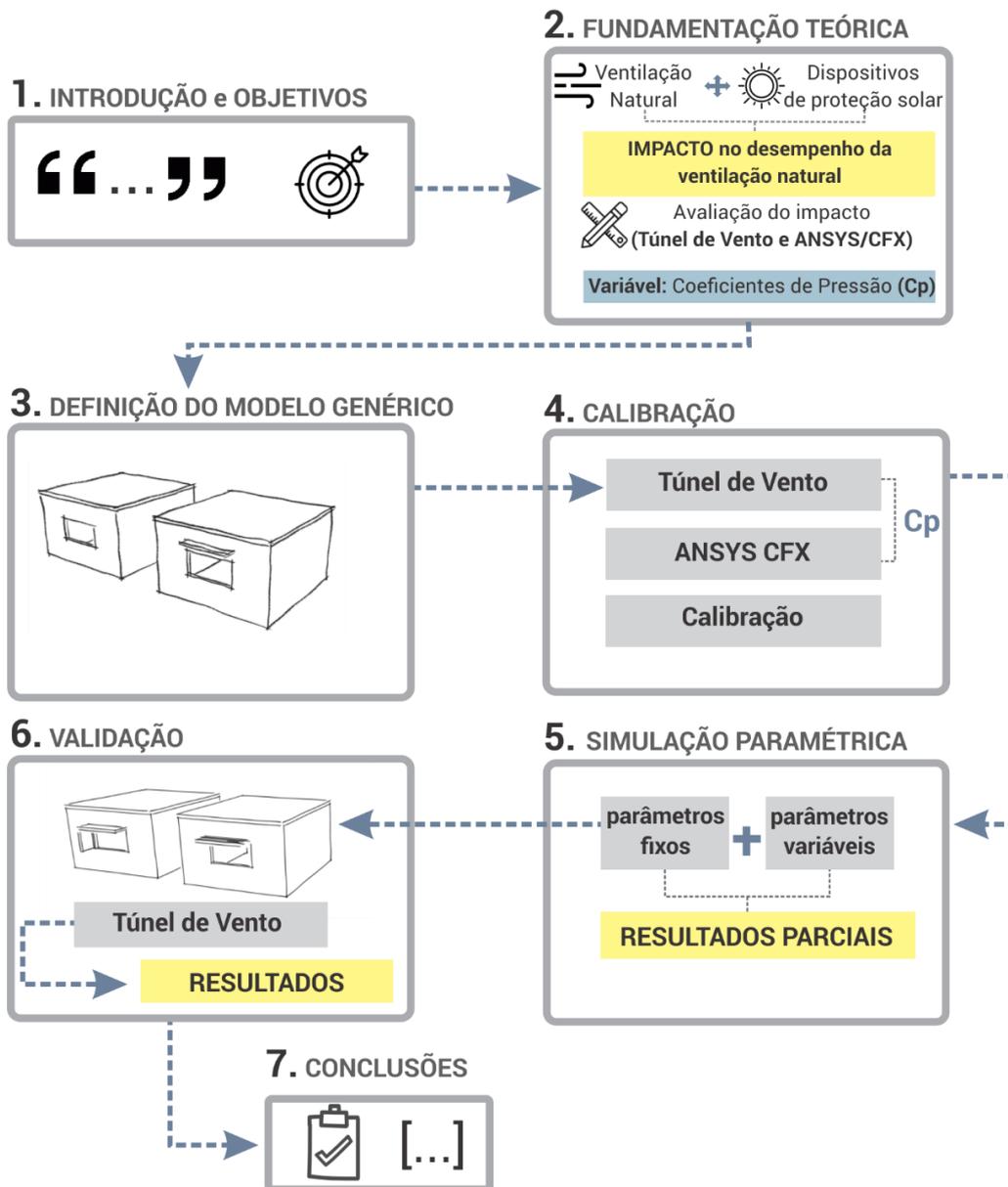
Logo, a elaboração de um modelo genérico para avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento nas distribuições de pressão nas suas envoltórias, representadas pelos coeficientes de pressão (C_p), constituiu em um processo minucioso de busca na literatura para melhor embasar as definições dos parâmetros que caracterizariam o modelo e suas condições de contorno. Como o modelo genérico será posteriormente ensaiado em túnel de vento, que se trata de uma ferramenta experimental custosa e de difícil acesso, o processo de sua definição deve ser criterioso a fim de se caracterizar de modo coerente todos os parâmetros necessários para a modelagem nesta ferramenta experimental. Além disso, deve permitir a sua replicação em ferramentas de simulação computacional fluidodinâmica. As análises qualitativas de visualizações analógicas na mesa d'água, que consiste em um experimento de baixo custo, relativamente simples e rápido, contribuiriam de modo significativo nas definições relacionadas às dimensões das aberturas e dos dispositivos de sombreamento externos. A adoção dessa

ferramenta experimental nesse momento da pesquisa foi devido a excelente resposta que diversas pesquisas científicas têm encontrado com o uso dessa ferramenta.

6.1. Estrutura da tese

A proposta de estruturação da Tese de Doutorado é apresentada na Figura 47, Pretende-se segmentar o volume em sete capítulos: **1, Introdução e objetivos; 2 Fundamentação teórica; 3, Definição do modelo genérico; 4, Calibração; 5, Simulação paramétrica; 6, Validação; 7, Conclusões.**

Figura 47: Proposta de estruturação da Tese de Doutorado.



O capítulo inicial, **1. Introdução e objetivos** apresentará a contextualização e justificativa que embasam o desenvolvimento deste trabalho, a lacuna científica identificada e os objetivos (geral e específicos) delineados para contribuir no processo de resolução desta lacuna,

Neste memorial, apresentou-se a versão preliminar do capítulo **2. Fundamentação teórica**. Este capítulo, assim como observado neste memorial, abordará as principais definições, contextualizações e trabalhos científicos relacionados às temáticas de ventilação natural e sombreamento de aberturas em edificações. Além disso, apresentará trabalhos científicos que investigaram o impacto dos elementos de sombreamento externos na ventilação natural, tendo sempre os coeficientes de pressão (C_p) como ponto focal da discussão.

Os capítulos referentes às etapas metodológicas – **3. Definição do modelo genérico; 4. Calibração; 5. Simulação paramétrica; 6. Validação** -, apresentarão, em detalhes, o procedimento metodológico para o desenvolvimento de cada etapa, assim como os resultados oriundos da sua aplicação. Os resultados de cada etapa serão os dados de entrada para o desenvolvimento da etapa subsequente.

O último capítulo, **7. Conclusões** abordará as considerações finais acerca do trabalho desenvolvido, as limitações encontradas e a indicação, se possível, de pontos latentes e potenciais de serem desenvolvidos em trabalhos futuros.

As contribuições da avaliação do impacto quantitativo decorrente do uso de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento externos na ventilação natural trarão contribuições não apenas à comunidade acadêmica, mas também aos profissionais projetistas e simuladores. Para tal, após a conclusão desta Tese, as informações dos achados acadêmicos poderão ser traduzidas em recomendações práticas de projeto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ACCIOLY, L.; OLIVEIRA, P.; BITTENCOURT, L. A influência da forma de prateleiras de luz na captação e distribuição interna da ventilação natural em um ambiente. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16., 2016, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ENTAC, 2016, p.417-427.

AI, Z.T.; MAK, C.M.; NIU, J.L.; LI, Z.R.; ZHOU, Q. The effect of balconies on ventilation performance of low-rise buildings. **Indoor Built Environ**; 20;6:649–660, 2011.

AIAA - American Institute of Aeronautics and Astronautics. **Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations**. Reston, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA G-007-1998.

ALLARD, F. **Natural ventilation in buildings**: a design handbook. London: James & James. 2002.

AMARANTE, O. A., BROWER, M., ZACK, J. & EOLICA, C. S. E. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Atlas dopotencial eolico brasileiro, Ministerio de Minas e Energia Eletrobras, 2001.

ANCHIETA, C.. **Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses**: consideration of solar incidence and shading devices. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia / IAU) - Universidade de São Paulo, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

ANDERSON JR, J. D. **Computacional fluid dynamics**: The basics with applications. New York: McGraw-Hill. 1995.

ANSONI, J.L. **Metodologia para projeto de biorreatores industriais via otimização multiobjectivo com base em parâmetros de desempenho calculados por técnicas de CFD**. São Paulo, 2015. Tese de (Doutorado) – Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

ANSYS CFX. Disponível em: <http://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>. Acesso em: agosto de 2016.

BELLIA, L.; FALCO, F. DE; MINICHIELLO, F. Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates. **Applied Thermal Engineering**, v. 54, n. 1, p. 190–201, 2013.

BITTENCOURT, L. e CÂNDIDO, C. Introdução à ventilação natural. Maceió: EDUFAL, 2008.

BITTENCOURT, L. **O uso das cartas solares**: Diretrizes para arquitetos. Maceió: Edufal, 1991. 92 p.

BITTENCOURT, L. S.; SACRAMENTO, A.; CANDIDO, C.; LEAL, T. Estudo do desempenho do peitoril ventilado para aumentar a ventilação natural em escolas de Maceió/AL. **Ambiente Construído**, v.7, p. 59–69, 2007.

BITTENCOURT, L. Arquitetura da Adaptação. In: **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina dos textos, 2015.

BITTENCOURT, L.; BIANA, G.; CRUZ, J. M. Efeito dos protetores solares verticais e horizontais na ventilação natural de salas de aula do 2º grau In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente

Construído, 3 e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído,1, 1995, Gramado. **Anais...**Gramado: ENCAC/ELACAC, 1995, p.383-388.

BLOCKEN, B. Journal of Wind Engineering 50 years of Computational Wind Engineering: Past , present and future. **Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 129, p. 69–102, 2014.

BRUAND, Yves. **Arquitetura Contemporânea no Brasil**. São Paulo: Perspectiva, 1981.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **Principles of natural ventilation**. BRE Digest n. 210. BRE, Garston, 1978 – *Apud* Bittencourt e Cândido, 2008.

CALAUTIT, J.K.; HUGHES, B.R. Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower. **Building and Environment** 2014; 80: 71-83, 2014.

CÂNDIDO, C.; DEAR, R. J. de; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and environment**, v. 45, p. 222-229. 2010.

CASTAÑO, H.F.M. **Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea**. 2017. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia / IAU) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013/** Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL – Rio de Janeiro: CEPEL, 2017.

CHAND, I.; BHARGAVA, P. K.; KRISHAK, N. L. V. Effect of balconies on ventilation inducing aeromotive force on low-rise buildings. **Building and Environment**, v. 33, n. 6, p. 385–396, 1998.

CHAND, I.; KRISHAK, N. L. V. Laboratory studies of the effect of louvers on room air motion. **Building Science**, v. 6, n. 4, p. 247–252, 1971.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building and Environment**, v. 44, n. 4, p. 848–858, 2009.

CHEN, Q., LEE, K.; MAZUMDAR, S.; POUSSOU, S.; WANG, L.; WANG, M.; ZHANG, Z. Ventilation performance prediction for buildings: Model assessment. **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 295–303, 2010.

CHEUNG, J. O. P.; LIU, C. H. CFD simulations of natural ventilation behaviour in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 5, p. 1149–1158, 2011.

CÓSTOLA, D. et al. Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 881–888, 2010.

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

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. L. M. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. **Building and Environment**, v. 44, n. 10, p. 2027–2036, 2009.

DAVID, M.; DONN, M.; GARDE, F.; LENOIR, A. Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades. **Building and Environment**, v. 46, n. 7, p. 1489–1496, 2011.

DEUBLE, M. P.; DE DEAR, R. J. Mixed-mode buildings: A double standard in occupants' comfort expectations. **Building and Environment**, v. 54, p. 53-60, 2012.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **EnergyPlus**. Version 8.6.0. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2016a. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm>. Acesso em: 08/jun/ 2016.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Input-Output Reference**: the encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. Version 8.6.0. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2016b. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm>. Acesso em: 08/ jun/ 2016.

ETHERIDGE D. **Natural Ventilation of Buildings**: theory, measurement and design . John Wiley & Sons,Ltd, 2012.

EVOLA, G.; POPOV, V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 5, p. 491–501, 2006.

FAVRETTO, A.P.O.. **Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of opaque envelope**. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia / IAU) - Universidade de São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

FORTUNA, A. O. de. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: editor da Universidade de São Paulo. 2000.

FREEWAN, A. A. Y. ScienceDirect Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. **Solar Energy**, v. 102, p. 14–30, 2014.

FROTA, A. **Geometria da Insolação**. São Paulo: Geros, 2004.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de Conforto Térmico**. 5 ed. São Paulo. Studio Nobel, 2001.

GIVONI, B. Man, climate and architecture. 2 ed. London: Applied Science.Publishers, 1976.

HIEN, W. N.; ISTIADJI, A. D. Effects of external shading devices on daylighting and natural ventilation. **Eighth International IBPSA Conference Eindhoven**, Netherlands August 11-14, 2003, p. 475–482, 2003.

HILDEBRAND, P. W. **Shading and Cooling: Impacts of Solar Control and Windows on Indoor Airflow**. Master thesis. University of California, Berkeley, 2012.

HU, C. H.; OHBA, M.; YOSHIE, R. CFD modelling of unsteady cross ventilation flows using LES. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10-11, p. 1692–1706, 2008.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Folder – IPT Túnel de Vento**. Disponível em: http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CTMetro/laboratorios_e_sessoes/42-tunel_de_vento.htm Acesso em: 14/maio/2018.

JIANG Y, ALEXANDER D, JENKINS H, ARTHUR R, CHEN Q. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. **J Wind Eng Ind Aerodyn** 2003;91:331e53.

KARAVA, P. **Airflow Prediction in Buildings for Natural Ventilation Design: Wind Tunnel Measurements and Simulation**, Ph.D. Thesis, Dept. of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Montreal Quebec, 2008, 242 pp.

KARAVA, P., STATHOPOULOS, T., ATHIENITIS, A.K. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. **Build. Environ.** 46, 266–279., 2011.

KATO S., MURAKAMI S., MOCHIDA A., AKABAYASHI S., TOMINAGA Y. Velocity e pressure field of cross ventilation with open windows analyzed by wind tunnel and numerical simulation. **J Wind Eng Ind Aerodyn** 1992;44: 2575e86.

KIRIMTAT, A. et al. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23–49, 2016.

KOBAYASHI, T. et al. Experimental investigation and CFD analysis of cross-ventilated flow through single room detached house model. **Building and Environment**, v. 45, n. 12, p. 2723–2734, 2010.

KOBAYASHI, T. et al. Stream tube based analysis of problems in prediction of cross-ventilation rate. **International Journal of Ventilation**, v. 7, n. 4, p. 321–334, 2008.

KURABUCHI T., OHBA M., ARASHIGUCHI A., IWABUCHI T. Numerical study of airflow structure of a cross ventilated model building. In: **Air distribution in rooms: ventilation for health and sustainable environment**; 2000. p. 313e8.

LARSEN T.S., HEISELBERG P. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. **Energy Build** 2008;40:1031e40.

LARSEN, T. S. et al. Characterization and prediction of the volume flow rate aerating a cross ventilated building by means of experimental techniques and numerical approaches. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 6, p. 1371–1381, 2011.

LARSEN, T.S. **Natural ventilation driven by wind and temperature difference**. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Group of Architectural Engineering, Aalborg University, 2005.

LECHNER, N. **Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects**. Wiley: New York, 2009.

LEE, I. et al. PIV verification of greenhouse ventilation air flows to evaluate CFD accuracy. **Transactions of the Asae**, v. 48, n. 6, p. 2277–2288, 2005.

LEITE, R.C.V. & FROTA, A.B. Avaliação de coeficientes de pressão em edifícios em meio urbano adensado. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 12 e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 8, Brasília. **Anais...Brasília: ENCAC/ELACAC**, 2013b.

LEITE, R.C.V. & FROTA, A.B. Procedimentos para determinação de coeficientes de pressão em diferentes condições de adensamento urbano. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 12 e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 8, Brasília. **Anais...Brasília: ENCAC/ELACAC**, 2013 a

LIDDAMENT, M. W. **A guide to energy efficient ventilation**. AIVC. Coventry:Oscar Faber, 1996.

MARQUES DA SILVA, F. Aplicação da ventilação natural e mista em edifícios: as ações introdutoras da ventilação natural. In: **Cadernos Edifícios**, n.6, p. 7-26, 2010.

MARUTA, E.; KANDA, M.; SATO, J. Effects on surface roughness for wind pressure on glass and cladding of buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** v. 76, p. 651–663, 1998.

MATSUMOTO, E.; LABAKI, L. C.; CARAM, R. M. A aplicação de ensaios em túnel de vento no processo de projeto. In: **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia**. São Paulo: Oficina dos textos, 2011.

MENDLER, S.; ODELL, W.; LAZARUS, M. A. **The HOK guidebook to sustainable design**. 2. ed. Nova York: Wiley, 2006.

MERONEY, R. N. CFD Prediction of Airflow in Buildings for Natural Ventilation. Prepared for 11 th Americas Conference on Wind Engineering San Juan , Puerto Rico CFD Prediction of Airflow in Buildings for Natural Ventilation. p. 1–11, 2009.

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

NEVES, L. O.; MANOEL, R. P.; CHVATAL, K.; SANTESSO, C. Envelope design of mixed-mode office buildings: theory versus practice. In: **Passive and Low Energy Architecture**, 2017, Edimburgo. PLEA, 2017.

NIKAS, K. S.; NIKOLOPOULOS, N.; NIKOLOPOULOS, A. Numerical study of a naturally cross-ventilated building. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 4, p. 422–434, 2010.

OMRANI, S.; GARCIA-HANSEN, V.; CAPRA, B.; DROGEMULLER, R. On the effect of provision of balconies on natural ventilation and thermal comfort in high-rise residential buildings, **Building and Environment**, v. 123, p. 504- 516, 2017.

PASSOS, I.C.S., LAMENHA, M. & BITTENCOURT, L.S. Análise de pressões externas em edifício residencial multifamiliar para fins de ventilação natural. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 14 e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 10, Balneário Camboriu. **Anais...** Balneário Camboriu: ENCAC/ELACAC, 2017.

PÉREN, J.I. HOOFF, T. VAN; LEITE, B. C. C.; BLOCKEN, B. Impact of eaves on cross-ventilation of a generic isolated leeward sawtooth roof building : Windward eaves , leeward eaves and eaves inclination. **Building and Environment** v. 92, p. 578–590, 2015.

PÉREN, J.I., HOOFF, T. VAN; BLOCKEN, B.; TOMINAGA, Y. CFD analysis of cross-ventilation of generic isolated building with asymmetric opening positions: impact of roof angle and opening location. **Building and Environment**, v. 114, p. 148–165, 2017.

PRIANTO, E.; DEPECKER, P. Characteristics of airflow as the effect of balcony, opening design and internal division on indoor velocity: A case study of traditional dwelling in urban living quarter in tropical humid region. **Energy and Buildings**, v. 34, n.4, p 401-409, 2002.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. Journal of Wind Engineering CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations : Validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects. **Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 104-106, p. 408–418, 2012a.

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

RIBEIRO, P. V. S.; BITTENCOURT, L.S. Contribuição da mesa d'água na análise da Geometria de sheds extratores e captadores de ar para ventilação natural. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16., 2016, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ENTAC, 2016.

RIVERO, R. **Arquitetura e Clima**. Condicionamento Térmico Natural. Porto Alegre: Luzzato, 1985.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Relatório Interno, 2012. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em: 22 de março de 2013.

ROSSI, M.M. **Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of natural ventilation**. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia / IAU) - Universidade de São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Building ventilation: the state of the art**. London: Earthscan, 2006.

SANTESSO, C. A. **Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas comerciais na cidade de São Paulo: influência de parâmetros de projeto**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SOBIN, H. J. Window design for passive ventilative cooling: an experimental model-scale study, Proc. Int. Passive and Hybrid Cooling Conf., Miami Beach, FL, 1981, Am. Section of the Int. Solar Energy Soc., pp. 191-195, 1981.

STATHOPOULOS, T.; ZHU, X. Wind pressures on buildings with appurtenances. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.31, p. 265-281, 1988.

TOLEDO, A. M.; PEREIRA, F. O. R. O potencial da Mesa d' água para a visualização analógica da ventilação natural em edifícios. In: VII ENCAC - Encontros Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2003, Curitiba. **Anais...** do VII ENCAC., 2003.

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

TOMINAGA, Y.; BLOCKEN, B. Journal of Wind Engineering Wind tunnel analysis of flow and dispersion in cross-ventilated isolated buildings: Impact of opening positions. **Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 155, p. 74–88, 2016.

TOMINAGA, Y.; BLOCKEN, B. Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions. **Building and Environment**, v. 92, p. 452–461, 2015.

VAN HOOFF, T. et al. A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. **Building and Environment**, v. 46, n. 9, p. 1797–1807, 2011.

VETTORAZZI, E.; SACTH, H. M.; LANGNER, M.; CAMACHO, D.J. Proposta de dispositivo para aumentar o desempenho de janelas e fachadas em termos de ventilação natural e auxiliar no controle da radiação solar direta. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16., 2016, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ENTAC, 2016, p.1839-1852.

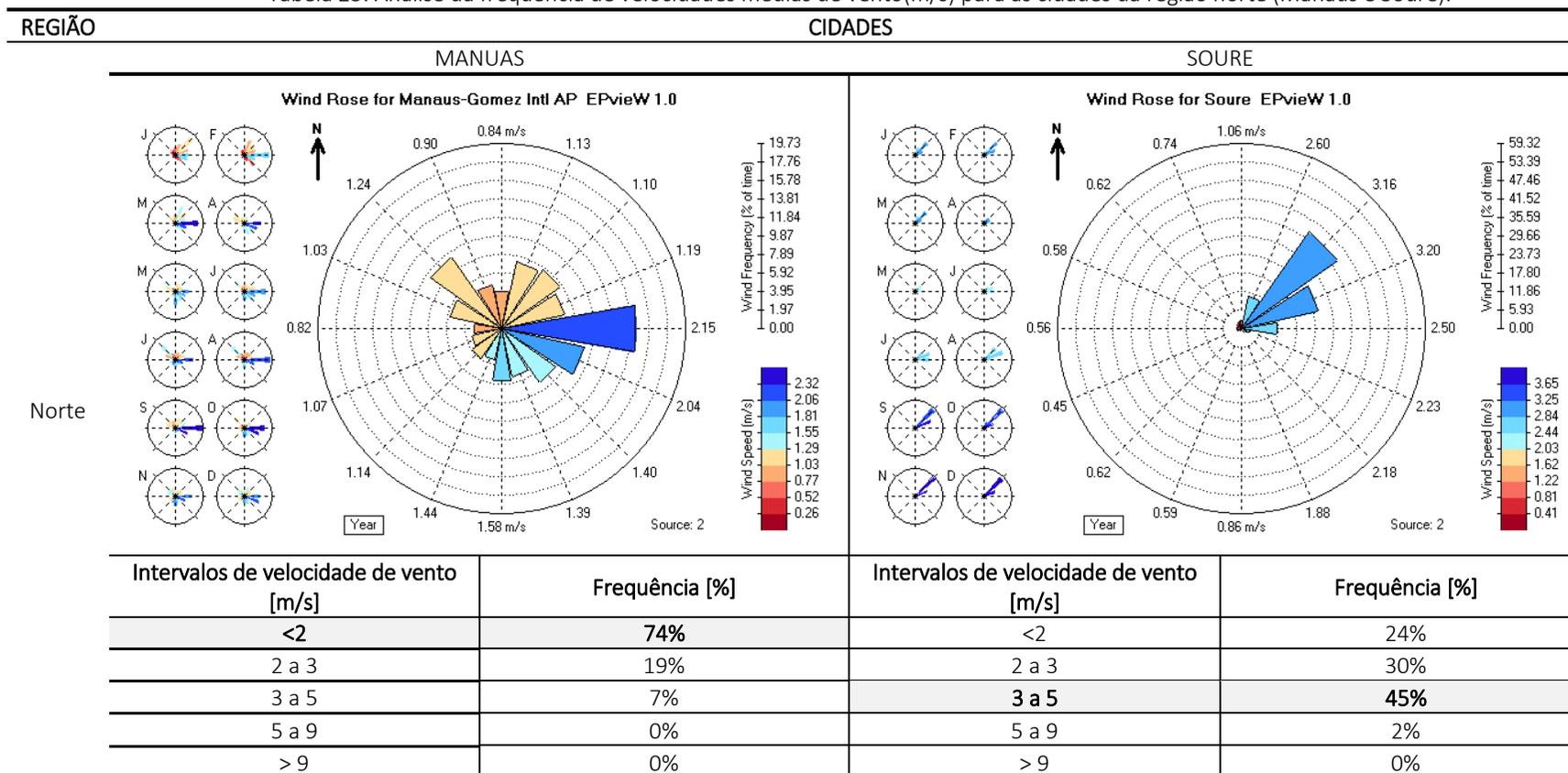
VIANNA, N. S.; GONÇALVES, J. C. S. **Iluminação e Arquitetura**. São Paulo: Geros, 2001.

WANG, L.; WONG, N. H. Coupled simulations for naturally ventilated rooms between building simulation (BS) and computational fluid dynamics (CFD) for better prediction of indoor thermal environment. **Building and Environment**, v. 44, n. 1, p. 95–112, 2009.

8. APÊNDICES

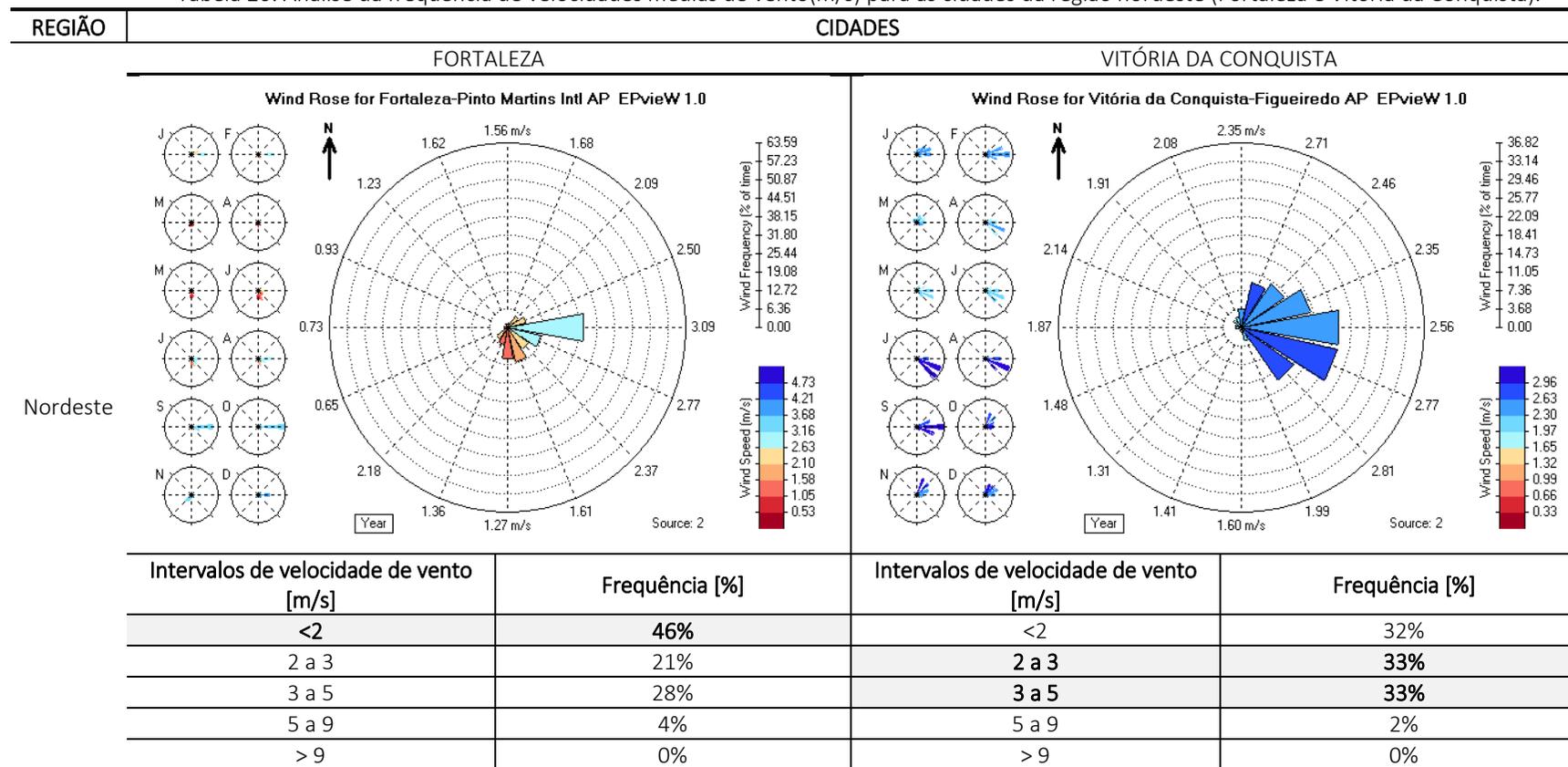
Apêndice A. Análises quantitativas para a determinação da frequência de velocidades médias de vento no território brasileiro

Tabela 25: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região norte (Manaus e Soure).



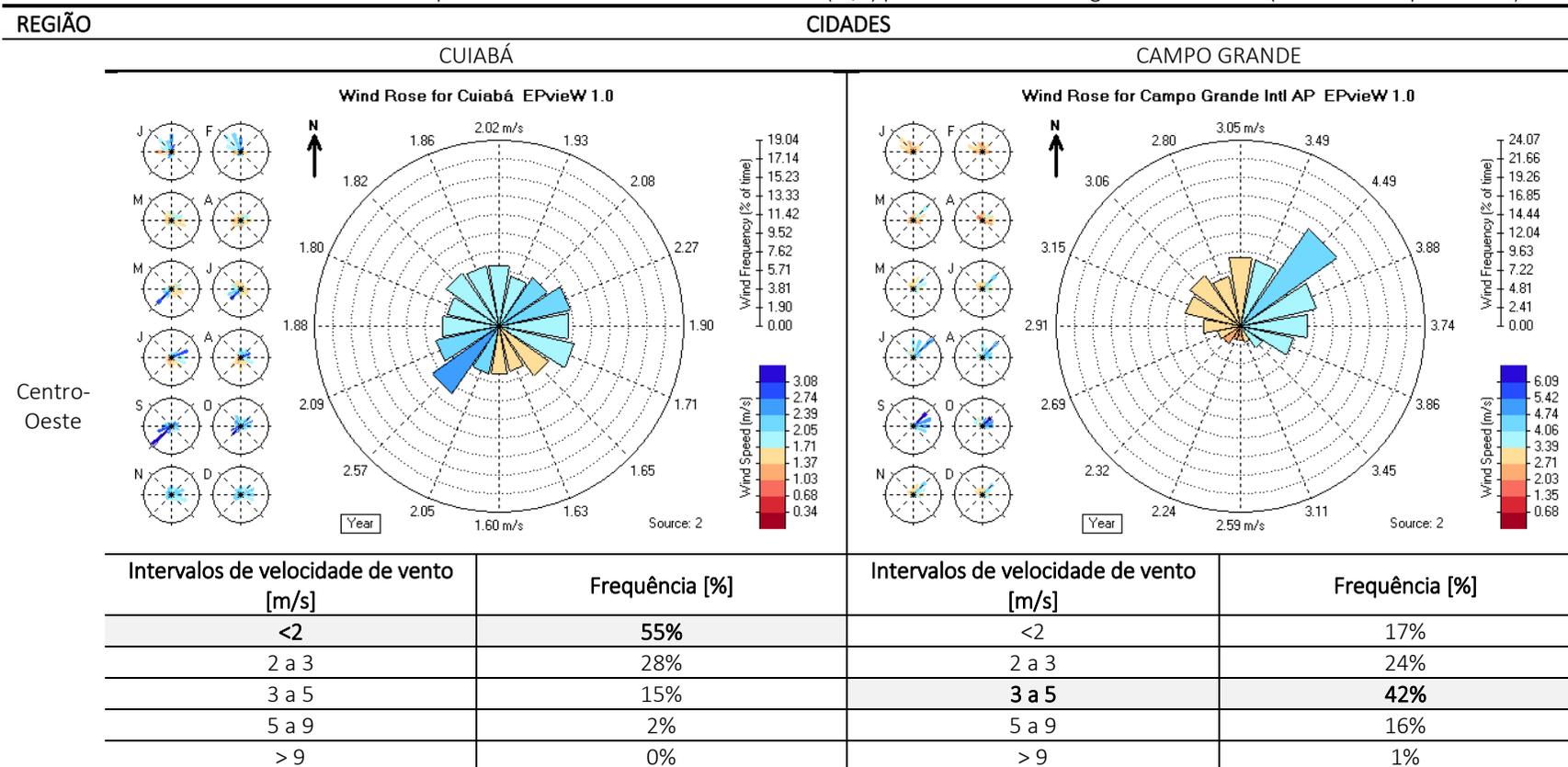
Fonte: A autora (2018) baseado nos dados dos arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012) e atualizados por LabEEE (2016).

Tabela 26: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região nordeste (Fortaleza e Vitória da Conquista).



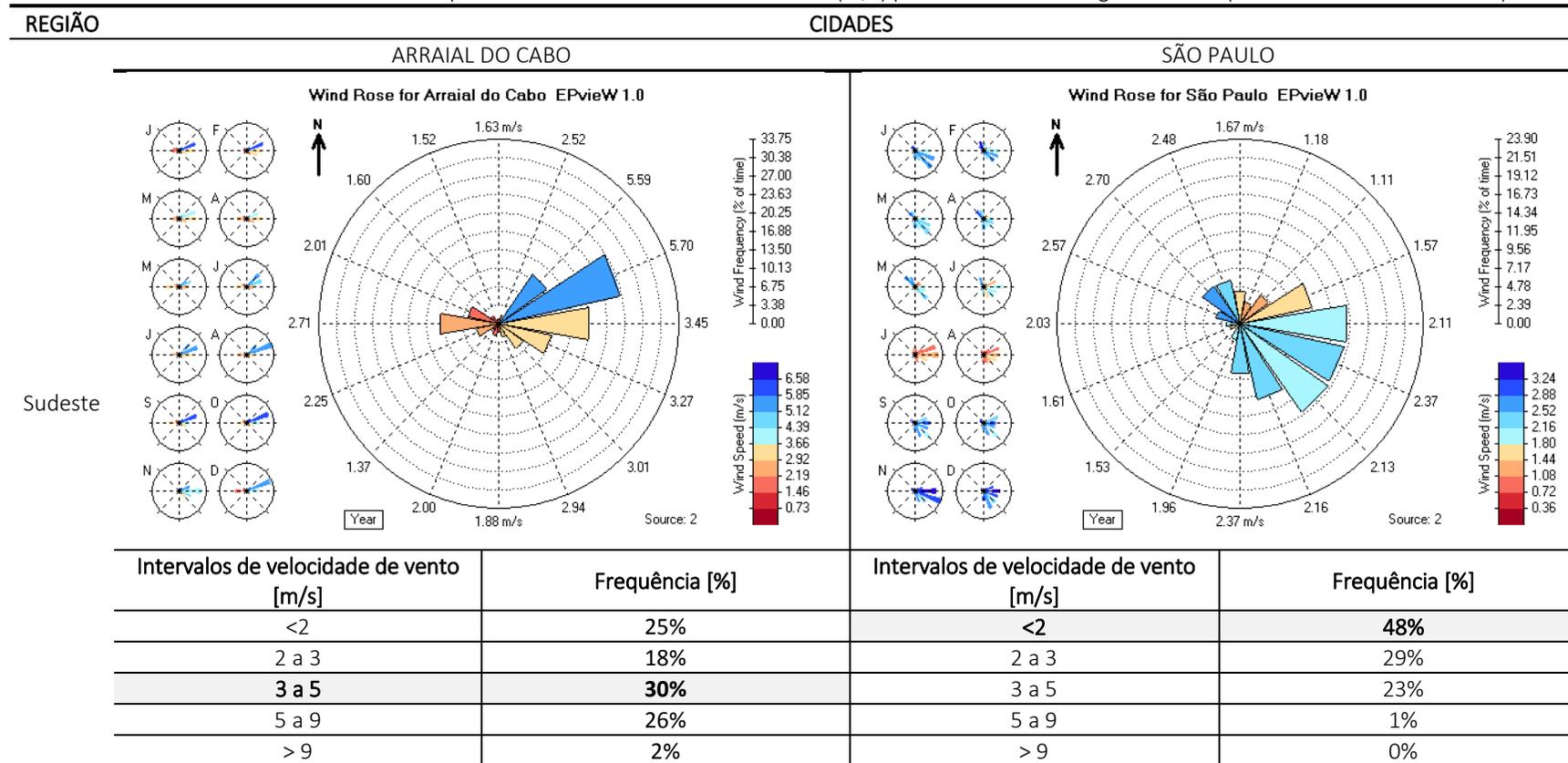
Fonte: A autora (2018) baseado nos dados dos arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012) e atualizados por LabEEE (2016).

Tabela 27: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região centro-oeste (Cuiabá e Campo Grande).



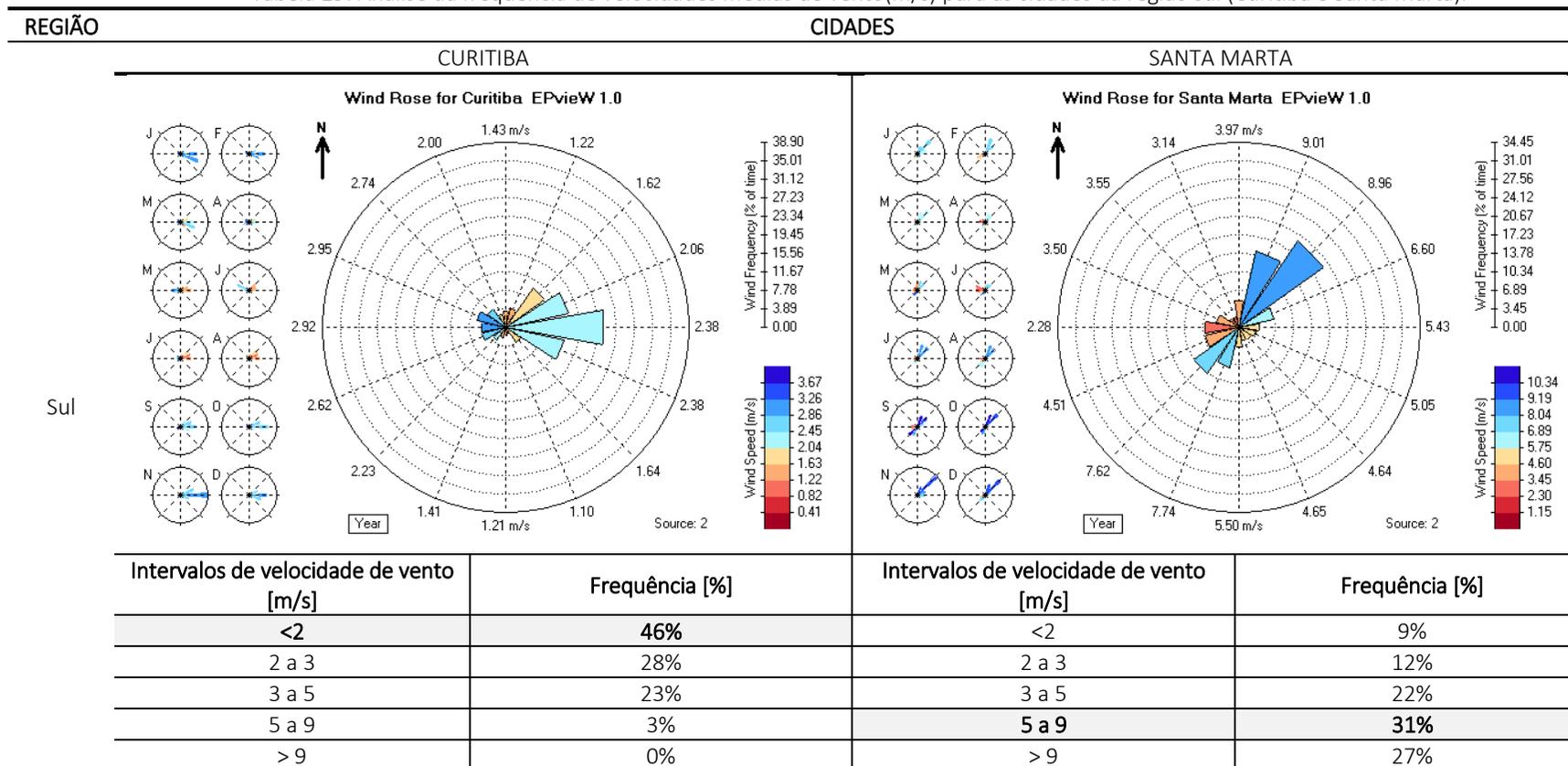
Fonte: A autora (2018) baseado nos dados dos arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012) e atualizados por LabEEE (2016).

Tabela 28: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região sudeste (Arraial do Cabo e São Paulo).



Fonte: A autora (2018) baseado nos dados dos arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012) e atualizados por LabEEE (2016).

Tabela 29: Análise da frequência de velocidades médias de vento(m/s) para as cidades da região sul (Curitiba e Santa Marta).



Fonte: A autora (2018) baseado nos dados dos arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012) e atualizados por LabEEE (2016).

Apêndice B. Análises qualitativas: elaboração de máscaras de sombras para averiguar o potencial de sombreamento dos protetores solares que caracterizam o modelo genérico.

Tabela 30: Análise do potencial de sombreamento do dispositivo horizontal para as latitudes de 4°N a 32°S, com intervalos de 4°.

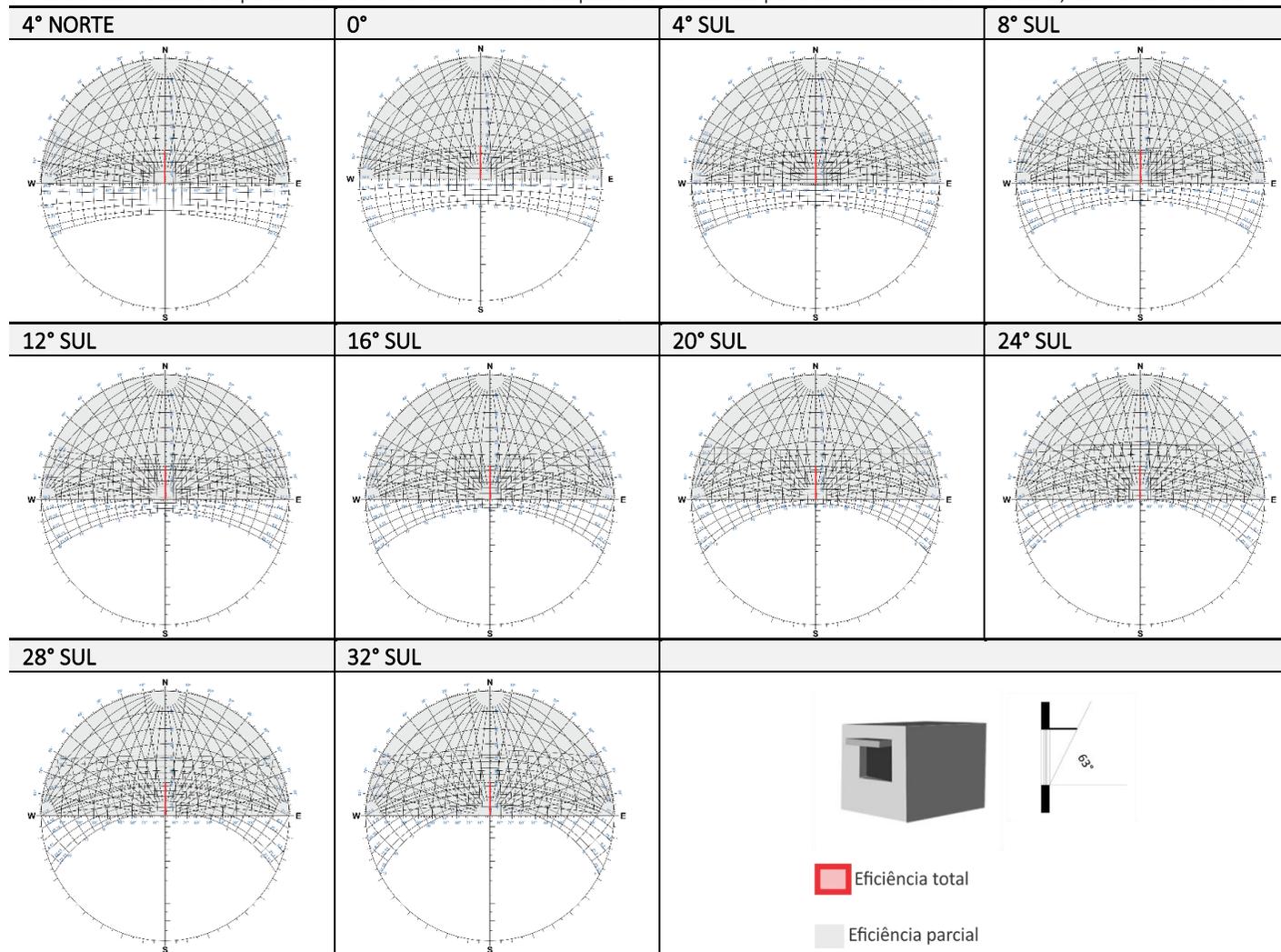
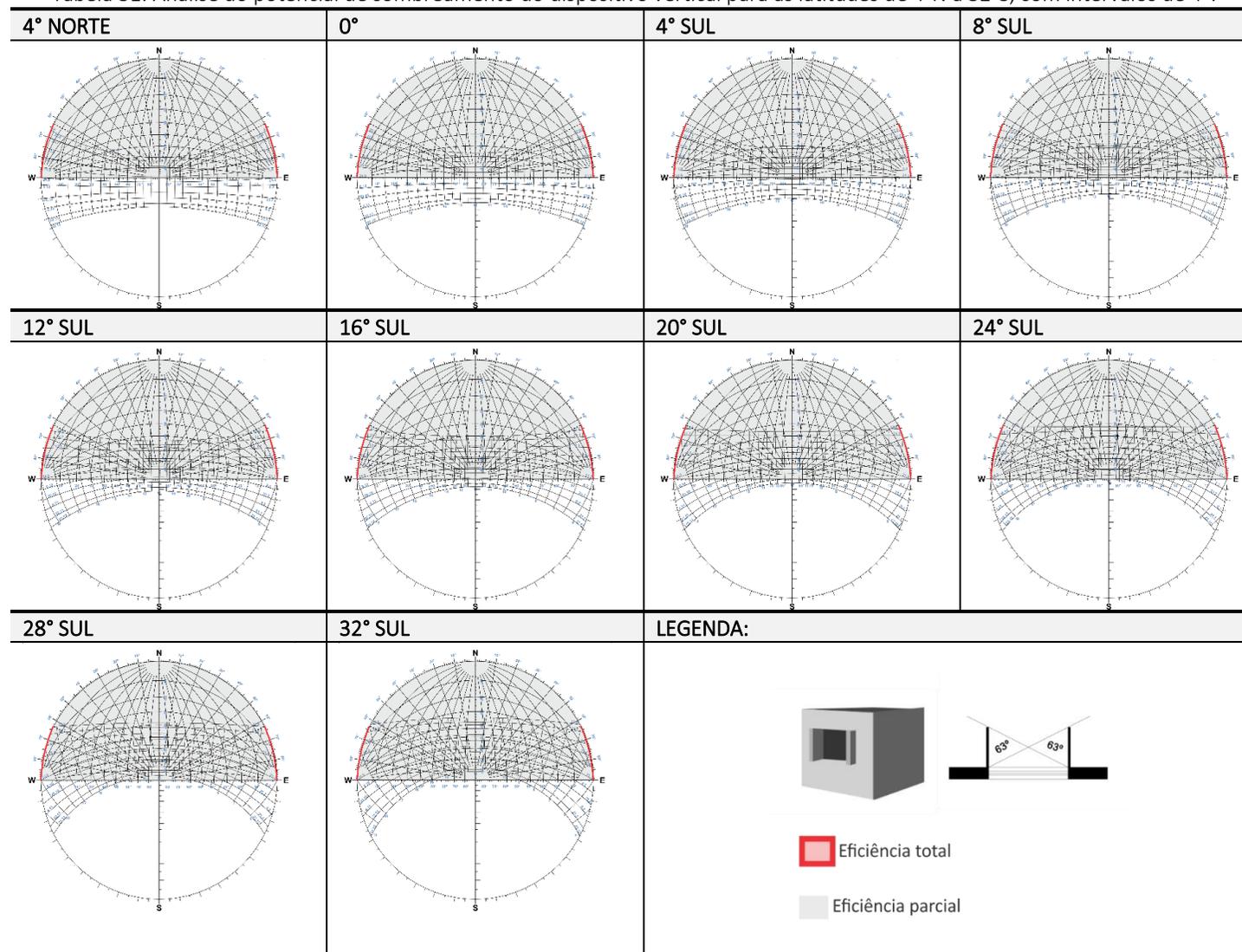
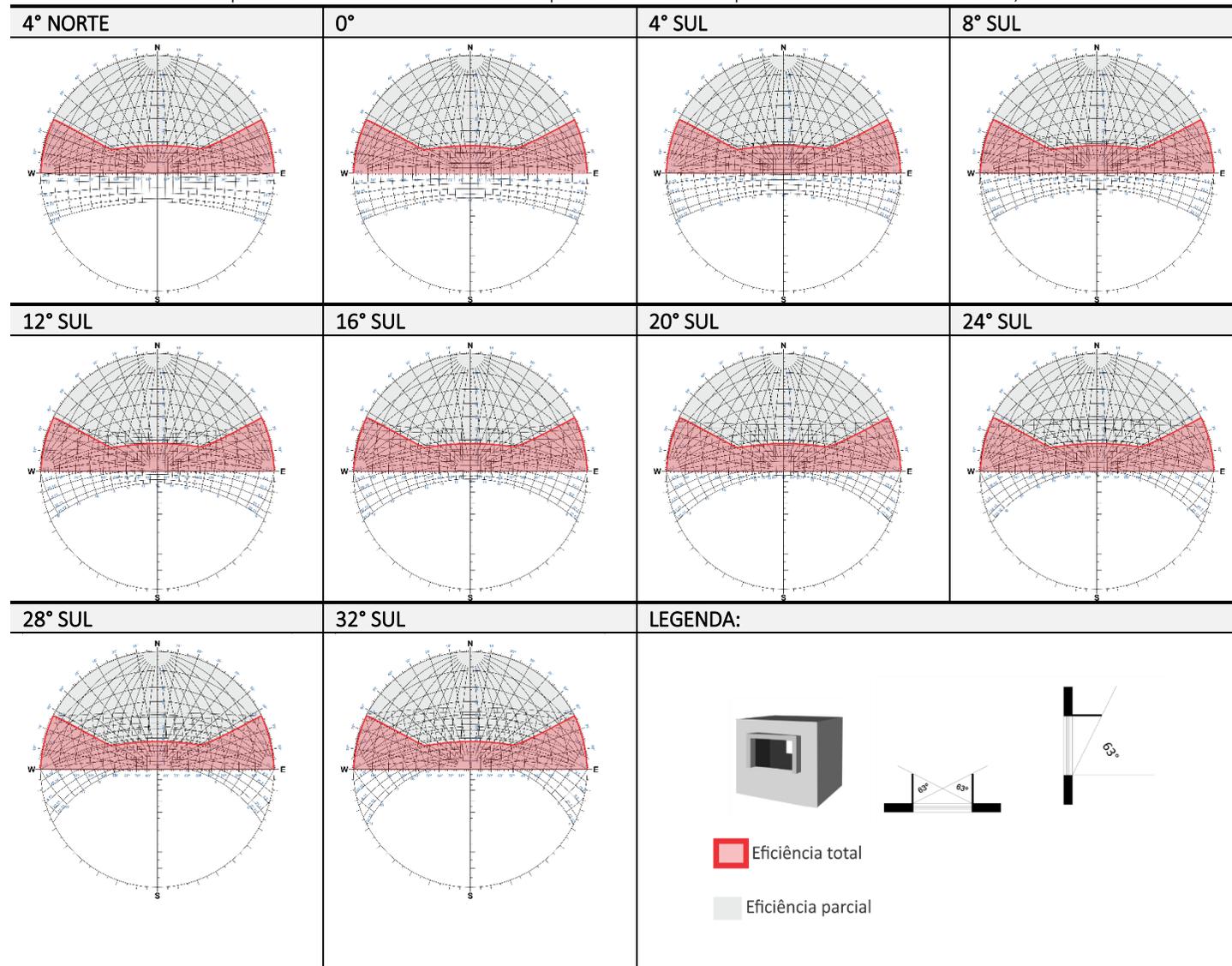


Tabela 31: Análise do potencial de sombreamento do dispositivo vertical para as latitudes de 4°N a 32°S, com intervalos de 4°.



Fonte: A autora (2018).

Tabela 32: Análise do potencial de sombreamento do dispositivo combinado para as latitudes de 4°N a 32°S, com intervalos de 4°.



Fonte: A autora (2018).