

**DISPOSI
TIVOS
DE
SOMBRE
AMENTO**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO
NO DESEMPENHO DA
VENTILAÇÃO NATURAL**

**MICHELE MARTA ROSSI
2021**

Créditos da capa: Paula Pacheco

MICHELE MARTA ROSSI

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

Versão Corrigida

Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP) para a obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de concentração:

Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

Orientadora:

Prof^ª. Dr^ª. Karin Maria Soares Chvatal | IAU – USP.

Coorientadora:

Prof^ª. Dr^ª. Alessandra Rodrigues Prata Shimomura | FAU – USP.

Supervisor no exterior:

Prof. Dr. Fernando Vítor Marques da Silva | LNEC.

Apoio:

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior | CAPES.

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R833d Rossi, Michele Marta
Dispositivos de sombreamento: avaliação do impacto
no desempenho da ventilação natural / Michele Marta
Rossi; orientadora Karin Maria Soares Chvatal; co
orientadora Alessandra Rodrigues Prata Shimomura. --
São Carlos, 2021.
283 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2021.

1. Ventilação natural. 2. Túnel de vento. 3.
Dispositivos de sombreamento. 4. Coeficientes de
pressão devido ao vento (Cp). I. Chvatal, Karin
Maria Soares, orient. II. Prata Shimomura,
Alessandra Rodrigues, co-orient. III. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:

Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229



Universidade de São Paulo

ATA DE DEFESA

Aluno: 102131 - 6445720 - 2 / Página 1 de 1

Ata de defesa de Tese do(a) Senhor(a) Michele Marta Rossi no Programa: Arquitetura e Urbanismo, do(a) Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

Aos 23 dias do mês de junho de 2021, no(a) Via Plataforma StreamYard realizou-se a Defesa da Tese do(a) Senhor(a) Michele Marta Rossi, apresentada para a obtenção do título de Doutora intitulada:


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

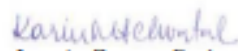
Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:


Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Karin Maria Soares Chvatal	Presidente	IAU - USP	Não Votante
Anesia Barros Frota	Titular	FAU - USP	_aprovada
Leonardo Salazar Bittencourt	Titular	UFAL - Externo	_aprovada_____
Kelen Almeida Dornelles	Titular	IAU - USP	_aprovada_____
Renan Cid Varela Leite	Titular	UFC - Externo	_aprovada_____
Fernando Vítor Marques da Silva	Titular	Externo	_aprovada_____


Resultado Final: Aprovada


Parecer da Comissão Julgadora *

Eu, Ana Paula Sampaio Fregona , lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Carlos, aos 23 dias do mês de junho de 2021.


Anesia Barros Frota


Leonardo Salazar Bittencourt


Kelen Almeida Dornelles


Renan Cid Varela Leite


Fernando Vítor Marques da Silva


Karin Maria Soares Chvatal
Presidente da Comissão Julgadora

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em 07/07/2021 e, portanto, o(a) aluno(a) faz jus ao título de Doutora em Ciências obtido no Programa Arquitetura e Urbanismo - Área de concentração: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.


Tomaz Antonio Moreira
Presidente da Comissão de Pós-Graduação
IAU-USP

“O estudo é a maior herança que podemos deixar para você...”

Aos meus pais, Jussara Rossi e Laércio Rossi.

AGRADECIMENTOS

É junto dos bõo que a gente fica mió!

(GUIMARÃES ROSA)

Primeiramente, agradeço ao Arquiteto do Universo por me conceder sabedoria e fortalecer minha fé durante toda essa caminhada.

À minha família, meu alicerce! Por sonhar meus sonhos, compreender minhas inúmeras ausências e por ter plantado, desde muito cedo, neste coração o amor pelos livros e a ânsia pelo conhecimento.

Ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, meu segundo lar! Treze anos de IAU-USP. Em 2008, ao cruzar o portal principal não imaginava o quanto do mundo e o quanto de mim iria conhecer neste local. Com certeza, transformei-me com auxílio desta Instituição, em uma profissional, pesquisadora e pessoa melhor. Gratidão a todos os meus professores, em especial, à minha orientadora Dr^a. Karin Chvatal por me apresentar, ainda na graduação, o vento e a pesquisa acadêmica. Por sempre confiar no meu trabalho, orientar-me e encorajar-me a embarcar em voos mais altos. Obrigada por todo o ensinamento durante essa parceria de longa data!

Agradeço imensamente às contribuições sempre pertinentes da Profa. Dr^a. Rosana Caram e da Profa. Dr^a. Kelen Dornelles.

À minha coorientadora Dr^a. Alessandra Prata Shimomura pela praticidade, revisões e apontamentos pertinentes, visando sempre estreitar a relação entre dado científico e projeto arquitetônico.

Aos funcionários, peças fundamentais para que muito do aqui hoje apresentado se concretizasse. À Mara e à Flávia por sempre me auxiliarem em todos os procedimentos acadêmicos com muita simpatia. À Brianda pela prontidão na resolução das minhas dúvidas, principalmente em época de pandemia. À Andreia no auxílio durante o processo de internacionalização. Ao Dibbo, meu pai são-carlense, por sempre fazer milagres nos meus modelos físicos. E, ao Valmir pelo alto astral certo e diário mesmo às 8h da manhã.

A todos integrantes do grupo de pesquisa Tropicus que, por vezes, em reuniões ou nos cafés, contribuíram para este trabalho e para minha caminhada acadêmica. Ao Laboratório de Conforto Ambiental por possibilitar a infraestrutura necessária para a realização de várias etapas desta pesquisa. Ao nosso técnico, Físico e amigo, Pedro Mattia, pela prontidão em ajudar e pela instigação que sempre nos guiou a descobertas surpreendentes.

À Central de Análises Químicas Instrumentais (CAQI) do Instituto de Química de São Carlos – USP São Carlos (IQSC), especificamente à Aline de Oliveira Silva, pelas aferições de viscosidade da solução utilizada nos ensaios em mesa d'água, cujos resultados auxiliaram indiretamente as investigações desta tese. Ao professor Dr. Wagner Polito pelas assessorias no entendimento dos dados. Ao Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto do Departamento de Hidráulica e Saneamento da USP São Carlos pelas pertinentes contribuições e ao Laboratório de Conforto Ambiental do IAU-USP por financiar às aferições junto ao CAQI – IQSC.

Ao professor Dr. Leandro Franco de Souza do Laboratório de Matemática Aplicada e Computação Científica do ICMC –USP por me permitir participar do Curso de Extensão Universitária na modalidade de Difusão: Introdução ao OpenFOAM®. Ao professor Dr. Paulo Celso Greco Júnior da Engenharia Aeronáutica da EESC-USP por ser sempre tão solícito na resolução das minhas dúvidas sobre fluidodinâmica.

Aos bolsistas de iniciação científica do Programa Unificado de Bolsas da Universidade de São Paulo, Fernanda Itkes Vale e Felipe Oliveira, por darem seus primeiros passos no mundo da pesquisa acadêmica na contribuição da elaboração desta Tese, auxiliando nos ensaios em mesa d'água (na fotografia, edição de vídeos e elaboração de desenhos), na preparação do modelo físico e no pós-processamento dos dados dos ensaios realizados no túnel de vento do IPT. A vocês, meu muito obrigada!

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) por viabilizar por meio de convênio, os ensaios no túnel de vento do Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos correspondentes à primeira etapa desta pesquisa. Aos Engenheiros Dr. Gilder Nader e Dr. Paulo Jabardo meus sinceros agradecimentos pela assessoria durante todo o processo. À estagiária Gabriela Porfírio pelo auxílio na preparação e na instrumentação do modelo para os ensaios. Ao Engenheiro Dr. Gabriel Borelli Martins, pelos apontamentos sempre tão pertinentes, resoluções de dúvidas, revisão e elaboração de materiais e pela amizade que o vento possibilitou construir ao longo desta pesquisa.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por permitir, por meio de convênio, a utilização do túnel de vento do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas e, conseqüentemente, a aferição de uma extensa quantidade de dados de pressão e de velocidade que embasaram grande parte do desenvolvimento deste trabalho. Ao Gabinete de Relações Públicas e Técnicas do LNEC, especialmente à Sônia e à Manuela, por me auxiliarem em todos os procedimentos durante minha estadia nas dependências da Instituição. Ao Engenheiro Rogério Bairrão no auxílio à calibração do anemômetro de hélice. Ao Cláudio Neves pelo incansável trabalho e estimado capricho na execução dos detalhamentos do modelo físico e na fabricação dos elementos e peças para a simulação da Camada Limite. À Técnica Susana de Almeida pela assistência durante os ensaios qualitativos.

Ao Engenheiro Dr. Fernando Marques da Silva, minha eterna gratidão! Trabalhar ao seu lado foi uma grande ousadia e um verdadeiro presente! Obrigada por sempre balizar meus passos, por me testar diariamente, incentivar-me e amparar-me nas minhas dúvidas e angústias que, por vezes, ou melhor que por muitas vezes, surgiram. Muito obrigada, Mestre!

Ao Prof. Dr. Renan Leite e ao doutorando Samuel Bertrand por receberem com tanta simpatia minhas dúvidas e compartilharem, sempre com humildade, o conhecimento necessário para a resolução das mesmas.

Ao amigo e professor Dr. Victor Roriz pelos “pitacos” sempre tão certos, pelas parcerias nas consultorias, cursos e palestras ministrados. Ao Prof. Dr. Maurício Roriz (*in memoriam*) por olhar meu trabalho com muito interesse e carinho ainda na graduação.

À Mari Lukiantchuki, parceira de vida e de ventos e que tanto contribuiu para este trabalho, minha eterna gratidão!

Ao Centro Universitário da Fundação de Ensino Octávio Bastos (UNIFEOB) por possibilitar a minha estreia no mundo docente e, conseqüentemente, a oportunidade de validar a minha escolha. Ao curso de Arquitetura e Urbanismo, primeiramente, agradeço aos alunos pelo caminho de mão dupla compartilhado, em que ensinei, mas aprendi muito mais. Ao coordenador Ricardo Ciaco por confiar no meu trabalho e sempre assessorar, pacientemente, a “professora-bixo”. Aos professores e amigos de profissão e, agora de vida, Isabela Donato e Gabriel Prata, pela parceria nos desafios e alegrias deste período.

Às @conforteiras, Rosilene Brugnera, Caroline Santesso, Lorena Couto, Ana Favretto e Marieli Lukiantchuki, por se aventurarem comigo neste projeto e que, com certeza, agregou mais leveza aos meus dias e pertinentes discussões que, ainda que indiretamente, refletiram nesta Tese de Doutorado.

Às revisões minuciosas dos materiais desenvolvidos nesta Tese feitas pelos amigos Júlio Franco, Carol Santesso, Beatriz Fialho, Lorena Couto, Pedro Mattia, Gabriel Borelli, Verônica Freitas e Mari Lukiantchuki.

Aos amigos-irmãos que o IAU-USP me possibilitou conhecer, por todas alegrias e forças compartilhadas ao longo desta caminhada acadêmica, em especial, Rosi e Andrey Brugnera, Carol Santesso, Héctor Castaño, Ana Favretto, Camila Grassi, Júlio Franco, Louise Logston, Lorena Couto, Vinícius Almeida, Amanda Fontenelle, Lucas Melchiori, Verônica Freitas, Heliara Costa, Beatriz Fialho, Marina Lages, Paula Pacheco, Ana Gambardella, Leonardo Castro, Fran Ribeiro, Jasmine Luiza e Miranda Nedel.

Aos amigos que Portugal me deu: Marcel, Lucas, Eris, Fabiana, Gabriela, Nuno, Margarida e Aida. Obrigada por tantos momentos e bons vinhos compartilhados. Ao Marcel e ao Eris agradeço pelas fotos gentilmente cedidas (da estore de correr projetável e do *brise-soleil* do Ministério da Educação e Saúde) ao meu acervo pessoal e presentes nesta tese. À Camila Rocha por me receber tão bem no alojamento do LNEC e por me passar rapidamente todas as dicas acerca da vida lisboeta.

A todos, demais familiares e amigos, que ajudaram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho dando o suporte e amor necessários.

Por fim, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior¹ por viabilizar esta pesquisa a partir da concessão das bolsas de doutorado nacional e internacionais, esta última por meio do Programa Capes PrInt.

¹ O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Não sabia que caminho tomar
Mas o vento soprava forte,
E segui o caminho para onde o vento me soprava nas costas.
Assim tem sido sempre a minha vida, e assim quero que possa ser sempre...
Vou onde o vento me leva e não me deixo pensar.

Fernando Pessoa

RESUMO

ROSSI, Michele Marta. **Dispositivos de sombreamento:** avaliação do impacto no desempenho da ventilação natural. 2021. Tese (Doutorado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

A ventilação natural é uma eficiente estratégia para garantir os níveis adequados de renovação do ar e de conforto térmico aos usuários nos espaços internos, sendo a sua indução decorrente de um diferencial de pressão originado por ação eólica, térmica ou conjugada. Na ação eólica, esse diferencial é quantificado a partir dos coeficientes de pressão, denominados de Cps. Os Cps são sensíveis a orografia, ângulo de incidência do vento, entorno, geometria da edificação, e detalhamentos nas fachadas principalmente quando localizados nas adjacências de suas aberturas. Em climas quentes e úmidos, como em grande parte do território brasileiro, a combinação de estratégias de ventilação natural e de sombreamento das aberturas pode contribuir para a melhoria do conforto térmico e para a redução do condicionamento artificial e do consumo energético nas edificações. Contudo, apesar da importância do uso de dispositivos de sombreamento, poucos são os estudos que fornecem ao projetista dados quantitativos acerca do seu impacto no desempenho da ventilação natural. A maioria dos dados disponíveis fazem referência a geometrias regulares, lisas e seladas. Desta forma, nesta pesquisa, parte-se da hipótese de que os dispositivos de sombreamento externos influenciam na distribuição de pressão e, logo, valores de Cps obtidos por meio de geometrias lisas devem ser utilizados com criticidade para avaliações e/ou estimativas de edificações naturalmente ventiladas com sombreamentos. Assim, objetiva-se avaliar e mensurar o impacto das características projetuais de diferentes dispositivos de sombreamento externos no desempenho da ventilação natural em um modelo genérico isolado de 3,0 m x 3,0 m x 2,7 m com duas aberturas (de 1 m² cada) dispostas em faces opostas, centralizadas e posicionadas a 1,1 m do piso, através, prioritariamente, da distribuição de pressão na sua envoltória. A partir de ensaios em túneis de vento de 18 tipologias expostas a diferentes incidências, determinou-se o impacto quantitativo (nomeado de Φ) da adoção destes elementos arquitetônicos na ventilação natural. Ademais, indicou-se com base nos dados aferidos áreas e valores mais adequados para a determinação do diferencial de pressão efetivo (ΔCp) e do coeficiente de descarga (Cd). Por fim, os resultados apontaram que, exceto para geometrias mais restritivas, a adoção dos sombreamentos no intervalo de ângulo de incidência de vento de -15° a 30° resulta em incremento do potencial de ventilação (em até 40%), dependendo da tipologia de sombreamento analisada, quando comparado ao estimado por dados usuais, ou seja, Cps provenientes de aferições em modelos selados e Cd igual a 0,60. Ademais, o afastamento dos elementos do limiar da abertura pode representar uma efetiva estratégia aos 45°. E, em 90°, a incorporação de sombreamentos ao alterar a concordância nas distribuições de pressão entre as faces opostas resulta em incrementos nas taxas de renovação do ar.

Palavras-chave: Ventilação natural. Túnel de vento. Dispositivos de sombreamento. Coeficientes de pressão devido ao vento (Cp).

ABSTRACT

ROSSI, Michele Marta. **Shading devices:** assessment of the impact on the natural ventilation performance. 2021. Thesis (PhD) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Natural ventilation is an efficient strategy to ensure adequate levels of air change rates and thermal comfort for users in indoor spaces, caused by a pressure differential resulting from wind or thermal actions, or a combination. In wind action, this differential is quantified by the wind pressure coefficients, called WPCs. The WPCs are sensitive to orography, wind direction, surroundings, building's geometry and details on the facades, especially when located close to the openings. In hot and humid climates, as most of the Brazilian territory, the combination of natural ventilation and shading strategies can contribute to the improvement of thermal comfort and to the reduction of air conditioning and energy consumption in buildings. However, despite the importance of using shading devices, there are few studies that provide designers with quantitative data about their impact on natural ventilation performance. Most of the available data refer to the regular, smooth and sealed geometries. Thus, in this research, it is assumed that the external shading devices influence in the pressure distribution and, therefore, WPCs values obtained from smooth geometries should be used critically for evaluation and/or estimates of naturally ventilated buildings with shadings devices. Therefore, the aim is to evaluate and measure the impact of design characteristics of different external shading devices on natural ventilation performance in an isolated generic model of 3,0 m x 3,0 m x 2,7 m, primarily by the pressure distribution in its envelope. The model displays two openings (of 1 m² each) placed on opposite sides, centered and positioned at 1,1 m from the floor. Based on wind tunnel tests of 18 typologies exposed to different wind directions, the quantitative impact (named Φ) of the adoption of these architectural elements in natural ventilation was determined. Furthermore, based on the measured data, the most suitable areas and values for determining the effective pressure differential (ΔC_p) and discharge coefficients (C_d) were indicated. Finally, the results indicated that, except for more restrictive geometries, the adoption of shading devices positioned an angle varying from -15° to 30° increased the potential for natural ventilation (up to 40%), depending on the typology of shading analyzed, when compared to the values estimated by the usual data, that is, C_p s from measurements in sealed models and C_d equal to 0.6. In addition, when shading elements are positioned away from the opening, they can represent an effective strategy at 45° . And, at 90° , the incorporation of shading when changing the agreement in the pressure distributions between the opposite facades results in increases in the air change rates.

Keywords: Natural ventilation. Wind tunnel. Shading devices. Wind pressure coefficient (WPC).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Estrutura da Tese.	47
Figura 2: Caracterização dos comportamentos e efeitos típicos da interação do vento com as edificações.	55
Figura 3: Ventilação natural por indução eólica.	59
Figura 4: Ventilação natural por indução térmica.	60
Figura 5: Campos de pressão originados em uma edificação por indução eólica.	65
Figura 6: Cinco tipologias de dispositivos de sombreamento para as quais, a partir de simulações fluidodinâmicas, valores de Cd foram indicados.	72
Figura 7: Erro relativo das taxas de ar calculadas com base na equação do orifício confrontados com dados das simulações de Tominaga e Blocken (2016) para diferentes configurações de abertura em um cubo.	72
Figura 8: Valores de Cd (aferidos e referenciados pela literatura científica) para sete tipologias de janelas.	73
Figura 9: Diagrama ilustrativo da mesa d'água.	78
Figura 10: Impactos na distribuição de pressão, renovações de ar, temperaturas internas e conforto térmico correspondentes aos casos analisados por Castaño (2017).	84
Figura 11: Análise da influência de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento na velocidade média do ar.	86
Figura 12: Análise do impacto da presença de sacadas na distribuição de pressão nas envoltórias do modelo.	88
Figura 13: Configurações de grelhas de ventilação em um modelo genérico	91
Figura 14: Procedimento metodológico para a definição dos modelos.	98
Figura 15: Definição dos modelos.	99
Figura 16: Modelo genérico utilizado por Kato et al. (1992).	102
Figura 17: Modelo genérico utilizado por Kurabuchi et al. (2000).	102
Figura 18: Modelo genérico de Jiang et al. (2003) adotado no estudo de Evola e Popov (2006).	102
Figura 19: Modelo genérico desenvolvido por Larsen (2005) e Larsen e Heiselberg (2008) e adotado no estudo de Nikas, Nikolopoulos, Nikolopoulos (2010).	103
Figura 20: Modelos desenvolvidos por Karava (2008) e adotados por Meroney (2009).	103
Figura 21: Modelo de Karava (2008) utilizado por Ramponi e Blocken (2012b).	104
Figura 22: Modelos com diversas inclinações de telhados resultantes de variações do modelo de Karava (2008).	104
Figura 23: Modelo genérico com variações nas inclinações dos beirais nas faces barlavento e sotavento.	105
Figura 24: Modelo de uma habitação de interesse social típica brasileira desenvolvida por Rossi (2016); Favretto, (2016) e Anchieta (2016).	106
Figura 25: Área das saletas comerciais (m ²) (% do total).	107
Figura 26: Largura da saleta (m) (% do total).	107
Figura 27: Tipologias dos dispositivos de sombreamento a serem inicialmente variadas no modelo genérico.	110

Figura 28: Modelos físicos reduzidos em planta (a) e em corte longitudinal (b) confeccionados em acrílico 3 mm para os ensaios em mesa d'água.....	112
Figura 29: Mesa d'água do Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do IAU-USP.....	115
Figura 30: Sistema elaborado para a captura de imagens e vídeos dos ensaios em mesa d'água no LCA (IAU-USP).....	115
Figura 31: Etapas do processo de visualizações do fluxo de ar a partir de ensaios em mesa d'água.	116
Figura 32: Tipologias ensaiadas no túnel de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).....	124
Figura 33: Tipologias ensaiadas no túnel de vento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).....	125
Figura 34: <i>Brise-soleil</i> do Ministério de Educação e Saúde.....	127
Figura 35: Estore de correr projetável ou persiana Copacabana.	127
Figura 36: (a e b) Túnel de vento de camada limite atmosférica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT); (c) área da seção transversal de ensaio.....	132
Figura 37: Tipologias ensaiadas no túnel de vento do IPT.	134
Figura 38: Caracterização da Camada Limite Atmosférica para os ensaios no túnel de vento do IPT.....	135
Figura 39: Curva do perfil de velocidade média (dados experimentais e lei logarítmica).	136
Figura 40: Determinação do expoente α a partir da equação da reta originada do $\log(U/U_{ref})$ por $\log(Z/Z_{ref})$	137
Figura 41: Perfil da lei de potência ($\alpha=0,29$), utilizado nos ensaios no túnel de vento do IPT.....	137
Figura 42: Processo de confecção do modelo físico reduzido: (a) corte a <i>laser</i> das peças; (b,c) peças móveis; (d) perfurações para alocar as tomadas de pressão, (e,f) peças a serem alocadas junto às aberturas (elementos de vedação e dos dispositivos de sombreamento); (g) fixação das mangueiras plásticas nas perfurações com cola instantânea e, (h) identificação das tomadas de pressão.....	138
Figura 43: Mapeamento das tomadas de pressão nas faces do modelo genérico (A: face sotavento, B: lateral 01, C: face barlavento e D: face lateral).139	139
Figura 44: Detalhe da câmara de ar constituída entre as duas cascas do modelo para a passagem dos tubos plásticos conectados às tomadas de pressão e das guias para garantir o encaixe entre as peças.....	140
Figura 45: Preparação do modelo físico reduzido para os ensaios: (a), (b) e (c) conexão dos tubos plásticos aos canais dos módulos de medição de pressão; (d) e (e) fixação do modelo sobre suporte de apoio e, posteriormente, o conjunto na mesa de ensaio do túnel de vento do IPT.....	141
Figura 46: Túnel de camada limite atmosférica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).	143
Figura 47: Matriz ensaiada no túnel de vento do LNEC.....	145
Figura 48: Configuração inicial da CLA (idêntica a dos ensaios preliminares).....	146
Figura 49: Configuração inicial da CLA adotada nos ensaios do LNEC.....	146
Figura 50: Caracterização da CLA no túnel de vento do LNEC.....	146
Figura 51: Procedimento de aferição do perfil de velocidades.	147
Figura 52: Perfil de velocidades resultante da camada limite atmosférica utilizada nos ensaios no túnel de vento do LNEC.....	147
Figura 53: Mapeamento das tomadas de pressão na envoltória externa do modelo genérico.	148
Figura 54: Processo de preparação do modelo físico reduzido.	149

Figura 55: Preparação para os ensaios quantitativos no túnel de vento do LNEC.....	151
Figura 56: Preparação para os ensaios qualitativos no túnel de vento do LNEC.	152
Figura 57: Túnel de vento do circuito fechado do LNEC utilizado para a calibração dos equipamentos.	153
Figura 58: Curva de calibração do anemômetro de fio quente correlacionando velocidades médias em m/s com tensão em V.....	154
Figura 59: Curva de calibração do anemômetro de hélice correlacionando velocidades médias em m/s com tensão em mV.....	154
Figura 60: Estrutura da análise de resultados do IPT.....	160
Figura 61: Mapeamento das tomadas de pressão (IP) utilizado para a elaboração dos gráficos de contorno e escala para a leitura dos dados de Cps. 161	
Figura 62: Exemplo do gráfico de linhas utilizado para a análise dos Cps ao longo de dois perímetros (superior, linha sólida e, inferior, tracejada) nas faces do modelo genérico para os diversos cenários avaliados.	161
Figura 63: Localizações típicas da área de estagnação em escoamento uniforme e com CLA.	164
Figura 64: Expansão da área de estagnação (demarcada na figura) na geometria G1B decorrente da inserção das aberturas no modelo genérico.	165
Figura 65: Reduções nas áreas de estagnação (demarcadas nas imagens) nas tipologias com sombreamentos (G2A, G2B e G2C) devido à ação das zonas de separação.	165
Figura 66: Comportamento da distribuição de pressão nas faces a sotavento das tipologias G1A, G1B, G2A, G2B e G2C.....	166
Figura 67: Diferencias médios de pressão ($\Delta C_{pm} = C_{pm} \text{ barlavento} - C_{pm} \text{ sotavento}$) calculados para as tipologias G1A (com e sem as tomadas de pressão localizadas nas aberturas), G1B, G2A, G2B e G2C para as diferentes incidências de vento (0° a 90° e 180°).	170
Figura 68: Estrutura da análise de resultados do LNEC.....	176
Figura 69: Mapeamento das tomadas de pressão nas faces barlavento e sotavento e escala de variação dos Cps utilizadas nas análises dos resultados do LNEC.	178
Figura 70: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G2: Característica (G2A, G2B, G2C e G2D) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas.....	179
Figura 71: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G3: Geometria: Assimétricas (G3A e G3B) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas.....	180
Figura 72: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G3: Geometria: Simétricas (G3C, G3D e G3E) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas.....	181
Figura 73: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G3: Geometria: Complexas (G3F e G3G) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas.....	181
Figura 74: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G3: Geometria Assimétricas (G3A e G3B) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para os ângulos de incidência de 15° , -15° , 30° e -30°	183
Figura 75: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G2: Características: Afastamento (G2B e G2D) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para o ângulo de incidência de 45°	184
Figura 76: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G2: Características: Afastamento (G2B e G2D) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para os ângulos de incidência de 60° , -60° , 75° e -75°	186

Figura 77: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G2: Características: Profundidade (G2C) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para o ângulo de incidência de 90°	187
Figura 78: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces sotavento das tipologias pertencentes ao G2: Características: Profundidade (G2A, G2B e G2C) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para o ângulo de incidência de 30°	188
Figura 79: Variação da relação U_{jan}/U_{ref} (em m/s) de acordo com o ângulo de incidência de vento (°) para as tipologias do G2: Características – Profundidade (G2A, G2B E G2C) e Afastamento (G2B E G2D) e.....	193
Figura 80: Áreas consideradas nos cálculos do diferencial de pressão médio ΔC_{pFF} , ΔC_{pFJ} , ΔC_{pAF} e ΔC_{pAA}	196
Figura 81: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G2A, G2B e G2C para os diferentes ângulos de incidência de vento.....	209
Figura 82: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G2B e G2D para os diferentes ângulos de incidência de vento.....	210
Figura 83: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G3A e G3B para os diferentes ângulos de incidência de vento.	211
Figura 84: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G3C, G3D e G3E para os diferentes ângulos de incidência de vento.....	213
Figura 85: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G3F e G3G para os diferentes ângulos de incidência de vento.	214
Figura 86: Porcentagem de horas do ano que cada velocidade do vento (m/s) atinge nas capitais da Zona Bioclimática 8.....	216
Figura 87: Velocidade média mensal do vento (m/s) de acordo com as Normais Climatológicas.....	216
Figura 88: Intensidade de vento (em m/s) no território brasileiro no período de 1981 a 2010.	217
Figura 89: Taxa de renovação de ar (ren) em um ambiente genérico sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) com velocidades médias de referência de 1,3 m/s (U_1) e 2,5 m/s (U_2) para o ângulo de incidência de 0°.....	219
Figura 90: Taxa de renovação de ar (ren) em um ambiente genérico sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) com velocidades médias de referência de 1,3 m/s (U_1) e 2,5 m/s (U_2) para ângulos de incidência de -90° a -15°.....	220
Figura 91: Taxa de renovação de ar (ren) em um ambiente genérico sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) com velocidades médias de referência de 1,3 m/s (U_1) e 2,5 m/s (U_2) para ângulos de incidência de -15° a 90°.....	221
Figura 92: Gradação das menores para as maiores taxas de renovação de ar no ambiente verificadas nas tipologias sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) para os ângulos de incidência de vento de -90° a 90°.....	226

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de k e α (coeficientes de rugosidade do terreno) para diferentes características do entorno.	62
Tabela 2: Características da camada limite atmosférica (categoria de terreno, descrição, expoente de rugosidade, α e espessura da camada em m).....	62
Tabela 3: Categorias quanto à rugosidade do terreno.	63
Tabela 4: Classes quanto às dimensões e características das edificações.....	64
Tabela 5: Valores mínimos do fator estatístico S_3	64
Tabela 6: Valores de C_d para aberturas de entrada e saída com incidência do vento perpendicular à abertura.	69
Tabela 7: Valores de C_d propostos por diversos estudos presentes na literatura científica.	70
Tabela 8: Estudos de ventilação cruzada e por indução eólica acerca do impacto no C_d de variações da porosidade da abertura, configuração (forma e posicionamento na fachada), variações nos ângulos de incidência de vento e número de <i>Reynolds</i>	71
Tabela 9: Características, vantagens e limitações dos modelos de estimativa e/ou avaliação do desempenho de estratégias de ventilação natural.....	77
Tabela 10: Tabela-resumo de estudos que observaram o impacto de elementos arquitetônicos (dispositivos de sombreamento, sacadas e grelhas de ventilação natural) na ventilação natural.....	92
Tabela 11: Tabela-resumo de estudos numéricos que utilizaram dados experimentais de modelos genéricos para validações.	101
Tabela 12: Dimensões internas dos ambientes (m) de maior permanência das unidades residenciais reunidas por Rossi (2016); Favretto (2016) e Anchieta (2016).	106
Tabela 13: Velocidade média interna do ar em relação à velocidade externa (em porcentagem) resultantes da variação da relação entre as aberturas de entrada e saída de ar.....	108
Tabela 14: Matriz de ensaios em mesa d'água	113
Tabela 15: Avaliação do impacto da variação da largura da abertura para os vãos equivalentes à 0,6 m; 1,0 m e 2,0 m.....	117
Tabela 16: Avaliações do impacto de protetores solares verticais e horizontais.....	119
Tabela 17: 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 1,0 m x 1,0 m e protetor solar de 0,5 m).	122
Tabela 18: 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.	133
Tabela 19: 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 (45°) às suas fachadas.....	133
Tabela 20: Dimensões do modelo genérico (em m) na situação de protótipo (escala real) e de modelo reduzido.....	134
Tabela 21: Velocidades médias (V em m/s) nas diferentes alturas (z em mm) do perfil de velocidades da CLA proposta nos ensaios no túnel de vento do IPT.....	136

Tabela 22: Exemplo de tabulação das tomadas de pressão correspondentes aos diversos canais pertencentes aos módulos de transdutores de pressão.	140
Tabela 23: Exemplo do formato em que os dados de Cps foram disponibilizados para as tipologias ensaiadas.....	143
Tabela 24: Aferições do perfil de velocidades, com destaque para a aferição na altura de referência.....	147
Tabela 25: Exemplar do procedimento do pós-processamento para a obtenção do adimensional U/Uref.....	155
Tabela 26: Gráficos de contorno ilustrando a distribuição de Cps nas faces com aberturas (barlavento e sotavento) nas diferentes tipologias (G1A, G1B, G2A, G2B, G2C) para cada ângulo de incidência de vento (0° a 90° e 180°).	162
Tabela 27: Distribuição de Cps ao longo de dois perímetros (superior – linha sólida e inferior –linha tracejada) nas diferentes tipologias (G1A, G1B, G2A, G2B e G2C) para cada ângulo de incidência de vento (0° a 90° e 180°).	163
Tabela 28: Tabela-resumo do comportamento de distribuição de pressão nas faces com aberturas (barlavento e sotavento) para as diferentes tipologias (G1A, G1B, G2A, G2B e G2C) para os demais ângulos de incidência do vento (15° a 90° e 180°).....	168
Tabela 29: Percentual de impacto nos diferenciais médios de pressão ($\Delta C_{pm} = C_{pm} \text{ barlavento} - C_{pm} \text{ sotavento}$) decorrente da adoção dos dispositivos de sombreamento em relação aos modelos de referência (G1A e G1B).	171
Tabela 30: Gráficos de contorno da diferença entre o diferencial de pressão local da tipologia com sombreamento em relação ao modelo genérico selado ($Dif = \Delta C_p \text{ local com sombreamento} - \Delta C_p \text{ local referência}$).....	174
Tabela 31: Valores de Ujan/Uref para as diferentes tipologias avaliadas.	190
Tabela 32: Impacto percentual (%) na Ujan/Uref das tipologias de dispositivos de sombreamento em relação à G1B.	190
Tabela 33: Valores do diferencial de pressão médio ($\Delta C_{p\text{méd}} = C_{p\text{méd}} \text{ barlavento} - C_{p\text{méd}} \text{ sotavento}$) calculado para as tipologias avaliadas em modelo genérico selado.	194
Tabela 34: Valores do diferencial de pressão médio ($\Delta C_{p\text{méd}} = C_{p\text{méd}} \text{ barlavento} - C_{p\text{méd}} \text{ sotavento}$) calculado para as tipologias avaliadas em modelo genérico com aberturas.	195
Tabela 35: Valores do diferencial de pressão médio ΔC_{pFJ} calculado para as tipologias avaliadas em modelo genérico selado.....	196
Tabela 36: Valores do diferencial de pressão médio ΔC_{pAA} calculado para as tipologias avaliadas em modelo genérico com aberturas.....	197
Tabela 37: Processo de investigação acerca do ajuste das curvas ($C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e Ujan/Uref) com $C_d=0,6$	198
Tabela 38: Conclusões do processo de investigação acerca do ajuste de curvas ($C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e Ujan/Uref) com $C_d=0,6$	199
Tabela 39: Processo de investigação acerca do ajuste das curvas ($C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e Ujan/Uref) com valores de C_d sugeridos.	201
Tabela 40: Conclusões do processo de investigação acerca do ajuste de curvas ($C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e Ujan/Uref) com valores de C_d sugeridos.....	202
Tabela 41: Valores das velocidades médias na altura de referência (Uref em m/s) para as tipologias avaliadas.	206
Tabela 42: Valores absolutos de Φ cada cenário analisado.	207
Tabela 43: Síntese das conclusões, recomendações projetuais e a indicação das tipologias com as maiores e menores taxas de renovação de ar para cada incidência de vento (-90°a 90°).....	225
Tabela 44: Parâmetros b,p, $F_{r,H}$	249
Tabela 45: Cálculo da velocidade média (m/s) da água nos ensaios realizados na mesa d'água do IAU-USP.	251

Tabela 46: Máscaras de sombra das tipologias de dispositivos de sombreamento ensaiadas nos túneis de vento do IPT e LNEC.....	253
Tabela 47: Descrição das tipologias ensaiadas no túnel de vento do IPT.....	259
Tabela 48: Descrição das tipologias ensaiadas no túnel de vento do LNEC.	260
Tabela 49: Coeficientes de pressão e diferenças de pressão médios calculados para as faces barlavento e sotavento para todos cenários ensaiados no túnel de vento do IPT.	263
Tabela 50: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento dos modelos de referência (G1A, modelo genérico selado e, G1B, modelo genérico com aberturas) para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.....	267
Tabela 51: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G2: Características (G2A; G2B; G2C e G2D) ensaiadas em modelo genérico selado para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.....	268
Tabela 52: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G2: Características (G2A; G2B; G2C e G2D) ensaiadas em modelo genérico com aberturas para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.....	269
Tabela 53: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Assimétricas (G3A e G3B) ensaiadas em modelo genérico selado para os intervalos de ângulos de incidência de 0° a 90° e de 0° a -90°.....	270
Tabela 54: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Assimétricas (G3A e G3B) ensaiadas em modelo genérico com aberturas para os intervalos de ângulos de incidência de 0° a 90° e de 0° a -90°.....	271
Tabela 55: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Simétricas (G3C, G3D e G3E) ensaiadas em modelo genérico selado para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.....	272
Tabela 56: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Simétricas (G3C, G3D e G3E) ensaiadas em modelo genérico com aberturas para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.....	273
Tabela 57: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Complexas (G3F e G3G) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.....	274
Tabela 58: Valores do adimensional U_{jan}/U_{ref} e das velocidades médias aferidas na altura de referência (U_{ref}) e no centroide da abertura a sotavento (U_{jan}) em m/s para todas as tipologias ensaiadas em modelo genérico com aberturas no túnel de vento do LNEC.....	275
Tabela 59: Valores dos diferenciais de pressão (ΔC_p), coeficientes de descarga (C_d), e velocidade média na altura de referência (U_{ref} em m/s) utilizados para a determinação da vazão (m^3/s) na tipologia de referência (G1A).....	277
Tabela 60: Valores dos coeficientes de descarga (C_d) utilizados para a determinação das vazões (m^3/s) nas tipologias e cenários avaliados.	277
Tabela 61: Valores e indicação da forma de obtenção dos diferenciais de pressão (ΔC_p) utilizados para a determinação das vazões (m^3/s) nas tipologias e cenários avaliados.....	278
Tabela 62: Valores das vazões (m^3/s) nas tipologias e cenários avaliados.	279
Tabela 63: Parâmetros utilizados para o cálculo das velocidades médias de referência (U_{ref}) por meio das equações de BRE e da NBR 6123.	281
Tabela 64: Taxas de renovação de ar considerando uma velocidade média de referência (U_{ref}) de 1,3 m/s para diversos cenários avaliados.....	281
Tabela 65: Taxas de renovação de ar considerando uma velocidade média de referência (U_{ref}) de 2,5 m/s para diversos cenários avaliados.....	282

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	53
Equação 2.....	53
Equação 3.....	54
Equação 4.....	61
Equação 5.....	61
Equação 6.....	61
Equação 7.....	62
Equação 8.....	63
Equação 9.....	64
Equação 10.....	66
Equação 11.....	68
Equação 12.....	68
Equação 13.....	68
Equação 14.....	69
Equação 15.....	74
Equação 16.....	74
Equação 17.....	74
Equação 18.....	74
Equação 19.....	75
Equação 20.....	136
Equação 21.....	137
Equação 22.....	142
Equação 23.....	142
Equação 24.....	155
Equação 25.....	176
Equação 26.....	176
Equação 27.....	177
Equação 28.....	205
Equação 29.....	218
Equação 30.....	218

LISTA DE SIGLAS

3D	tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIVC	<i>Air Infiltration Ventilation Centre</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BES	<i>Building Energy Simulation</i>
BRE	<i>Building Research Establishment</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
COVID -19	<i>Corona Virus Disease</i>
EERE	<i>U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy</i>
EPWs	<i>EnergyPlus Weather Data</i>
FAB	Força Aérea Brasileira
IAU-USP	Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo
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
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MERS	<i>Middle East Respiratory Syndrome</i>
NBR	Norma Brasileira
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
REN	Taxa de renovação horária de ar no modelo/ambiente
SARS	<i>Severe Acute Respiratory Syndrome</i>

TP	Tomada de pressão
TPU	<i>Tokyo Polytechnic University</i>
USP	Universidade de São Paulo
WPC	<i>Wind pressure coefficient</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\overline{C_p}$	coeficiente de pressão médio	adimensional
\bar{u}	velocidade média em determinados pontos do escoamento	m/s
α_{met}	coeficiente de rugosidade do terreno – estação meteorológica	adimensional
δ_{met}	espessura da camada limite – estação meteorológica	m
A	área da abertura	m ²
A_0	referente à área da abertura de saída	m ²
A_1	área da seção transversal do ambiente	m ²
A_b	área das aberturas a barlavento	m ²
A_{eq}	área equivalente de aberturas	m ²
A_s	área das aberturas a sotavento	m ²
C_d	coeficiente de descarga	adimensional
C_p	coeficiente de pressão devido ao vento	adimensional
$C_{p_{TPi}}$	coeficiente de pressão na tomada TP, em que i é o número da tomada	adimensional
$C_{p_{local}}$	coeficiente de pressão local devido ao vento	adimensional
C_{pm}	coeficiente médio de pressão devido ao vento	adimensional
C_v	coeficiente de velocidade	adimensional
d	deslocamento do plano de referência	m
Fr	fator de rajada	adimensional
g	aceleração da gravidade	m/s ²
G	vazão de ar no modelo/ ambiente	m ³ /s
H	altura da edificação	m
H_{met}	altura de aferição na estação meteorológica	m
H_{ref}	altura de referência	m
L	dimensão geométrica	m

μ	viscosidade dinâmica	kg/ms
p	pressão estática em pontos do escoamento	Pa
p	pressão instantânea	Pa
p, b	coeficientes pré-determinados (NBR 6123) para as várias classes de edificações	adimensional
P_0	pressão estática de referência, do fluxo de ar não perturbado	Pa
p_∞	pressão atmosférica	Pa
P_d	pressão dinâmica do fluxo não perturbado	Pa
P_{TPi}	pressão estática aferida na TP, em que i é o número da tomada	Pa
q_{ref}	pressão dinâmica de referência	Pa
Re	número de <i>Reynolds</i>	adimensional
S_1	fator topográfico	adimensional
S_2	fator que considera rugosidade, altura do terreno e dimensões das edificações	adimensional
S_3	fator estatístico	adimensional
T	tempo de aquisição de dados	s
T_e	temperatura externa	°C
T_i	temperatura interna	°C
u	velocidade do escoamento	m/s
$U(z)$	velocidade média a uma determinada altura z	m/s
U_1	velocidade média do ar na altura de referência igual a 1,3 m/s	m/s
U_2	velocidade média do ar na altura de referência igual a 2,5 m/s	m/s
U_∞	velocidade média do fluxo livre de obstruções	m/s
U_H	velocidade média em H	m/s
U_{jan}	velocidade média do escoamento aferida no centroide da janela sotavento	m/s
U_{jan}/U_{ref}	velocidade média relativa	adimensional
U_{met}	velocidade média aferida na estação meteorológica	m/s
U_{ref}	velocidade média do escoamento aferida na altura de referência	m/s
$u\tau$ ou u^*	velocidade de atrito	m/s

V	velocidade média do vento à determinada altura	m/s
V	volume do modelo/ambiente	m ³
V₀	velocidade média básica do vento	m/s
V_k	velocidade média característica do vento	m/s
V_m	velocidade média do vento na estação registrada a 10 m	m/s
V_{ref}	velocidade correspondente à altura de referência	m/s
z	determinada altura	m
z₀	escala de comprimento da rugosidade	m
z_{ref}	altura correspondente a velocidade U _{ref}	m
α	expoente da lei de potência variável em razão do tipo de terreno	adimensional
δ	espessura da camada limite	m
ΔC_p	diferencial de pressão	adimensional
ΔC_{pAA}	diferencial de pressão efetivo obtido a partir dos coeficientes médios de pressão das áreas de influência	adimensional
ΔC_{pAF}	diferencial de pressão efetivo obtido a partir dos coeficientes médios de pressão das fachadas com aberturas	adimensional
ΔC_{pFF}	diferencial de pressão efetivo obtido a partir dos coeficientes médios de pressão das fachadas seladas	adimensional
ΔC_{pFJ}	diferencial de pressão efetivo obtido a partir dos coeficientes médios de pressão das áreas das aberturas seladas	adimensional
Δh	perda de carga	m (coluna de fluido)
ΔP	diferencial de pressão estática entre os dois lados da abertura	Pa
ΔP_h	perda de pressão	Pa
ζ	coeficiente de perda de carga	adimensional
κ	coeficiente de caracterização da superfície do terreno	adimensional
κ	constante de Von Kármán	adimensional
ρ	massa volúmica do fluido	kg/m ³
Φ	impacto na ventilação natural decorrente do uso dos dispositivos de sombreamento avaliados	adimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	43
1.1	OBJETIVO GERAL	45
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	46
1.3	ESTRUTURA DA TESE	46
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	51
2.1	AERODINÂMICA DA ARQUITETURA	51
2.1.1	Aerodinâmica da Arquitetura: conceitos gerais	52
2.1.1.1	Equação de <i>Bernoulli</i>	53
2.1.1.2	Número de <i>Reynolds</i>	54
2.1.1.3	Camada limite, separação, esteira e vórtices	54
2.2	VENTILAÇÃO NATURAL NAS EDIFICAÇÕES	56
2.2.1	Funcionalidades, mecanismos (eólico, térmico e combinado) e sistemas de ventilação natural (cruzada e unilateral)	57
2.2.2	Camada Limite Atmosférica (CLA)	60
2.2.3	Coeficientes aerodinâmicos e estimativa da ventilação natural	65
2.2.3.1	Coeficientes de pressão devido ao vento (C_p)	65
2.2.3.2	Perda de carga no escoamento e Coeficiente de descarga (C_d)	68
2.2.3.3	Taxa de vazão e taxa de renovação de ar	73
2.2.4	Métodos de apoio à estimativa e/ou avaliação da ventilação natural no projeto arquitetônico	75
2.2.4.1	Modelos reduzidos: critérios de semelhança	76
2.2.4.2	Modelos experimentais em escala reduzida – Mesa d’água	78
2.2.4.3	Modelos experimentais em escala reduzida – Túnel de vento	79
2.3	USO CONJUGADO DAS ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL E SOMBREAMENTO DAS EDIFICAÇÕES	80
2.4	SÍNTESE DO ITEM	94

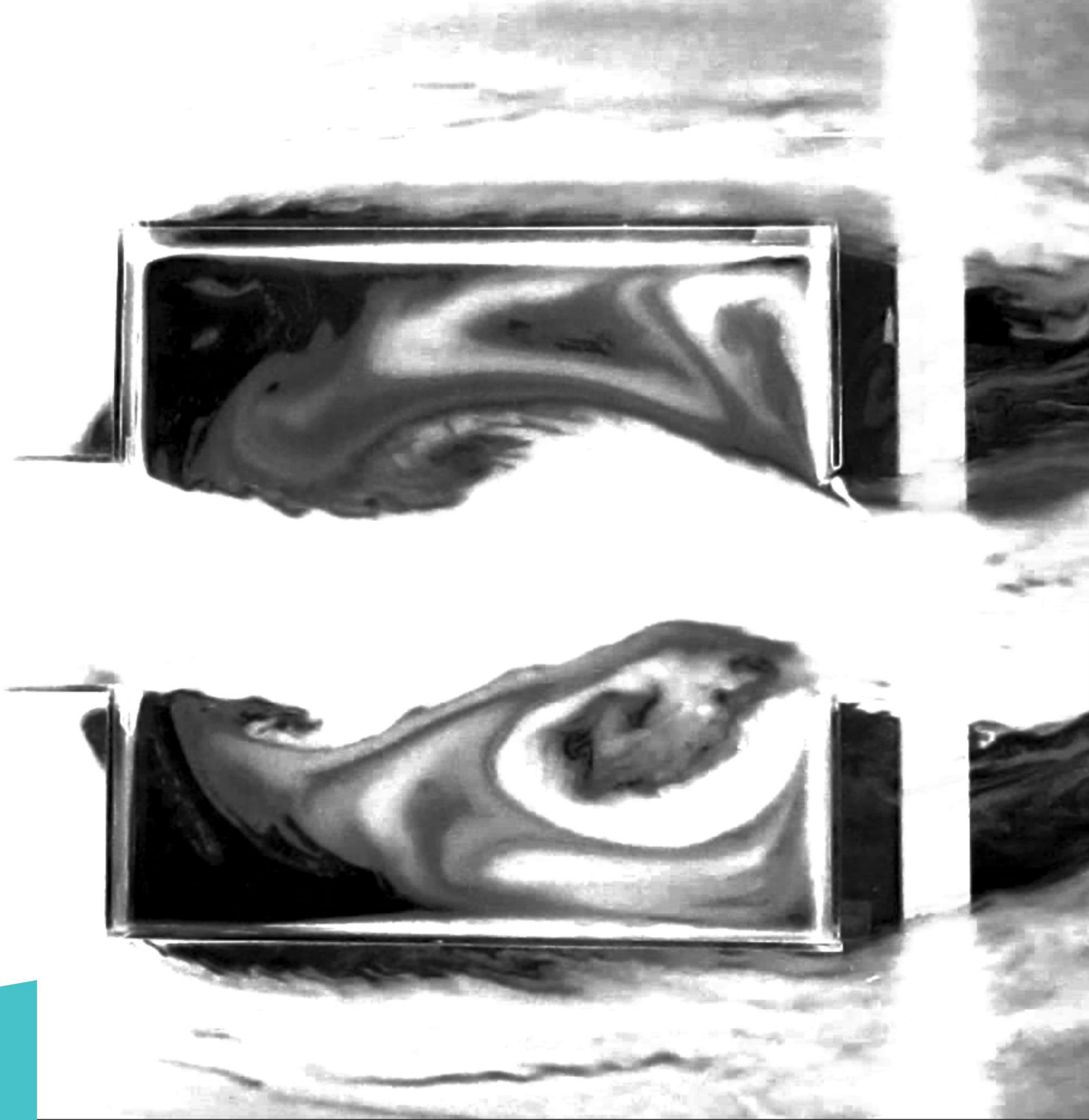
3	DEFINIÇÃO DOS MODELOS	97
3.1	CLASSE I: GEOMETRIA	100
3.1.1	Dimensões do modelo	100
3.1.1.1	Modelos: exemplares da literatura científica	100
3.1.1.2	Modelos: pesquisas prévias	105
3.1.2	Altura em que o modelo será ensaiado	107
3.1.3	Quantidade e posicionamento das aberturas	107
3.1.4	Relação entre as aberturas de entrada e saída de ar	108
3.1.5	Tamanho das aberturas	108
3.1.6	Peitoril das aberturas	109
3.2	CLASSE II: DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO	109
3.2.1	Tipologias	109
3.2.2	Posicionamento e dimensões dos dispositivos de sombreamento em relação à abertura	110
3.3	CLASSE III: CONDIÇÕES DE CONTORNO	110
3.3.1	Rugosidade do terreno	110
3.3.2	Exposição	111
3.3.3	Ângulos de incidência do vento	111
3.4	ANÁLISES QUALITATIVAS: VISUALIZAÇÕES EM MESA D'ÁGUA E ELABORAÇÃO DE MÁSCARAS DE SOMBRA	111
3.4.1	Visualizações do fluxo de ar a partir de ensaios em mesa d'água	111
3.4.1.1	Definições e avaliações experimentais	112
3.4.1.2	Análise de resultados	115
3.4.2	Elaboração de máscaras de sombra	123
3.5	DEFINIÇÕES PARA OS ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO DO IPT	124
3.6	DEFINIÇÕES PARA OS ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO DO LNEC	125
3.7	SÍNTESE DO ITEM	128

4	ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO.....	131
4.1	TÚNEL DE VENTO DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA DO IPT	132
4.2	CONDIÇÕES DE CONTORNO E MATRIZ DE ENSAIOS	132
4.2.1	Escala do modelo reduzido	132
4.2.2	Matriz de ensaios: tipologias e cenários	133
4.2.3	Camada limite atmosférica	135
4.3	CONFECÇÃO E PREPARAÇÃO DO MODELO FÍSICO REDUZIDO	137
4.3.1	Modelo físico reduzido: confecção	138
4.3.2	Modelo físico reduzido: preparação para os ensaios	140
4.4	ENSAIOS QUANTITATIVOS: TÚNEL DE VENTO DO IPT	141
4.5	PÓS – PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	142
4.6	TÚNEL DE VENTO DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA DO LNEC.....	143
4.7	CONDIÇÕES DE CONTORNO E MATRIZ DE ENSAIOS	144
4.7.1	Escala do modelo reduzido	144
4.7.2	Matriz de ensaios: tipologias e cenários	144
4.7.3	Camada limite atmosférica	144
4.8	CONFECÇÃO E PREPARAÇÃO DO MODELO FÍSICO REDUZIDO	148
4.9	ENSAIOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS	149
4.9.1	Ensaio quantitativo: aferição da pressão na envoltória externa.....	150
4.9.2	Ensaio quantitativo: velocidade média na abertura a sotavento.....	150
4.9.3	Ensaio qualitativo: comportamento e distribuição do fluxo de ar interno.....	152
4.10	CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	152
4.10.1	Calibração: anemômetro de fio quente	153
4.10.2	Calibração: anemômetro de hélice.....	153
4.11	PÓS-PROCESSAMENTO DE DADOS	154

4.11.1 Pós- processamento: dados de pressão (em Cps).....	155
4.11.2 Pós- processamento: dados de velocidade (em Ujan/Uref)	155
4.12 SÍNTESE DO ITEM	156
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	159
5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS: ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO DO IPT.....	160
5.1.1 Etapa 01: Análise do impacto na distribuição de pressão	160
5.1.1.1 Ângulo de incidência = 0°.....	164
5.1.1.2 Demais ângulos de incidência do vento.....	166
5.1.2 Etapa 02: Análise do impacto no diferencial de pressão (ΔC_{pm}).....	170
5.1.2.1 Impacto no diferencial de pressão médio (ΔC_{pm}): ângulos de incidência de vento.....	171
5.1.2.2 Impacto no diferencial de pressão: incidência a 90°	173
5.1.2.3 Impacto no diferencial de pressão local	173
5.1.3 Conclusões e diretrizes para o delineamento da matriz de ensaios do LNEC	174
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS: TÚNEL DE VENTO DO LNEC.....	175
5.2.1 Impacto dos dispositivos de sombreamento na pressão (C_p) e na velocidade relativa (Ujan/Uref)	177
5.2.1.1 Grupos característica e geometrias: Impacto na pressão (C_p)	178
5.2.1.2 Ângulo de incidência de 0°.....	179
5.2.1.3 Ângulos 15° e 30°	181
5.2.1.4 Ângulo 45°.....	184
5.2.1.5 Ângulos 60° e 75°	185
5.2.1.6 Ângulo 90°.....	187
5.2.1.7 Faces a sotavento	188
5.2.2 Impacto na Ujan/Uref.....	189
5.2.2.1 Grupo de referência: impacto na velocidade (Ujan/Uref).....	191
5.2.2.2 Ângulos de incidência 0°, 15° e 30°	191

5.2.2.3	Ângulo de 45°	192
5.2.2.4	Ângulos de 60° e 75°	192
5.2.2.5	Ângulo de 90°	192
5.2.3	Impacto dos dispositivos de sombreamento no diferencial de pressão (ΔC_p) e na velocidade (U_{jan}/U_{ref})	194
5.2.4	Investigações acerca dos valores para o ajuste das curvas de $C_d/\Delta C_p$ e U_{jan}/U_{ref}	197
5.2.4.1	$C_d = 0,6$	197
5.2.4.2	C_d : valores sugeridos	200
5.3	SÍNTESE DO ITEM	203
6	DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO: IMPACTO NA VENTILAÇÃO NATURAL	205
6.1.	IMPACTO NO DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL (Φ)	206
6.1.1	Impacto na ventilação natural (Φ): referência	208
6.1.2	Impacto na ventilação natural (Φ): variação na profundidade dos elementos de sombreamento	208
6.1.3	Impacto na ventilação natural (Φ): afastamento em relação à abertura de entrada	210
6.1.4	Impacto na ventilação natural (Φ): geometrias assimétricas	211
6.1.5	Impacto na ventilação natural (Φ): geometrias simétricas	212
6.1.6	Impactos na ventilação natural (Φ): geometrias complexas	213
6.2	APLICAÇÃO DO Φ E RECOMENDAÇÕES PROJETUAIS	214
6.2.1	Descrição e definição do problema projetual	215
6.2.2	Verificações do impacto de dispositivos de sombreamento na ventilação natural	218
6.2.3	Recomendações projetuais	222
6.3	SÍNTESE DO ITEM	227
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	229
7.1	IMPACTO NA PRESSÃO (C_p s, coeficientes de pressão devido ao vento e, ΔC_p , diferencial de pressão efetivo)	229
7.2	IMPACTO NA VELOCIDADE MÉDIA RELATIVA (U_{jan}/U_{ref})	231

7.3	IMPACTO NA ÁREA DE DETERMINAÇÃO DO DIFERENCIAL MÉDIO DE PRESSÃO EFETIVO (ΔC_p) E DO VALOR DOS COEFICIENTES DE DESCARGA (C_d)	232
7.4	IMPACTO NO DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL (Φ)	233
7.5	TRABALHOS FUTUROS	234
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	237
	ANEXOS	249
	APÊNDICES	251



1

INTRODUÇÃO

O edifício não é apenas um abrigo, ou uma barreira contra efeitos indesejáveis (chuva, vento, frio), mas o revestimento do edifício deve ser considerado como um filtro seletivo: deve excluir os efeitos indesejáveis, mas admitir os desejáveis e úteis como a luz do dia, a radiação solar no inverno ou a ventilação natural.

(SZOKOLAY, 2019, p. xii)

Um desafio urgente aos profissionais projetistas, diante dos atuais problemas ambientais, é a incorporação de uma cultura arquitetônica que considere as condicionantes ambientais (MONTEIRO; BITTENCOURT; YANNAS, 2015). Segundo Szokolay (2019), a tarefa do projetista passa por quatro etapas sequenciais, sendo elas: analisar as condições locais (clima, entorno, terreno); estabelecer em que limites são ou não desejáveis; controlá-las por meios passivos e, utilizar-se de estratégias dependentes de energia apenas para suprir necessidades de controle residual. Deste modo, a participação ativa do projetista na definição de estratégias passivas de condicionamento durante o processo de projeto, principalmente nas etapas iniciais, pode evitar ou minimizar significativamente o uso de equipamentos mecânicos para o condicionamento artificial, o consumo energético, além de incrementar os níveis de conforto dos usuários nestas edificações (LECHNER, 2009; OMRANI et al., 2017; CHEN; TONG; MALKAWI, 2017; SAKIYAMA et al., 2020).

Em climas quentes e úmidos – cenário característico de grande parte do território brasileiro – 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). Essa efetividade é confirmada pela NBR 15 220 – Desempenho Térmico em edificações² (ABNT, 2005), a qual indica a ventilação natural³ como estratégia de condicionamento passivo 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 de 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 interior dos ambientes, auxílio na manutenção dos níveis de conforto térmico dos usuários e o resfriamento das estruturas da edificação; além de possuir um grande alcance social, por se tratar de uma estratégia gratuita (GIVONI, 1976; LIDDAMENT, 1996;

² NBR 15 220 – Desempenho Térmico em Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005).

³ Ventilação natural cruzada, seletiva ou permanente dependendo das necessidades da zona bioclimática.

TOLEDO, 1999; FROTA; SCHIFFER, 2001; ALLARD, 2002; SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008; LECHNER, 2009).

Diante da situação atual de pandemia, ocasionada pela COVID-19, soma-se, às potencialidades e funcionalidades já reconhecidas da ventilação natural, a sua importância na redução da transmissão aérea de agentes patogênicos. De acordo com Melikov (2020), nos últimos 20 anos, diante de SARS, MERS e COVID-19, fica evidente que pandemias ocasionadas por vírus emergentes não fazem mais parte do imaginário, além disso pontua a necessidade urgente de mudanças de paradigmas na prática da ventilação, já que a sua utilização é recomendada dentre as orientações de controle da COVID-19.

Quanto aos elementos de sombreamento externos, estes, quando bem projetados⁴, 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 das edificações (GIVONI, 1976; FROTA, 2004; GONÇALVES; VIANNA; MOURA, 2011; LECHNER, 2009; DAVID et al., 2011; BELLIA; DE FALCO; MINICHELLO, 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 impacto dos elementos de sombreamento externos na ventilação natural. É sabido que a ventilação natural em edificações consiste na trajetória do fluxo de ar exterior para o interior dos ambientes decorrente de um diferencial de pressão. Esse 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 locais (C_p) que são variáveis de ponto a ponto nas superfícies. Segundo Toledo (1999), denomina-se coeficiente de pressão o quociente adimensional da pressão dinâmica em um dado ponto da superfície pela pressão dinâmica do fluxo não perturbado. A obtenção destes dados pode ocorrer a partir de fontes primárias (experimentos em escala real, ensaios de modelos reduzidos em túneis de vento, 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, além de serem sensíveis a vários parâmetros – orografia e 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 a avaliação térmica e energética de edificações que fazem uso da ventilação natural, os chamados *Building Energy Simulation* (BES) (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009). No entanto, os *software* BES, como por exemplo o *EnergyPlus* (EERE, 2021a), desconsidera o efeito da presença de elementos de sombreamento no seu algoritmo de cálculo do módulo de ventilação natural⁵. 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, o que pode acarretar erros nos cálculos de vazões de ar nos ambientes.

A distribuição do fluxo de ar no ambiente interno é influenciada pelas pressões no entorno das edificações e nas imediações de suas respectivas aberturas (ALLARD, 2002; ETHERIDGE, 2012). Logo, a determinação do impacto dos dispositivos de sombreamento externos é um dado que se mostra, diante dos diversos pontos anteriormente apresentados, relevante no processo de projeto de edificações que fazem o uso da ventilação natural.

⁴ O dimensionamento de protetores solares externos pode ser realizado através da aplicação de cartas solares (BITTENCOURT, 2004).

⁵ “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, 2021b, p. 1100).

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 (CHAND; KRISHAK, 1971; STATHOPOULOS; ZHU, 1988; BITTENCOURT; BIANA; CRUZ, 1995; ROFAIL; KWOI, 1999; PRIANTO; DEPECKER, 2002; HIEN; ISTIADJI, 2003; HILDEBRAND, 2012; KIRIMTAT et al., 2016; VETTORAZZI et al., 2016; ACCIOLY; OLIVEIRA; BITTENCOURT, 2016; BACICHETTI; CARDOSO; SARDEIRO, 2016; CASTAÑO, 2017; DE QUADROS; ORDENES, 2017; LIN; XIAO; ZHAN, 2017; ELSHAFEI et al., 2017; MACIEL et al., 2017; MATHAN KANNAN; NAGARAJAN; DHANALAKSHMI, 2018; SUN et al., 2018; BAYRAKTAR; OK, 2019), sacadas (CHAND, BHARGAVA; KRISHAK, 1998; KOTANI; YAMANAKA, 2007; AI et al., 2011; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013; OMRANI et al., 2017; LOCHE et al., 2020) e grelhas de ventilação (CHANDRASHEKARAN, 2010; TABLADA et al., 2009; LEE et al., 2015; SACHT et al., 2016; KOSUTOVA et al., 2019; JIANG et al., 2019; ZHENG; TAO; LI, 2020; ZHENG; TAO; LI, 2019, 2020b). 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 natural, a maioria dessas investigações se refere ao impacto na velocidade ou na distribuição do fluxo de ar no ambiente.

Destaque se dá aos trabalhos de Stathopoulos, Zhu (1988); Rofail, Kwoi (1999); Chand, Bhargava e Krishak (1998); Kotani e Yamanaka (2007); Loche et al. (2020) e de Castaño (2017) que mensuraram os efeitos no comportamento da distribuição de pressão (avaliadas por meio dos C_p) a partir de ensaios em túnel de vento. Os cinco primeiros observaram o impacto de sacadas ou de elementos de sombreamento na distribuição de pressão de edificações multi pavimentos, variando suas tipologias, dimensões, posicionamentos ou ângulos de incidência de vento. Já, Castaño (2017), concentrou-se na determinação do impacto do uso de diferentes dispositivos de sombreamento externos e de muro limítrofe nas distribuições de pressão (C_p), nas temperaturas internas e nos níveis de 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 impacto significativo, mas ainda pouco explorado, no desempenho da ventilação natural em edificações. Embora a distribuição de pressão na envoltória 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 os dispositivos de sombreamento externos. Desta forma, a pesquisa parte da hipótese que os dispositivos de sombreamento externos impactam na distribuição de pressão nas envoltórias das edificações e, assim, valores de pressão correspondentes a geometrias lisas devem ser utilizados com criticidade, nestas situações, em avaliações e/ ou estimativas acerca do desempenho de ventilação natural.

1.1 OBJETIVO GERAL

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

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Gerar um banco de dados de pressão (C_{ps}) oriundos de ensaios em túneis de vento de um modelo genérico com variadas tipologias de dispositivos de sombreamento externos.
- Investigar, a partir de dados aferidos de pressão (C_{ps}) e de velocidade relativa (U_{jan}/U_{ref}), ajustes nas áreas para a determinação do diferencial de pressão efetivo (ΔC_p) e nos valores de coeficiente de descarga (C_d) para representar o impacto dos dispositivos de sombreamento externos em avaliações e/ou estimativas do desempenho da ventilação natural.
- Determinar, a partir de dados quantitativos, o impacto (nomeado de Φ) de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento externos no desempenho da ventilação natural em um modelo genérico.
- Desenvolver recomendações, a partir de dados quantitativos, do impacto da adoção de dispositivos de sombreamento em edificações que façam uso da ventilação natural ampliando deste modo a bibliografia sobre esta temática.

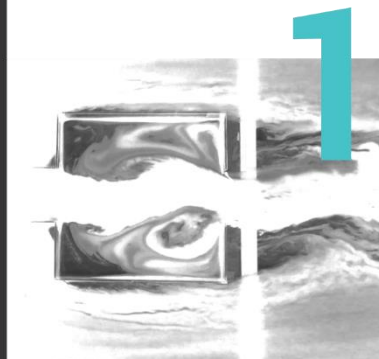
1.3 ESTRUTURA DA TESE

A presente Tese de Doutorado está estruturada em **sete seções**, são elas: 1. Introdução; 2. Revisão bibliográfica; 3. Definição dos modelos; 4. Ensaios em túnel de vento; 5. Análise dos resultados; 6. Dispositivos de sombreamento: impacto na ventilação natural e; 7. Considerações finais, conforme ilustrado na Figura 1.

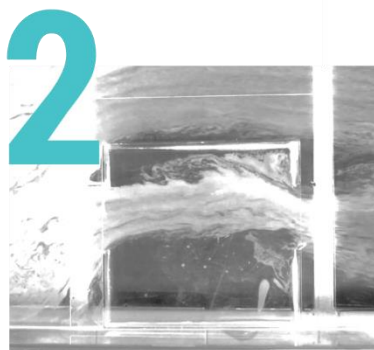
A seção inicial, **Introdução**, apresenta a contextualização e a justificativa que embasam o desenvolvimento deste trabalho, além da identificação da lacuna científica, da hipótese e do delineamento dos objetivos (geral e específicos) para contribuir no processo de suas resoluções.

Na segunda seção, **Revisão bibliográfica**, são abordadas as principais definições, conceitos gerais e contextualizações acerca da aerodinâmica das edificações e do uso da ventilação natural como estratégia passiva de condicionamento térmico e renovação do ar interior. Ademais, a combinação da ventilação natural e do sombreamento das aberturas é indicado como uma vertente possível e coerente para auxiliar na redução do consumo energético e na melhoria dos níveis de conforto aos usuários de edificações localizadas em climas quentes e úmidos, característico de grande parte do território brasileiro. No entanto, atenta-se a escassa quantidade de estudos na literatura científica que aborda o impacto na ventilação natural ocasionado pela presença de detalhamentos nas fachadas, tais como os dispositivos de sombreamento externos, reforçando assim a importância de uma maior investigação acerca deste ponto.

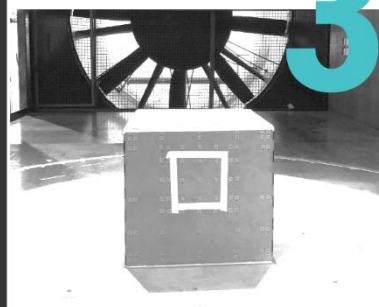
Nesta Tese de Doutorado, o impacto de diferentes dispositivos de sombreamento externos no desempenho da ventilação natural é avaliado, prioritariamente, a partir das distribuições de pressão nas envoltórias de um modelo genérico. Para obtenção destes dados, este modelo foi ensaiado nos túneis de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), em São Paulo, Brasil e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa, Portugal. As avaliações experimentais ocorreram em diferentes momentos do desenvolvimento da pesquisa. Nos ensaios do LNEC além das distribuições de pressão (observadas por meio dos C_{ps} – coeficientes de pressão), também foram aferidas as velocidades do fluxo de ar interno no centroide da janela a sotavento para os diversos cenários avaliados de modo a estimar fluxos médios de renovação do ar interior.



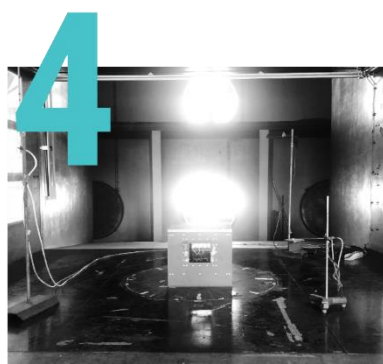
1 INTRODUÇÃO



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



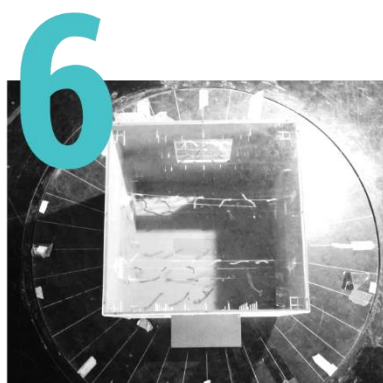
3 DEFINIÇÃO DOS MODELOS



4 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO



5 ANÁLISE DOS RESULTADOS



6 DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO: IMPACTO NA VENTILAÇÃO NATURAL

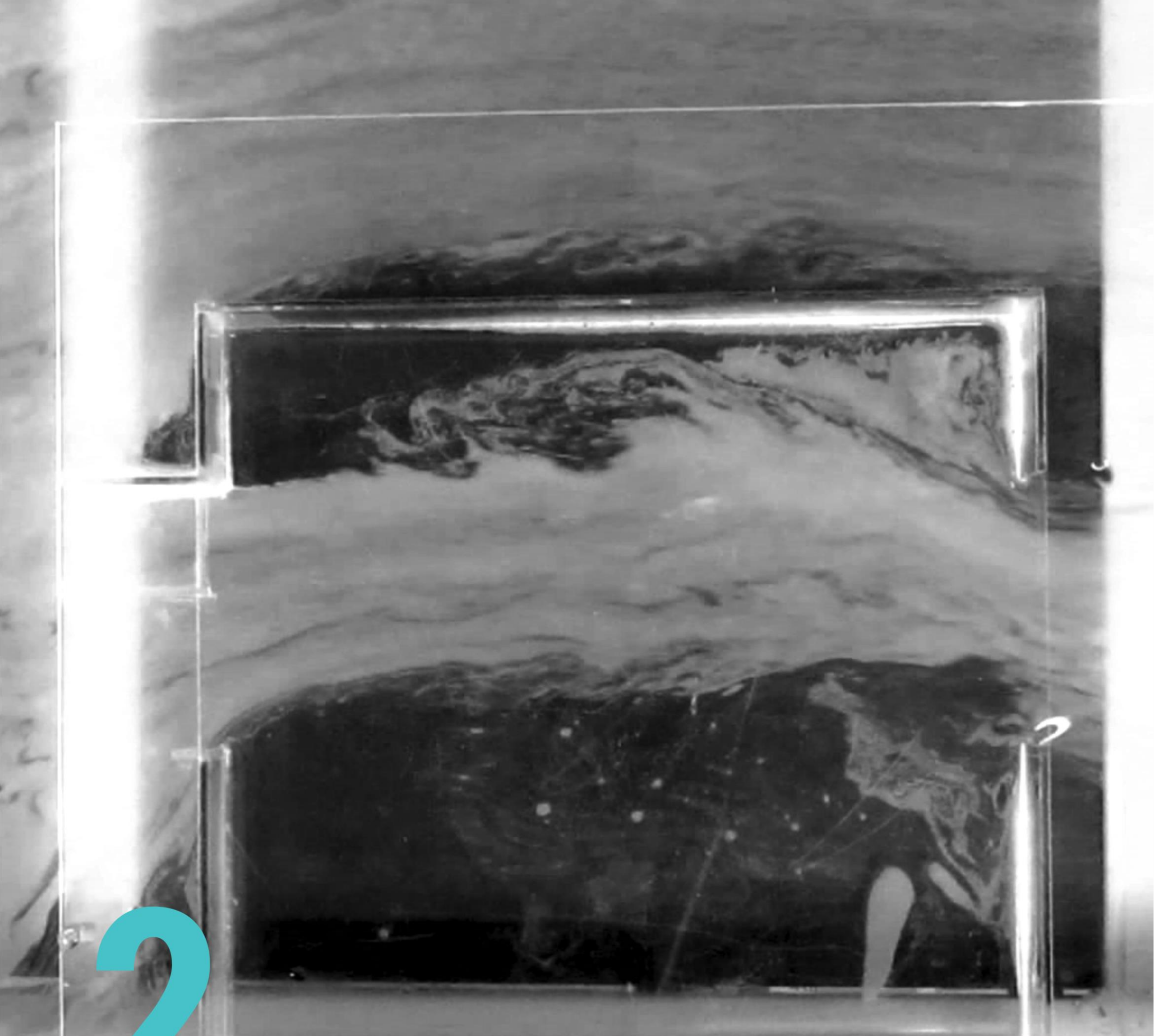


7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Figura 1: Estrutura da Tese.
Fonte: A Autora (2020).

Assim, nas seções que fazem referência às etapas metodológicas – **Definição dos modelos e Ensaios em túnel de vento**, são apresentados detalhadamente os procedimentos de desenvolvimento dos modelos, da definição das condições de contorno e da execução dos ensaios. As seções **Análise dos resultados** e **Dispositivos de sombreamento: impacto na ventilação natural** reúnem a discussão dos resultados dos ensaios realizados. Ao fim deste processo, chega-se no estabelecimento de um fator (nomeado de Φ) que quantifica o impacto na ventilação natural da inclusão dos dispositivos de sombreamento externos (nos diversos cenários avaliados) em relação às estimativas obtidas por meio de dados usuais. Ao aplicar este fator em um exemplo hipotético, delineiam-se recomendações projetuais a fim de auxiliar à tomada de decisões durante o projeto de edificações que idealizem o uso conjugado das estratégias de ventilação natural e de sombreamento das aberturas.

A última seção, **Considerações finais**, aborda as conclusões acerca do trabalho desenvolvido, as limitações encontradas, além de pontos reconhecidos como latentes e potenciais de serem investigados em trabalhos futuros.



2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalhem no sentido de uma arquitetura livre e espontânea, que seja uma clara expressão de nossa cultura e revele uma sensível apropriação de nosso espaço; trabalhem no sentido de uma arquitetura sombreada, aberta, contínua, vigorosa, acolhedora e envolvente, que ao nos colocar em harmonia com o ambiente tropical, nos incite a nele viver integralmente.

(HOLANDA, 1976, p. 43).

Esta seção apresenta os principais conceitos acerca da aerodinâmica das edificações e da ventilação natural como estratégia passiva de condicionamento térmico. Além disso, descreve trabalhos que analisaram o impacto da adoção de dispositivos de sombreamento na ventilação natural. A partir desta revisão, a lacuna científica para qual o presente trabalho contribui é identificada e contextualizada.

Desta forma, este item de revisão bibliográfica é estruturado em três partes: (1) Aerodinâmica da Arquitetura; (2) Ventilação natural em edificações e; (3) Uso conjugado das estratégias de ventilação natural e sombreamento das aberturas.

2.1 AERODINÂMICA DA ARQUITETURA

O vento, independente da escala atmosférica, é caracterizado como um fluxo de ar decorrente de um diferencial de pressões. Na **escala global**, este diferencial é resultante dos balanços termodinâmicos entre as superfícies e a atmosfera, sendo este processo função da latitude, do eixo de inclinação da Terra, somados à ação dos seus movimentos de rotação e translação. Em **escala regional**, a orografia ou a localização (mais continental ou com maior proximidade às zonas litorâneas) são os fatores mais influentes. No âmbito **local**, ocorre um balanço entre as ações das condições climáticas (escala regional) e as modificações induzidas por aspectos de urbanização, extensões de água, entre outros. Por fim, na **escala do microclima**, o padrão de ventos pode ser modificado pela intervenção humana e, portanto, é contexto de atuação dos arquitetos e urbanistas (ALLARD, 2002; MARQUES DA SILVA, 2004).

A interação entre o vento e as edificações é denominada de Aerodinâmica da Arquitetura e, embora essa terminologia seja recente na História (AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977), a aplicação, ainda que empírica, dos seus conceitos remete às antigas civilizações ou Arquiteturas vernaculares, que consideravam as ações do vento como informação integrante do processo de planejamento das cidades ou edificações. Ainda hoje, a

observação destes exemplares auxilia no entendimento da relação vento e ambiente construído. Lechner (2009) enfatiza a importância dos exemplos e da sua supremacia, em alguns momentos, às definições na explicação de conceitos.

Antes do século XVII, o projeto que considerasse as ações de vento embasava-se em generalidades devido à ausência de instrumentação (termômetros, barômetros, anemômetros, entre outros) que permitissem estudos mais detalhados acerca das condições climáticas disponíveis (AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977). Assim, como as demais áreas do conhecimento, a evolução da Aerodinâmica da Arquitetura esteve vinculada à evolução técnica. Historicamente, segundo Fortuna (2012), a grande área da mecânica dos fluidos se dedicou a estudar o comportamento dos fluidos a partir de experimentos antes mesmo da adoção de ferramentas matemáticas.

A Aerodinâmica da Arquitetura compreende, basicamente, duas vertentes: a estrutural e a ambiental. A primeira, dedica-se ao entendimento das cargas de vento e da atuação destas forças na estabilidade das estruturas e subestruturas (exteriores) das construções. Já, a segunda, remete-se aos estudos de ventilação natural e do seu impacto no conforto dos usuários no ambiente construído (AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977). Independente da área em questão, é importante que haja por parte dos projetistas o entendimento acerca dos fenômenos e dos conceitos que regem a relação vento e edificações.

2.1.1 Aerodinâmica da Arquitetura: conceitos gerais

O escoamento de um fluido pode ser caracterizado por regimes laminares ou turbulentos. No laminar, suas partículas se deslocam de modo ordenado, com trajetórias bem definidas, e em lâminas. No turbulento, em razão de flutuações na velocidade do escoamento, estas partículas se misturam rapidamente enquanto se deslocam.

De acordo com Bittencourt e Cândido (2008), é consenso entre muitos autores a necessidade de aderir algumas simplificações para a simulação do movimento de ar, sendo a suposição de que o seu fluxo é constante e isotérmico, uma delas. Na realidade, nas proximidades da superfície terrestre, o fluxo de vento é turbulento e instável (AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977).

Normalmente, as edificações são caracterizadas por sólidos com arestas vivas^{6 7} que ao interagirem com o escoamento geram três principais regiões: (a) corrente livre; (b) camada limite e; (c) esteira. A primeira remete às regiões afastadas da edificação em que o escoamento não é perturbado pela sua presença. A segunda faz referência à porção do escoamento conformada entre a de corrente livre e a fronteira sólida, sendo caracterizada por velocidades que variam de zero (no contato com a superfície do sólido) até a velocidade de escoamento livre. Por fim, a região de esteira é a área configurada após a separação da camada limite, identificada por baixas velocidades em relação à de fluxo livre, recirculações e vórtices que se prolongam para jusante.

⁶ De acordo com Blessmann (1983), a resistência que a forma do corpo impõe ao escoamento resulta em um desequilíbrio das pressões. Sob esse aspecto os corpos podem ser classificados como: afilados (aerodinâmicos) ou rombudos (arredondados ou angulosos). Grande parte das edificações pertence ao segundo tipo, sendo caracterizadas por maiores gradientes de pressão devido à separação da camada limite e a formação de uma zona de esteira mais larga e turbulenta do que a verificada em corpos aerodinâmicos.

⁷ De acordo com Aynsley (1999), em corpos rombudos, as linhas de corrente, não acompanham o formato da superfície do corpo ao migrarem de barlavento a sotavento.

2.1.1.1 Equação de Bernoulli⁸

De acordo com Aynsley (1999) e Aynsley, Melbourne e Vickery (1977), a Equação de Bernoulli (Equação 1), que relaciona pressão, energia cinética, energia potencial, e a constância da energia total, auxilia o entendimento do comportamento dos fluidos. Para a aplicação da equação ao longo de uma linha de corrente⁹, algumas premissas na caracterização do fluido devem ser adotadas: ser estável, incompressível, sem viscosidade e irrotacional.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho\bar{u}_1^2 + \rho gz_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho\bar{u}_2^2 + \rho gz_2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

p : pressão estática nos pontos 1 e 2 do escoamento (Pa)

\bar{u} : velocidade média nos pontos 1 e 2 do escoamento (m/s)

z : altura dos nos pontos 1 e 2 do escoamento (m)

g : aceleração da gravidade (m/s²)

ρ : massa volúmica do fluido (kg/m³)

Em avaliações de aerodinâmica das edificações, os componentes da aceleração da gravidade e da massa volúmica do fluido¹⁰ podem ser negligenciados¹¹, devido às baixas variações das alturas das edificações e das temperaturas entre os ambientes externos e internos. Portanto, a Equação 1 pode ser reescrita da seguinte forma (Equação 2):

$$\frac{1}{2}\rho\bar{u}^2 + p = \text{constante} \quad \text{Equação 2}$$

Logo, no escoamento de ar, pela aplicação da equação de Bernoulli, as variações de pressões e de velocidades são entendidas como grandezas inversamente proporcionais, ou seja, um aumento da velocidade implica uma redução de pressão, sendo a situação inversa também verdadeira. O ponto de pressão máxima e velocidade nula é denominado de ponto de estagnação.

Restringe-se a validade da equação de Bernoulli à região de fluxo livre. Nas demais (camada limite e esteira), devido às forças rotacionais ou aos efeitos de viscosidade, sua validade não pode ser mantida (AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977).

⁸ Equação apresentada por Daniel Bernoulli em 1738.

⁹ Segundo Fortuna (2012), as linhas de corrente (do inglês, *streamlines*) tangenciam os vetores de velocidade das partículas do fluido em movimento.

¹⁰ Aynsley; Melbourne e Vickery (1977) indicam que para a resolução de problemas de aerodinâmica subsônica (baixas velocidades), desde que não haja variação de temperatura significativa, o termo gravitacional pode ser desconsiderado uma vez que o ar é considerado com massa volúmica constante e incompressível.

¹¹ É válida a ressalva que estes componentes somente podem ser negligenciados em avaliações de ventilação natural por indução eólica.

2.1.1.2 Número de *Reynolds*

A determinação do tipo de regime do escoamento está atrelada ao número de *Reynolds*, parâmetro inicialmente estudado por *Osborne Reynolds*, que relaciona as forças de inércia às de viscosidade, e é determinado pela seguinte Equação 3:

$$Re = \frac{\text{efeitos inerciais}}{\text{efeitos viscosos}} = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Re: Número de *Reynolds* (adimensional)

ρ : massa volúmica do fluido (kg/m³)

u: velocidade do escoamento (m/s)

L: dimensão geométrica (m)

μ : viscosidade dinâmica (kg/ms)

Desta forma, números de *Reynolds* elevados indicam escoamentos em que as forças inerciais são preponderantes. Valores reduzidos deste parâmetro, estabelecem a predominância dos efeitos de viscosidade.

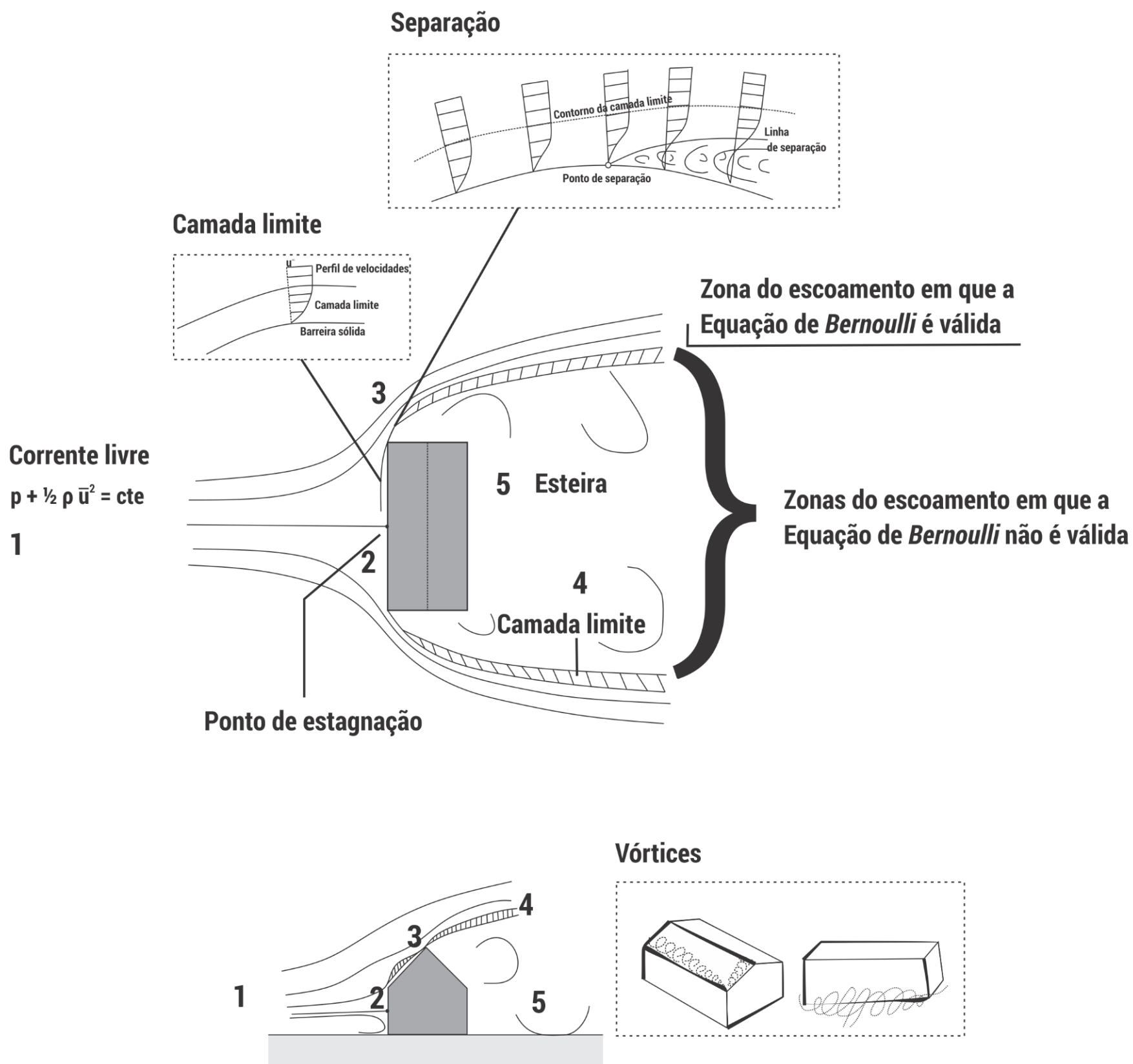
A transição entre regimes laminares e turbulentos é marcada pelo número de *Reynolds* crítico. Este valor não é fixo, variando de acordo com o tipo de contorno do escoamento, ou seja, confinados ou internos (dutos ou ambientes internos, por exemplo) ou externos. De acordo com Bistafa (2018), para situações de escoamentos confinados, $Re < 2300$, $2300 < Re < 4000$ e, $Re > 4000$, caracterizam movimentos laminares, de transição e turbulentos, respectivamente. Fox, McDonald e Pritchard (2014), para escoamentos externos indicam número de *Reynolds* crítico de 5×10^5 , sendo abaixo ou de mesmo valor característico de camadas limites com escoamento laminar e, acima, para turbulento.

2.1.1.3 Camada limite, separação, esteira e vórtices¹²

Na Figura 2, os comportamentos e efeitos típicos da interação entre o vento e as edificações são sintetizados. As regiões do escoamento (apresentadas em item prévio 2.1.1), corrente livre, camada limite e esteira, são identificadas pelos numerais 1,4 e 5, respectivamente. Além disso, destacam-se as regiões em que a Equação de Bernoulli é válida (corrente livre). Os números 2 e 3 fazem referência a situação de ponto de estagnação e separação do escoamento. O primeiro, como supracitado, trata-se de um ponto (na fachada montante), em que o escoamento é caracterizado por pressão máxima e, portanto, velocidade mínima. O segundo, é contextualizado, nos parágrafos a seguir.

¹² Neste subitem as regiões do escoamento apresentadas em momento prévio (subitem 2.1.1) são descritas com mais detalhes e alguns fenômenos importantes para o entendimento do presente trabalho são destacados.

Figura 2: Caracterização dos comportamentos e efeitos típicos da interação do vento com as edificações.



Fonte: Adaptado de Aynsley; Melbourne; Vickery (1977); Blessmann (1983); Aynsley (1999); Fortuna (2012).

Para escoamentos com número de *Reynolds* elevados, o fluido é estudado desprezando-se as forças viscosas, essa regra é válida exceto nas proximidades com a barreira sólida, região denominada de **camada limite**. De acordo com Fortuna (2012), *Ludwig Prandtl* foi o primeiro a demonstrar a existência de uma fina camada ao redor de corpos imersos no escoamento, local em que as tensões de cisalhamento¹³ não poderiam ser desconsideradas, mesmo para fluidos de baixa viscosidade. A camada limite, resultante das tensões de cisalhamento entre as partículas do fluido estacionárias na barreira sólida e as em movimento com o escoamento, varia de zero (no contato com o sólido) a velocidade de escoamento livre e pode ser classificada em razão do número de *Reynolds* como laminar, de transição ou turbulenta (AYNSLEY, 1999; AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977).

A existência de uma camada limite pode implicar a ocorrência de regiões de **esteiras** que se iniciam a jusante de **pontos de separação do escoamento**. De acordo com Marques da Silva (2003; 2010), o fenômeno de separação, que tem seu início marcado por um gradiente de pressão adverso¹⁴, ocorre quando a pressão aumenta para jusante e há a inversão do sentido do escoamento junto às superfícies, resultando no afastamento das linhas de corrente e, conseqüente, no aumento da espessura da camada limite. Zonas de recirculação caracterizam a região configurada entre a linha de separação do escoamento e a barreira sólida.

Essas recirculações formam, a jusante uma **esteira** (MARQUES DA SILVA, 2010). De acordo com Blessmann (1983), a região de esteira é caracterizada pela existência de turbilhões de diversos tamanhos e velocidades, além de baixa variação de pressão média e de velocidades, usualmente, menores em relação ao escoamento circundante.

Segundo Blessmann (1983), há o desprendimento de vórtices do corpo, quando um certo número de *Reynolds* é atingido. O mesmo autor, classifica que para problemas de aerodinâmica das construções **vórtices de base e de topo** são os mais característicos. Os primeiros, ocorrem em incidências de vento perpendiculares (ou próximas a esta situação) a uma das faces da edificação nas proximidades com o solo; desenvolvem-se do centro da face para as quinas. Este tipo de vórtice altera os valores positivos a barlavento e nas extremidades incrementa as velocidades e as sucções, promovendo a caracterização de valores mais negativos nesta região. Já, os segundos, aparecem aos pares no topo de cobertura, principalmente em incidências oblíquas, e podem resultar em significativas sucções. Marques da Silva (2010) também pontua que em escoamentos do tipo camada limite, forma-se um vórtice de eixo horizontal paralelo à fachada barlavento, denominado de pé de fachada, resultante da trajetória descendente do escoamento na parte inferior desta fachada.

2.2 VENTILAÇÃO NATURAL NAS EDIFICAÇÕES

A ventilação natural em edificações consiste no conjunto de processos que conduzem, de modo controlado, os fluxos de ar entre os ambientes interno e externo (MARQUES DA SILVA, 2010) através de aberturas que podem funcionar como entradas e/ou saídas de ar.

De acordo com Toledo (1999), mesmo que de forma inconsciente, os projetistas, ao selecionarem orientação, formas, dimensões, materialidades ou estratégias, estão apresentando soluções definitivas aos problemas técnicos dos quais o resultado é o conforto nas edificações. Por vezes, ao longo da

¹³ Tensão indica o quociente entre o módulo de força e a área em que atua (FORTUNA, 2012). Logo, tensões de cisalhamento consistem nas tensões que atuam tangencialmente a um dado plano.

¹⁴ De acordo com Marques da Silva (2010), efeitos de separação ocorrem quando um escoamento contorna uma construção, em razão dos gradientes de pressão adversos existentes nas quinas. Fortuna (2012) define os gradientes de pressão adversos como ocasiões em que a pressão aumenta ao invés de diminuir na direção do escoamento.

História, as edificações tiveram suas linhas e formas adequadas em prol da promoção e/ou manutenção da ventilação natural nos espaços internos, por se tratar de um recurso milenar de renovação de ar dos ambientes.

Em contraponto, no contexto atual, é crescente a adoção de condicionamento artificial nas edificações, e conseqüentemente, o incremento na demanda de energia elétrica destinada a este setor (OMRANI et al., 2017; SAKIYAMA et al., 2020), ainda que seja reconhecido o potencial de ventilação natural¹⁵ disponível em diferentes realidades climáticas (CHEN; TONG; MALKAWI, 2017). Allard, Ghiaus e Mansouri (2003) pontuam que a ideia de ser natural e assim de difícil controle configura uma das barreiras para a sua implementação. Trindade, Pedrini e Duarte (2010) justificam o seu uso limitado pelos arquitetos, mesmo em cenários de climas quentes e úmidos, quando comparada aos sistemas artificiais, pela falta de garantias quanto à resolução de questões de conforto térmico.

Um desafio à inclusão da predição de ventilação natural nas fases iniciais do processo de projeto é a complexidade física inerente ao fenômeno (OMRANI et al., 2017). De acordo com Lechner (2009) e Morbitzer (2003), são nas fases iniciais que decisões de maior impacto no desempenho das edificações são tomadas.

Durante a prática projetual, a visualização dos fenômenos relacionados ao conforto ambiental subsidia a tradução correta e eficiente do conhecimento teórico envolvido. No entanto, essa necessidade é desafiada pelo desenho, meio tradicional de representação gráfica. A ventilação natural, por exemplo, é usualmente representada por flechas que podem transmitir uma informação equivocada quanto a sua real eficácia (KOWALTOWSKI et al., 1998; KOWALTOWSKI et al., 2003; KOWALTOWSKI et al., 2005).

Para Toledo (1999) a literatura carece de obras que transcrevam em linguagem acessível (aos não especialistas) os resultados de estudos laboratoriais. Etheridge (2012) complementa que este processo de tradução de conhecimentos científicos para o projeto não é simples, e demanda não apenas da adoção de aproximações, mas também do entendimento, por parte dos projetistas, dos métodos disponíveis, suas limitações e potencialidades e, dos pesquisadores, o domínio acerca dos problemas encontradas pelos projetistas. De acordo com Szokolay (2019), o projetista pode exercer sua imaginação após a compreensão do embasamento físico, e pontua que a ciência não compete com o projeto intuitivo e inventivo, mas o integra, fornecendo importantes ferramentas durante seu progresso.

É evidente a necessidade de domínio, por parte dos projetistas, dos conceitos básicos acerca das funcionalidades, mecanismos e sistemas de ocorrência da ventilação natural em edificações para que sua adoção durante o processo projetual seja mais efetiva e, assim, impacte positivamente o desempenho final da edificação.

2.2.1 Funcionalidades, mecanismos (eólico, térmico e combinado) e sistemas de ventilação natural (cruzada e unilateral)

A ventilação natural tem como funcionalidades básicas a garantia e/ou promoção: (a) da qualidade do ar no interior das edificações, através de renovações mínimas do volume de ar interno pelo externo; (b) do conforto térmico dos usuários e; (c) do resfriamento das estruturas das edificações (GIVONI,

¹⁵ Este estudo tem como diferencial a análise do potencial de ventilação em escala global para 1854 localidades, das quais 60 tiveram a influência deste impacto avaliado na redução do consumo energético nas edificações por meio de simulações no *EnergyPlus*. Em síntese, os autores concluem a dependência da ventilação natural das condições climáticas e, portanto, a variação do seu potencial de utilização entre as localidades consideradas.

1976). Bittencourt e Cândido (2008) acrescentam, à lista, a potencialidade de ser um recurso gratuito e, assim, uma estratégia bioclimática de grande alcance social e que auxilia na redução da demanda do consumo de energia elétrica destinada ao condicionamento artificial dos espaços.

Quanto às **exigências higiênicas**, a ventilação natural, atendendo taxas de renovação de ar mínimas nos ambientes, deve ser assegurada independente das condições climáticas. A sua funcionalidade é manter a composição do ar em níveis adequados e não prejudiciais aos usuários, reduzindo a concentração de gases, vapor de água, particulados, poluentes, odores, e compostos voláteis nocivos. Documentos normativos nacionais e internacionais atribuem valores de taxas mínimas ou valores recomendáveis de renovação do ar interno, ou do volume do ar requerido por pessoa, em função da área do ambiente, atividades desenvolvidas ou hábitos dos usuários (fumantes e não fumantes, por exemplo) (RIVERO, 1985; GIVONI, 1976).

Atualmente, devido a pandemia sanitária ocasionada pela COVID -19, soma-se à ventilação higiênica, a funcionalidade de redução da transmissão de agentes patogênicos. Frente a esse contexto, o provimento dos ambientes com maiores taxas de ar externo, seja por meios naturais ou forçados, é indicado como recomendação de controle da pandemia. Diante das demandas recentes, acentua-se a necessidade de mudanças nos paradigmas da prática da ventilação (MELIKOV, 2020), o que pode, conseqüentemente, resultar na revisão dos valores mínimos para a manutenção de qualidade do ar no interior dos ambientes.

Quanto às **exigências de conforto térmico dos usuários**, essa funcionalidade é requerida principalmente em ocasiões em que a temperatura interna é superior à externa e em contextos caracterizados por climas quentes em que a ventilação, além de prover a salubridade dos ambientes, auxilia na manutenção do conforto térmico dos usuários. Desta forma, o principal parâmetro de influência é a velocidade do ar, que, ao ser incrementada, aumenta as trocas térmicas por convecção entre os usuários e o ambiente que o circundam. Freixanet e Viqueira (2004) demonstram os efeitos mecânicos sobre os usuários e no resfriamento proporcionado pelo incremento da velocidade de ar. Cândido et al. (2010) indicam que velocidades de ar superiores aos valores indicados pela literatura ou por normativas podem ser aceitáveis em alguns contextos climáticos para compensar a elevada temperatura e umidade. Além disso, sugerem que futuras normativas brasileiras investiguem valores mínimos de velocidade do ar para ambientes naturalmente ventilados. De acordo com Toledo (2006), a normativa brasileira se baseia em regulamentos internacionais, desenvolvidos para contextos climáticos diversos e, portanto, com foco na manutenção da qualidade do ar e na minimização das trocas entre os ambientes externo e interno para fins de otimização dos sistemas artificiais de aquecimento e resfriamento do ar interior.

Quanto ao **arrefecimento das estruturas**, em edificações naturalmente ventiladas, o ar externo, ao adentrar os ambientes, se mistura ao interno e trocas de calor ocorrem. A quantidade de calor que pode ser adicionada ou removida ao ambiente interno é função da taxa de ventilação, do diferencial de temperatura (entre os ambientes internos e externos) e da capacidade térmica volumétrica do ar (GIVONI, 1976). Para que a ventilação promova o resfriamento das estruturas é necessário que a temperatura interna seja superior à externa. Rivero (1985) alerta que é necessária ventilação abundante e mantida durante um longo período de tempo para a redução das temperaturas superficiais dos sistemas construtivos ou para uma redução significativa da temperatura média radiante.

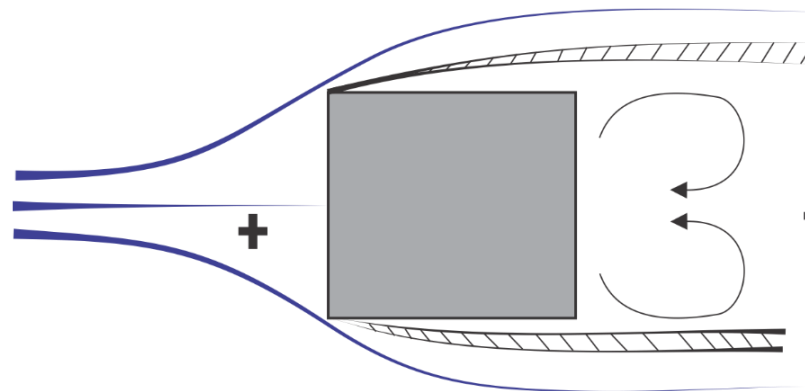
O movimento do ar, como já mencionado, seja em escalas atmosféricas ou do edifício, é resultante de um diferencial de pressões. Segundo Marques da Silva (2010), os processos físicos que induzem este diferencial de pressão podem ser de origem **eólica, térmica** ou, ainda, decorrente de uma **ação conjugada** dos anteriores.

A **ventilação natural por ação eólica** (Figura 3), ou também comumente designada por ação dos ventos, ocorre devido à ação da força mecânica do vento na edificação, ou seja, a partir da transformação da energia cinética do vento em pressão estática nas suas superfícies (RIVERO, 1985; FROTA;

SCHIFFER, 2001; MARQUES DA SILVA, 2010). Desta forma, parte-se da premissa que o vento se desloque em movimento uniforme e paralelo ao solo. Logo, ao encontrar um obstáculo, este tende a contorná-lo e retomar o seu comportamento inicial. Nesta interação vento e edificações, geram-se diferentes regiões do escoamento e zonas de sobrepressão (positivas) e subpressão (negativas), isto é, pressões maiores ou menores que a atmosférica, são determinadas (FROTA; SCHIFFER, 2001; TOLEDO, 1999). Bittencourt e Cândido (2008) pontuam que pressões positivas e negativas caracterizam superfícies a barlavento e, sotavento e laterais, respectivamente.

As distribuições de pressões nas edificações podem ser alteradas por diversos fatores, tais como: velocidade do vento, ângulo de incidência, obstáculos no seu entorno imediato (conformação do tecido urbano, presença e disposição do conjunto edificado, existência de barreiras orográficas, vegetação, cercas, muros, beirais) ou nas proximidades das aberturas (dispositivos de sombreamento, telas). Além disso, a eficácia da ventilação interna é dependente, principalmente, da caracterização das aberturas (dimensões, posicionamentos, tipos, área efetiva para a ventilação) e também influenciada, por barreiras internas ao fluxo de ar, como por exemplo, paredes e divisórias. Estes aspectos externos e internos às edificações podem impactar positivamente ou negativamente o seu potencial de ventilação. Cabe sempre a ressalva que maiores taxas de fluxo de ar não são, necessariamente, sinônimos de melhores desempenhos de ventilação natural, já que isto é resultante de uma somatória favorável de velocidades e distribuições de ar adequadas às necessidades térmicas e funcionais do ambiente e dos seus usuários.

Figura 3: Ventilação natural por indução eólica.

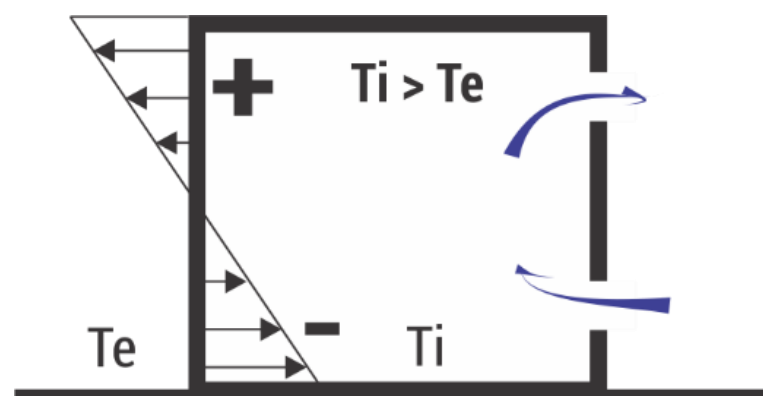


Fonte: Adaptado de Bittencourt e Cândido (2008).

A **ventilação por ação térmica** (Figura 4), ou por efeito chaminé, consiste no fluxo de ar decorrente de um diferencial de pressão induzido por variações nas temperaturas do ar interno e externo aos ambientes e, conseqüentemente, nas suas densidades e pressões (MARQUES DA SILVA, 2010; FROTA; SCHIFFER 2001; TOLEDO, 1999).

As temperaturas no interior das edificações variam em função dos ganhos de calor provenientes do ambiente externo (radiação solar atuando na envoltória da edificação) ou interno (calor gerado por pessoas, iluminação e equipamentos). Desta forma, o ar quando aquecido se torna menos denso e tende a ascender e se o ambiente contemplar aberturas a diferentes alturas, um fluxo de ar é configurado entre elas. De acordo com Toledo (1999), esse comportamento é explicado pelos pesos atribuídos a colunas de ar de mesma altura, mas com temperaturas distintas (calculado pela multiplicação da massa específica do ar, aceleração da gravidade e altura da coluna).

Figura 4: Ventilação natural por indução térmica.



Fonte: Adaptado de Bittencourt e Cândido (2008) e Liddament (1996).

Para facilitar o entendimento deste mecanismo, frequentemente, adota-se o exemplo de um cubo em que a temperatura interna (T_i) é superior a temperatura externa (T_e). Atribui-se aberturas nas extremidades superior e inferior, o que resulta em sobrepressões e subpressões, respectivamente, devido a diferença de massa volúmica do ar (ρ , conseqüentemente, do peso das colunas correspondentes) decorrente da variação de temperatura. A transição da condição de subpressão para sobrepressão é demarcada por uma linha imaginária denominada de zona neutra. Nesta cota, na qual as pressões se igualam, se for contemplada por uma abertura, o fluxo de ar será inexistente. Logo, esse tipo de mecanismo de ventilação natural é potencializado pela variação de temperatura interna e externa e pelo distanciamento (em altura) entre as aberturas de entrada e saída. Ademais, esse mecanismo também pode ser verificado em situações de grandes aberturas, com uma região funcionando como entrada e outra, como saída de ar ao longo de sua altura.

A **ação conjugada dos mecanismos de ventilação por indução eólica e térmica** pode ser uma opção quando a resultante desta combinação indicar uma ventilação mais eficiente. Para isso, deve-se avaliar, previamente, os mecanismos individualmente para evitar que atuem de formas opostas.

Dependendo da localização das aberturas na envoltória da edificação, a ventilação natural pode ser classificada como ventilação **cruzada** ou **unilateral**. A primeira ocorre quando as aberturas estão situadas em faces distintas do edifício, sendo as de entrada localizadas em zonas de sobrepressão e as de saída em zonas de subpressão; já a segunda ocorre quando existe apenas uma abertura para a troca de ar ou quando as aberturas estão situadas em mesma face, e assim, em zonas de igual ou de pequeno diferencial de pressão (GIVONI, 1976). Segundo Marques da Silva (2010), esses dois sistemas globais de ventilação podem ocorrer nos processos por ação dos ventos, efeito chaminé ou ação conjugado.

2.2.2 Camada Limite Atmosférica (CLA)

A camada limite consiste em uma região do escoamento em que ocorrem forças de atrito (fricção) na interação entre o fluido e uma superfície, em razão da viscosidade do fluido. Esta interação resulta em um gradiente (perfil) de velocidades na espessura desta camada que varia de zero (na superfície) até a velocidade de fluxo livre de obstruções (MARQUES DA SILVA, 2010; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008). De acordo com Allard (2002), o vento nas camadas mais baixas atmosféricas é variável e irregular. Este comportamento randômico é designado de turbulência, que tende a diminuir com o

aumento da altura, já que pode ser ocasionada por variações de temperaturas ou pela presença de obstáculos na superfície. Assim, entende-se a velocidade do vento como a somatória de uma parte descrita por um comportamento médio e outra por flutuações em relação a esta média.

Tendo isso considerado, Marques da Silva (2010) indica que o perfil de velocidades médias da camada limite turbulenta pode ser determinado a partir de leis de potência ou logarítmica:

$$\frac{U_{(z)}}{U_{\infty}} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^{\alpha} \quad \text{Equação 4}$$

$$U_{(z)} = \frac{u_{\tau}}{k} \left(\frac{z-d}{z_0}\right)^{\alpha} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$U_{(z)}$: velocidade média a uma determinada altura (m/s)

$U_{(\infty)}$: velocidade média do fluxo livre de obstruções (m/s)

z : determinada altura (m)

δ : espessura da camada limite (m)

α : expoente da rugosidade (adimensional)

d : deslocamento do plano de referência (m)

z_0 : escala de comprimento da rugosidade (m)

k : constante de Von Karman (adimensional)

u_{τ} : velocidade de atrito (m/s)

O perfil de velocidades médias de vento é dependente da rugosidade da superfície, sendo esta característica função da orografia do terreno e da geometria e implantação dos obstáculos. Assim, a uma dada altura e em um determinado terreno, o incremento da sua rugosidade resulta no decréscimo da velocidade média (ALLARD, 2002). Desta forma, em problemas de aerodinâmica das construções, deve-se corrigir o dado de velocidade média de vento obtido em estações meteorológicas a partir de coeficientes que descrevam a orografia do terreno e os obstáculos existentes. Ademais, as aferições, se alinhadas aos requisitos estipulados pela Organização Mundial de Meteorologia, são realizadas com o posicionamento dos anemômetros a 10 m acima do solo e em terrenos planos e de rugosidade reduzida. Assim, documentos normativos, usualmente, indicam equações (leis logarítmicas ou de potência) que auxiliam a transposição da velocidade média aferida a 10 m para a altura a ser utilizada em projeto.

O *Building Research Establishment* – BRE (1978), utiliza-se da seguinte equação:

$$V = V_m \cdot k \cdot z^{\alpha} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

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

V_m : velocidade média do vento na estação registrada a 10 m (m/s)

z : altura determinada (m)

k, α : coeficientes de caracterização da superfície do terreno (Tabela 1)

Tabela 1: Tabela: Valores de k e α (coeficientes de rugosidade do terreno) para diferentes características do entorno.

Coeficientes de terreno	k	α
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: BRE *apud* Bittencourt e Cândido (2008).

A normativa americana, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), utiliza-se da Equação 7 (derivada da Equação 4), sendo os valores de espessura da camada limite, coeficiente de rugosidade do terreno, assim como a descrição do tipo terreno sintetizados na Tabela 2:

$$U_H = U_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^{\alpha} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

U_H : velocidade média em H (m/s)

U_{met} : velocidade média – estação meteorológica (m/s)

δ_{met} : espessura da camada limite – estação meteorológica (m)

α_{met} : coeficiente de rugosidade do terreno – estação meteorológica (adimensional)

H_{met} : altura da aferição – estação meteorológica (10 m)

H : altura da edificação (m)

δ : espessura da camada limite (m)

α : coeficiente de rugosidade do terreno (adimensional)

Tabela 2: Características da camada limite atmosférica (categoria de terreno, descrição, expoente de rugosidade, α e espessura da camada em m).

Categoria de terreno	Descrição	Expoente α	Espessura da camada (m)
1	Grandes centros urbanos	0,33	460
2	Áreas urbanas e suburbanas	0,22	370
3	Campo aberto	0,14	270
4	Plano e sem obstruções	0,10	210

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2001).

A norma brasileira NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações (ABNT, 1988) tem como escopo a fixação de condições de cálculo, devido à ação estática e dinâmica do vento, em edificações. Nela, indica-se que a velocidade média característica do vento (V_k) é determinada a partir da seguinte equação (Equação 8):

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

V_k : velocidade média característica de vento (m/s)

V_0 : velocidade básica do vento (m/s)

S_1 : fator topográfico

S_2 : fator que considera rugosidade e altura do terreno e dimensões das edificações

S_3 : fator estatístico

De acordo com a referida normativa, a velocidade básica do vento (V_0) consiste na velocidade média de uma rajada de 3 s, que excede a média uma vez no período de 50 anos, e aferida em campo plano e aberto a 10 m de altura. O fator topográfico (S_1) considera variações no relevo do terreno, sendo igual a 1,0 para terrenos planos ou pouco acidentados. Em taludes e morros, em que pode ocorrer um fluxo de ar bidimensional, seu valor é designado pela interpolação linear dos dados calculados para cada diferente cenário de sua variação. O fator S_2 representa um efeito combinado da rugosidade e altura do terreno e das dimensões da edificação. Quanto à rugosidade do terreno a referida normativa apresenta cinco categorias, cujas características estão sintetizadas na Tabela 3:

Tabela 3: Categorias quanto à rugosidade do terreno.

CATEGORIA	DEFINIÇÃO
I	Superfícies lisas de grande extensão (mais de 5 km). Exemplos: mar calmo; lagos e rios; pântanos sem vegetação.
II	Terrenos abertos em nível, poucos obstáculos isolados (cota média do topo dos obstáculos sendo menor ou igual a 1,0 m). Exemplos: campos de aviação, zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala; fazendas sem sebes ou muros, pradarias e charnecas.
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos (cota média do topo dos obstáculos sendo igual a 3,0 m). Exemplos: granjas e casas de campo; fazendas com sebes e/ou muros; subúrbios com casas baixas e esparsas.
IV	Terrenos com obstáculos numerosos e pouco espaçados (cota média do topo dos obstáculos sendo igual a 10,0 m). Exemplos: cidades pequenas; zonas de parques ou bosques com vegetação densa; áreas industriais planas ou parcialmente desenvolvidas; subúrbios densamente construídos.
V	Terrenos com obstáculos numerosos, altos e pouco espaçados (cota média do topo dos obstáculos sendo igual ou superior a 25,0 m). Exemplos: complexos industriais bem desenvolvidos; florestas com árvores altas e, centros urbanos de grandes cidades.

Fonte: Adaptado de ABNT (1988).

Quanto às dimensões das edificações, deve-se atentar para efeitos de cálculo às características construtivas e/ou estruturais que apresentem pouca ou fraca continuidade estrutural ao longo da edificação. Desta forma, três classes são delineadas (Tabela 4):

Tabela 4: Classes quanto às dimensões e características das edificações.

CLASSE	DESCRIÇÃO
A	Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.
B	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.
C	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Fonte: Adaptado de ABNT (1988).

Quanto à altura do terreno o S_2 usado no cálculo da velocidade do vento em uma determinada altura z (em m) acima do nível geral do terreno pode ser determinado pela Equação 9 que relaciona a força de rajada (F_r) aos coeficientes pré-determinados (b e p) na normativa para as várias classes de edificações, categorias de terreno e intervalos de tempo de obtenção da velocidade média. Os coeficientes são apresentados no Anexo A:

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

 S_2 : fator que considera rugosidade e altura do terreno e dimensões das edificações z : altura determinada (m) F_r : força de rajada b ; p : coeficientes pré-determinados para as várias classes de edificações, categorias de terreno e intervalos de tempo de obtenção da velocidade média

Por fim, o S_3 é um fator estatístico que relaciona a vida útil da edificação e o grau de segurança requerido. Como a velocidade média básica do vento (V_0) é baseada em um período de 50 anos, adota-se este intervalo como vida útil da edificação. Dentro deste período, a probabilidade desta V_0 ser atingida ou superada é de 63%, assim, utiliza-se este valor como nível de probabilidade (0,63). Essas condições são adequadas para edificações categorizadas no grupo 2 (moradias, hotéis, escritórios). Para edificações que diferem destes usos, os valores mínimos de S_3 são sintetizados na Tabela 5:

Tabela 5: Valores mínimos do fator estatístico S_3 .

GRUPO	DESCRIÇÃO	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

Fonte: ABNT (1988).

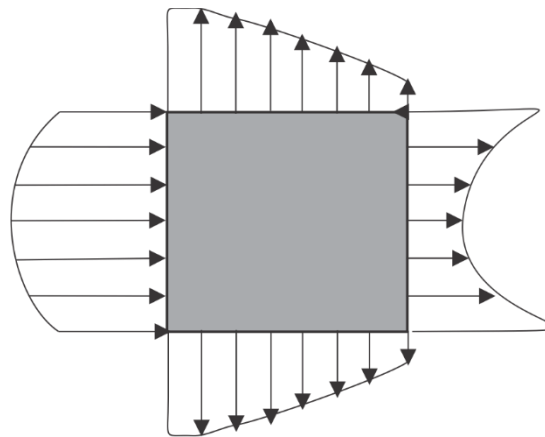
2.2.3 Coeficientes aerodinâmicos e estimativa da ventilação natural

Devido ao objetivo deste trabalho, restringe-se à discussão à ventilação natural cruzada por indução eólica e, abordam-se os efeitos e os parâmetros aerodinâmicos atuantes, principalmente, nas aberturas e/ou no seu entorno imediato. Por fim, a forma de estimativa da vazão e da taxa de renovação de ar são apresentadas.

2.2.3.1 Coeficientes de pressão devido ao vento (C_p)

A interação do escoamento de vento com as edificações resulta na geração de campos de pressão¹⁶ (Figura 5) e, conseqüentemente, na distribuição de pressões nas suas superfícies. De forma genérica, para formas não aerodinâmicas, como as edificações, a distribuição de pressões ocasionada por ação eólica ocorre do seguinte modo: as paredes expostas ao vento (barlavento) estão sob a ação de sobrepressões e os planos não expostos ao vento (sotavento e laterais), estão sujeitos à ação de sucções. Indica-se que as aberturas de entrada sejam localizadas a barlavento e as de saída em zonas de subpressão¹⁷.

Figura 5: Campos de pressão originados em uma edificação por indução eólica.



Fonte: Adaptado de Bittencourt e Cândido (2008).

De acordo com Marques da Silva (2010), a distribuição de pressão é descrita a partir de um quociente adimensional denominado coeficiente de pressão (C_p) devido ao vento e determinado a partir da Equação 10:

¹⁶ De acordo com Bittencourt e Cândido (2008), estes campos de pressão determinam as forças de arraste e de sustentação. Estas forças são originadas pela atuação da velocidade e da viscosidade em um corpo sólido imerso a um escoamento, sendo as primeiras paralelas à direção do escoamento e as segundas na direção vertical ou perpendicular a este.

¹⁷ Cabe uma ressalva para situações em que os valores de sucção não são expressivos, o que pode ocasionar, no balanço de pressões, uma situação de admissão do fluxo de ar por zonas de subpressão (Marques da Silva, 2004).

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}$$

Equação 10

Sendo $\frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ a pressão dinâmica do escoamento.

Onde:

C_p : coeficiente de pressão devido ao vento (adimensional)

p : pressão estática em um ponto da envoltória da edificação

p_∞ : pressão atmosférica

ρ : massa volúmica do ar (kg/m^3)

U_∞ : velocidade média do vento, usualmente aferida no topo de cobertura (m/s)

A pressão estática consiste na pressão exercida pelo fluido nas paredes de um recipiente, e na aerodinâmica, equivale a pressão atmosférica acrescida da gerada pela diferença de densidades entre o ar externo e interno às construções. Já a pressão dinâmica traduz a energia cinética total do escoamento ao atingir a edificação, e é função da velocidade e densidade do ar. A soma da pressão estática e dinâmica indica a pressão total (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2008).

Estes coeficientes (C_p), variáveis de ponto a ponto nas superfícies das edificações, são sensíveis ao ângulo de incidência do vento, caracterização do perfil da camada limite atmosférica (orografia e rugosidade do terreno) e da forma e dimensões da construção avaliada. Bittencourt e Cândido (2008) também acrescentam à porosidade da edificação como fator influente. Por fim, Allard (2002) reforça a necessidade de maiores investigações acerca desta variável e pontua, além dos anteriormente citados, a altura da edificação em relação ao entorno, razão do aspecto frontal e lateral da geometria, ângulo de inclinação do telhado e coordenadas da posição dos elementos, como aspectos também preponderantes nos valores de C_p . Santamouris e Wouters (2006) alertam que esta variável é sensível a pequenos detalhes da edificação, sendo assim indicam a aquisição destes valores para cada caso em específico.

Dados de C_p para geometrias simples (paralelepípedos) e lisas (sem detalhamentos nas fachadas) podem ser encontrados na literatura científica (LIDDAMENT, 1996; ORME; LIDDAMENT; WILSON, 1998, MARQUES DA SILVA, 2004, TPU, 2011). De acordo com Cóstola; Blocken; Hensen (2009) 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*). Além de representar o parâmetro motriz para as análises de ventilação natural por ação dos ventos, os C_p s 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 et al. (2010) enfatizam que tais programas têm, comumente, um banco de dados limitados de C_p s apresentando esses dados somente para edifícios de geometria simples, como cubos, paralelepípedos, entre outros. Informações para edifícios de geometria complexa, 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. Segundo Aynsley, Melbourne e Vickery (1977) o uso de diferenciais médios de pressão, obtidos por meio

de ensaios em modelos selados, proporcionam uma estimativa satisfatória para aberturas ocupando até 20% da área da parede. Acima desta porcentagem, os mesmos autores afirmam, que a determinação de taxas de fluxos baseada nestes dados pode ser dificultada.

O *EnergyPlus* (EERE, 2021a), *software* mundialmente conhecido, utilizado para avaliações de desempenho térmico e energético em edificações, utiliza-se de coeficientes médios de pressão que podem ser inseridos manualmente pelo usuário¹⁸ ou, para geometrias retangulares¹⁹, serem determinados automaticamente por algoritmos internos ao programa. Para edificações baixas, o modelo de Swami e Chandra (1988) é utilizado e, para edificações altas equações provindas da normativa americana *2001 ASHRAE Fundamentals Handbook* (ASHRAE, 2001), desenvolvidos por Atkins et al. (1979) e Holmes (1986), respectivamente, para dados de paredes e coberturas desta tipologia de construção, são aplicados. No entanto, independentemente do tipo de edificação, a própria documentação do programa alerta que não são considerados impactos ocasionados por dispositivos de sombreamento nos cálculos da ventilação natural²⁰.

Quanto aos bancos de dados de C_p disponíveis, destaque se dá ao extenso banco de dados, *TPU Aerodynamic Database*²¹, elaborado pela Universidade de Tóquio em um projeto financiado pela Ministério da Educação, Cultura, Esportes, Ciência e Tecnologia do Japão. Este repositório contempla dados de coeficientes de pressão devido ao vento de modelos selados, obtidos por meio de ensaios em túnel de vento, para edificações altas isoladas ou com construção adjacente e, para edificações baixas com ou sem beirais, com coberturas plana, de duas ou quatro águas e também para exemplares com presença de entorno. Os dados para tipologias de diversas relações de proporções são facilmente acessados por uma plataforma intuitiva e disponibilizados em gráficos de contorno ou valores médios, máximos e mínimos compilados em arquivos (.mat)²². O banco de dados não contempla tipologias com detalhamentos nas fachadas.

Uma recente alternativa para a obtenção de C_p s para edificações é o *CpSimulator*²³. A interface permite a inserção de informações pessoais do solicitante, a geometria (nos formatos .idf; .sti; .city), a seleção do módulo de descrição do perfil de velocidades (leis de potência ou logarítmica ou autoajustável), e tipo de terreno (muito liso, campo aberto, suburbano, urbano). Os cálculos, baseados em *Computational Fluid Dynamics*, emulam um túnel de vento virtual e são corridos em um sistema em nuvem. Os dados de saída, em C_p médios por superfície ou valores locais, são disponibilizados em .csv; surface VTK ou ainda pelo arquivo .idf atualizado. Os dados do *TPU Aerodynamic Database* foram utilizados para a validação dos algoritmos de cálculo desenvolvidos a partir de simulações fluidodinâmicas (BRE; GIMENEZ; FACHINOTTI, 2018; GIMENEZ et al., 2018; GIMENEZ; BRE, 2019). Os modelos que contemplam detalhamentos nas fachadas foram validados a partir do estudo de Chand, Bhargava e Krishak (1998) e, também, pelos dados do TPU.

¹⁸ Utilizando-se da opção *INPUT* no campo *Wind Pressure Coefficient Type* no módulo *Airflow Network*.

¹⁹ Utilizando-se da opção *AVERAGE-SURFACE CALCULATION* no campo *Wind Pressure Coefficient Type* no módulo *Airflow Network*.

²⁰ "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, 2020, p.1096).

²¹ Disponível em: <http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>

²² Extensão utilizada e desenvolvida pela *Mathworks* e compatível com o *software* MATLAB.

²³ Disponível em: <https://cpsimulator.cimec.org.ar/>

2.2.3.2 Perda de carga no escoamento e Coeficiente de descarga (Cd)

A Equação 1 (Equação de Bernoulli) descreve o escoamento de um fluido ideal²⁴ ao longo de uma linha de corrente. No entanto, em fluidos reais, segundo Marques da Silva (2003), o escoamento precisa consumir energia para vencer resistências (pela força de atrito ou turbulência) a ele impostas, convertendo-se em calor e promovendo a redução de sua velocidade. Desta forma, acrescenta-se a referida equação um termo para quantificar essa energia dissipada, nomeado de perda de pressão (ΔP_h). Logo, a Equação 1 é reescrita da seguinte forma (Equação 11):

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho\bar{u}_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho\bar{u}_2^2 + \rho g z_2 + \Delta P_h \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

p : pressão estática nos pontos 1 e 2 do escoamento (Pa)

\bar{u} : velocidade média nos pontos 1 e 2 do escoamento (m/s)

z : altura dos nos pontos 1 e 2 do escoamento (m)

g : aceleração da gravidade (m/s²)

ρ : massa volúmica do fluido (kg/m³)

ΔP_h : perda de pressão (Pa)

Em relação ao escoamento através de aberturas, a perda de carga (Δ_h , sendo $\Delta P_h = \rho g \Delta_h$) pode ser descrita por em um coeficiente adimensional, ζ ,²⁵ função da energia cinética do escoamento, conforme a Equação 12:

$$\Delta_h = \zeta \left(\frac{U^2}{2g} \right) \quad \text{Equação 12}$$

Que se substituída na Equação 11 e isolando o U, tem –se que a velocidade através de uma abertura é (Equação 13):

$$U = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \Delta P \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

Δ_h : perda de carga (m)

ζ : coeficiente de perda de carga (adimensional)

²⁴ De acordo com Blessmann (1983) um fluido ideal é caracterizado como incompressível e sem viscosidade.

²⁵ Relacionado às características da abertura.

ΔP : diferença de pressão estática entre os dois lados da abertura (Pa)

U: velocidade do fluido (m/s)

De acordo com Cóstola (2006), em problemas de ventilação natural é conveniente definir o termo coeficiente de descarga (Cd), que também é função das características da abertura e do número de *Reynolds*, sendo a relação do coeficiente de perda de carga e o de descarga expressa pela Equação 14. O mesmo autor enfatiza que o coeficiente de descarga (Cd), que pode variar entre 0 e 1, representa a parcela de energia útil através de uma abertura (uma janela no contexto da ventilação). Isto é, em uma janela ideal (sem imposição de perdas ao escoamento), toda a pressão se converte em fluxo de ar na abertura, no entanto em janelas reais, em razão das suas características geométricas da abertura assim como do seu posicionamento em relação ao escoamento, parte da energia que nela chega (100%) é dissipada. O valor comumente adotado para esse coeficiente pela literatura científica de 0,6. Etheridge (2012) afirma que a determinação de coeficientes de descarga em aberturas pode ser realizada a partir de aferições em modelos em escala real, reduzida ou ainda através da aplicação de métodos empíricos ou teóricos.

$$Cd = \frac{1}{\sqrt{\xi}}$$

Equação 14

Aynsley, Melbourne e Vickery (1977) apresentam valores de Cd, sintetizados na Tabela 6, para aberturas de entrada e saída para escoamento com incidência do vento perpendicular à abertura, sendo A_0 referente à área da abertura de saída e A_1 a área da seção transversal do ambiente. Marques da Silva (2010) compila na

Tabela 7 os valores indicados por diversos estudos acerca deste mesmo coeficiente.

Tabela 6: Valores de Cd para aberturas de entrada e saída com incidência do vento perpendicular à abertura.

Cd – abertura de entrada	
Área maior que 10% da parede e posicionada ao centro (em paredes finas)	0,50 < Cd < 0,65
Área de 10% a 20% da parede posicionada ao centro (formato já abertura semelhante à seção transversal do ambiente)	0,65 < Cd < 0,70
Área de 10% a 20% da parede posicionada ao centro (possuindo uma aresta comum com o ambiente, ex. porta)	0,70 < Cd < 0,80
Aberturas similares (forma e tamanho) à seção transversal do ambiente	0,80 < Cd < 0,90
Cd – abertura de saída (A_0/ A_1)	
0,00	0,63
0,20	0,64
0,40	0,67
0,60	0,71
0,80	0,81
1,00	1,00

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

Tabela 7: Valores de Cd propostos por diversos estudos presentes na literatura científica.

Referência	Cd	Observações
Allard et al. (1992)	0,60	Bordas retas
	0,33	Autor: Mahajan & Hill
	0,98	Bordas arredondadas
Florentzou et al. (1998)	$0,6 \pm 0,1$	
Etheridge & Sandberg (1996)	0,6	Re > 100
Orme et al. (1998)	0,6	Bordas retas
	1,0	Bordas arredondadas
ASHRAE (1997c)	$0,5 < Cd < 0,6$	Incidência normal
	$0,25 < Cd < 0,35$	Incidência oblíqua
	0,65	Térmico unidirecional
	$0,4 + 0,0045 \Delta T$	Térmico bidirecional
Riffat (1989)	$0,0835 (\Delta T/T) - 0,313$	$T = (T1+T2)/2$ [K]
	$0,22 < Cd < 0,6$	$0,5 < \Delta T < 13,0$
Kiel (1989)	$0,4 + 0,0045 \Delta T$	Protótipo
	0,6	Modelo
Van der Maas et al. (1989)	$0,6 < Cd < 0,75$	$\Delta T = 1,5 + 1,5 Z$
Allard et al. (1998)	0,78	Autor: Santamouris
	0,21 H; $1,5 \text{ m} < H < 2,0 \text{ m}$	Autor: Pelleret et al.
	$0,6 < Cd < 0,75$	Autor: Limam et al.
	0,311	Autor: Daziel et al.
	0,87; $0,9 \text{ m} < H < 2,0 \text{ m}$	Autor: Khodr
Peppes et al.	$0,147 (\Delta T/T) - 0,2$	Caixa de escada
Linden (1999)	0,6	Bordas retas
	0,8	Conduas curtas
	0,98	Bordas arredondadas

Extraído de Marques da Silva (2010).

Karava; Stathopoulos e Athienitis (2004) questionam a adoção de um valor constante de Cd para estudos de ventilação natural. A partir de uma revisão bibliográfica, os autores comparam diferentes estudos que observaram, em exemplares de ventilação cruzada e por indução eólica, o impacto no Cd da variação da porosidade da abertura, configuração (forma e posicionamento na fachada), variações nos ângulos de incidência de vento e número de *Reynolds* (Tabela 8) e, concluem que utilização de um valor fixo para este parâmetro pode ser fonte de erros em estimativas de ventilação natural. Em razão dos objetivos do presente trabalho, destaque se dá aos estudos revisados que contemplaram variações no ângulo de incidência de vento. Diante desta revisão da literatura os autores concluíram, com base nas investigações que consideraram variações na incidência do vento dentre os parâmetros observados (JENSEN et al.,2002b; OHBA et al.,2002 e 2004; KURABUCHI et al., 2002 e 2004; AKAMINE et al.,2004; ENDO et al. 2004; SAWACHI, 2002, SAWACHI et al.,2004 e NISHIZAWA et al. 2004), que com o aumento da angulação menores valores de Cd foram reportados, principalmente para aberturas de maior porosidade e, em que esta variação se mostrou significativa, e portanto, valores particulares para cada situação deveriam ser considerados em estimativas de ventilação natural. No *Handbook Fundamentals* da normativa americana ASHRAE, na subseção destinada aos requisitos de ventilação e infiltração²⁶, variações de Cd, diante da alteração da incidência de vento, também são reportadas, sendo indicado coeficientes de descarga entre 0,5 a 0,6 para incidências perpendiculares e entre 0,25 a 0,35 em situações oblíquas (ASHRAE, 2001).

²⁶ *Ventilation requirements and infiltration.*

Tabela 8: Estudos de ventilação cruzada e por indução eólica acerca do impacto no Cd de variações da porosidade da abertura, configuração (forma e posicionamento na fachada), variações nos ângulos de incidência de vento e número de *Reynolds*.

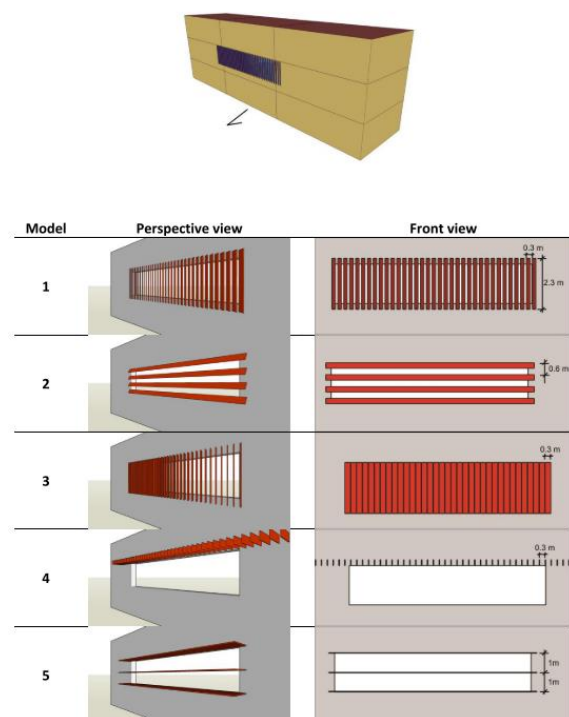
Referência	Método	Configuração da abertura	Cd
Aynsley et al. (1977)	empírico	Retangular	$Cd = f(\text{porosidade da abertura})$
Vickery e Karakatsanis (1987)	túnel de vento	Retangular e orifícios	$Cd = f(\text{porosidade da abertura})$ $Cd = f(Re)$
Murakami et al (1991), Kato et al (1992; 2004)	túnel de vento	Janelas	Modelo de balanço de potência $Cd = f(\text{configuração})$ $Cd = f(\text{área de abertura})$
Fluorenzou et al (1998)	Aferições em difusão real	Janelas e portas	$Cd = 0,6 \pm 0,1$
Heiselberg et al (1999, 2001, 2002 ^a e 2002b)	Testes em laboratórios		$Cd = f(\text{configuração})$ $Cd = f(\text{área de abertura})$ $Cd = f(\Delta P)$
Sandberg (2002 e 2004), Jensen et al (2002a; 2002c)	Túnel de vento e CFD	Orifícios em disco circular ou cilindro	$Cd = f(\text{configuração})$ $Cd = f(\text{porosidade da abertura})$ 0,7 para grandes porosidades ou <i>flow catchment problem</i>
Jensen et al (2002b)	CFD	Retangular	$Cd = f(\theta)$
Ohba et al (2002 e 2004); Kurabuchi et al (2002 e 2004); Akamine et al (2004); Endo et al (2004)	Túnel de vento CFD	Retangular, Janelas e circulares	Modelo de similaridade local $Cd = f(PR^*)$
Sawachi (2002), Sawachi et al (2004) e Nishizawa et al (2004)	Escala real Túnel de vento CFD	Janelas	$Cd = f(\theta)$, $Cd = f(\Delta P)$
Andersen	Empírico	Aberturas com abas móveis	$Cd = f(\text{ângulo de abertura})$
Carey e Etheridge (1999); Etheridge (2004)	Túnel de vento	Circular	$Cd = f(Re)$

Extraído de Karava; Stathopoulos e Athienitis (2004).

Quanto ao impacto proporcionado pela configuração das aberturas ao Cd, destacam-se os trabalhos que avaliaram as resistências ao escoamento decorrentes da presença de elementos externos, tais como os dispositivos de sombreamento, ou que investigaram adequações nos valores de Cd em busca de estimativas mais precisas das taxas de ventilação em edificações.

Cruz e Viegas (2016) indicam que para a obtenção de coeficientes de descarga mais precisos, é necessário que aferições da taxa de fluxo e do diferencial de pressão proporcionado pela passagem do escoamento pelas aberturas sejam realizadas. Assim, os autores mensuraram *in loco* os valores de coeficientes de descarga de uma janela de abrir com e sem uma estore de correr projetável no seu exterior e de uma esquadria com basculante superior a partir de duas metodologias: fluxo de ar gerado por ação dos ventos ou por um ventilador. Os resultados indicaram similaridade nos dados obtidos pelas duas metodologias. No caso da janela de abrir o Cd variou de 0,47 a 0,81 dependendo da configuração de abertura de suas folhas. A adição da estore reduziu estes valores em uma faixa de 0,77 a 0,41 (dependendo da área de abertura da estore). A esquadria basculante apresentou Cd igual a 0,84.

Figura 6: Cinco tipologias de dispositivos de sombreamento para as quais, a partir de simulações fluidodinâmicas, valores de C_d foram indicados.

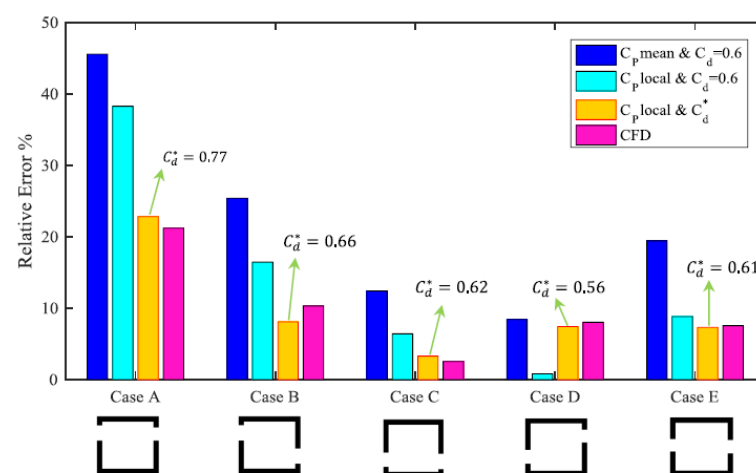


Fonte: Maciel et al. (2017).

Shirzadi; Mirzaei; Naghashzadegan (2018) na busca por elevar a precisão de predições de taxas de ventilação cruzada em modelos de rede²⁷, tal como o utilizado no algoritmo de cálculo do *EnergyPlus*, a partir de valores adaptados de C_d provindos de simulações fluidodinâmicas, inicialmente validadas com dados experimentais, avaliaram 750 cenários para três geometrias isoladas (cubo, cuboide e corredor longo), com variações nas áreas de aberturas e posicionamento nas fachadas, com vento incidindo normal à abertura. Erros em relação às taxas de ar foram definidos para três situações (Figura 7): (1) uso do coeficiente médio por fachada e $C_d=0,6$; (2) valores de C_p locais com $C_d=0,6$ e; (3) C_p local e C_d adaptado (C_d^*). Estimativas mais precisas foram obtidas ao utilizar valores adaptados de C_d no lugar de um dado padrão. Essa alteração decresceu o erro relativo em até 28% nas taxas de ar para alguns cenários. O uso de C_p locais, ao invés do médio por fachada, apresentou melhores predições.

Maciel et al. (2017) investigaram o efeito, por meio de simulações computacionais (*EnergyPlus e Ansys CFX 15.0*), da determinação adequada dos coeficientes de descarga (C_d) para avaliações de uma sala de aula genérica (6,0 m x 10,0 m x 3,5 m com uma abertura de 20,5 m² orientada a norte), localizada em São Paulo, ao adotar cinco tipologias de dispositivos de sombreamento (Figura 6). Primeiramente, a partir das simulações fluidodinâmicas, os valores de C_d adequados foram determinados para cada tipologia. Na sequência, estes valores, que variaram de 0,65 a 0,34 dependendo do nível de obstrução proporcionado pelo sombreamento, foram inseridos como dados de entrada de simulações realizadas no *EnergyPlus*. De modo geral, a comparação dos resultados dos níveis de conforto térmico e das taxas de renovação de ar, das simulações com C_d adequados e padrão (0,6), indicaram que adoção de dispositivos de sombreamento pode bloquear ou realçar o escoamento, logo a utilização de um valor padrão deve ser evitada. No caso com maior obstrução, o ajuste deste dado resultou em uma diferença média de 15% no fluxo de ar da sala avaliada.

Figura 7: Erro relativo das taxas de ar calculadas com base na equação do orifício confrontados com dados das simulações de Tominaga e Blocken (2016) para diferentes configurações de abertura em um cubo.



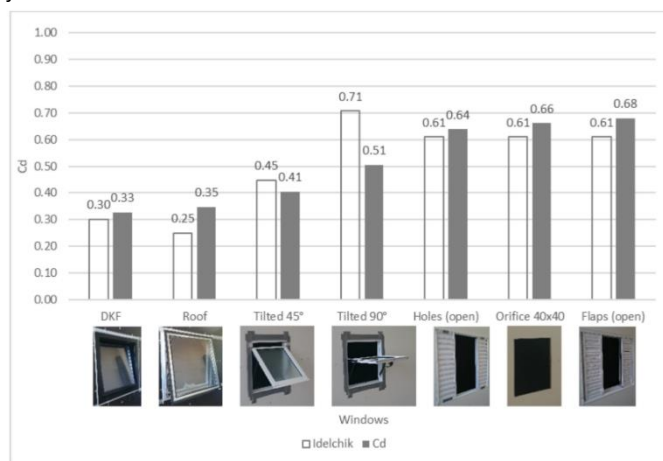
Fonte: Shirzadi; Mirzaei; Naghashzadegan (2018).

²⁷ Este modelo empírico considera que a edificação é caracterizada por um conjunto de zonas, cada qual representada por um nó de pressão, interligados entre si e aos externos por meio de aberturas ou frestas. A pressão nos nós externos é sabida e nos nós internos determinada a partir da aplicação de equações de balanço de massa. Com o conhecimento das pressões externas e internas, taxas de ventilação são determinadas através do cálculo dos diferenciais de pressão nas aberturas (SANTAMOURIS, 2002).

YI et al. (2019) também questionam a utilização de valores fixos de coeficiente de descarga ($C_d = 0,60 - 0,65$) para o cálculo de taxas de ventilação natural em edificações a partir da equação do orifício²⁸. Desta forma, investigam através de simulações fluidodinâmicas, inicialmente validadas com dados experimentais, a influência no C_d de parâmetros da edificação, tais como: proporção das aberturas, posição da abertura de entrada, relação entre as áreas de entrada e saída, posição da abertura de saída e ângulo de inclinação do telhado, além de avaliar a precisão do método na aferição das diferenças de pressão. Os resultados indicaram a precisão do método para o cálculo do coeficiente de descarga para relações de abertura menores que 37,3% (erro relativo <5%), no entanto o erro subiu para 18,9% com o incremento da relação para 81,4%. Quanto aos valores dos coeficientes de descarga, estes variaram de 0,66 a 0,95 com o incremento da relação de aberturas de 1,69% a 81,4%. Conclui-se que os valores de C_d são dependentes da proporção das aberturas, da posição da abertura de entrada e da relação de áreas de entrada e saída, no entanto independente de variações na posição da abertura de saída ou do ângulo de inclinação do telhado.

Fernandes et al. (2020) mensuraram, a partir de ensaios em túnel de vento de modelos em escala real, o C_d para sete tipologias de janelas (venezianas, painéis deslizantes com abas ajustáveis ou com perfurações), máximo ar (45° e 90°), boca de lobo fixa²⁹, com dobradiças no topo ou na base, ou abertura paralela ajustável) usualmente comercializadas no Brasil e na Alemanha para situação de ventilação cruzada. Assim, os coeficientes de descarga

Figura 8: Valores de C_d (aferidos e referenciados pela literatura científica) para sete tipologias de janelas.



Fonte: Fernandes et al. (2020).

foram determinados, utilizando a equação do orifício, a partir dos dados de pressão e fluxo de ar calculado. A análise de resultados consistiu em duas etapas: uma de validação da metodologia proposta a partir da comparação das tipologias com dados de literatura existentes (Idel'chik, 1966)³⁰ e a segunda na apresentação de valores inéditos de C_d para as demais tipologias (Figura 8). Os dados aferidos superestimaram os valores de literatura na faixa de 5% a 12%. Quanto aos valores de C_d para tipologias com dados inexistentes, esses foram de 0,06 (veneziana fechada com orifícios); 0,13 (boca de lobo fixa); 0,24 (veneziana fechada com abas ajustáveis) e de 0,55 (abertura paralela ajustável).

2.2.3.3 Taxa de vazão e taxa de renovação de ar

De acordo com Marques da Silva, a vazão de ar pode ser determinada a partir da aplicação de equações de conservação de massa e de energia em dois lados de uma abertura, sendo descrito pela Equação 15:

²⁸ "For a given applied pressure across an opening, the rate air flow through it is a function of size and geometry. For relative large openings (for example purpose provided vents, visible gaps around service penetrations and very ill-fitting components) the air flow can sometimes be represented by an equivalent flow through a flat plate orifice" (ORME; LIDDAMENT; WILSON, 1998, p.10).

²⁹ Tipologia com planos paralelos, permanentemente aberto, com um espaço entre eles.

³⁰ IDEL'CHIK, I. E. **Handbook of Hydraulic Resistance, Coefficients of Local Resistance and of Friction**. Jerusalem: Monson, 1966.

$$G = AU = A\chi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \Delta P \quad \text{Equação 15}$$

Recapitulando a Equação 13 e a Equação 14, pode-se concluir que o coeficiente de dissipação da equação é $\chi = \frac{1}{\sqrt{\xi}} = Cd$. Ademais, em problemas de ventilação natural induzida por ação eólica, a distribuição de pressão nas envoltórias da edificação é quantificada pelos coeficientes de pressão (C_p) devido ao vento, logo o diferencial de pressão pode ser expresso em função destes adimensionais (ΔC_p), conforme Equação 16:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \Delta C_p \quad \text{Equação 16}$$

Assim, substituindo na Equação 15, U pela Equação 13 e ΔP pela Equação 16, tem-se a que a taxa de vazão pode ser estimada a partir da Equação 17³¹:

$$G = C_d A U_{\infty} \sqrt{\Delta C_p} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

G : taxa de vazão de ar (m^3/s)

C_d : coeficiente de descarga (adimensional)

A : área equivalente de abertura (m^2)

U_{∞} : velocidade média de referência (m/s)

ΔC_p : diferencial dos coeficientes médios de pressão das faces barlavento e sotavento ($\Delta C_p = C_p \text{ barlavento} - C_p \text{ sotavento}$)

De acordo com Bittencourt e Cândido (2008) e Frota e Schiffer (2001), a área efetiva ou equivalente de aberturas é determinada a partir da Equação 18.

Para aberturas em paralelo, esta área é obtida pela soma aritmética das áreas parciais, e, para as em série, pelo inverso da soma dos quadrados:

$$\frac{1}{A_{eq}^2} = \frac{1}{(A_b)^2} + \frac{1}{(A_s)^2} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

A_{eq} : área equivalente de aberturas (m^2)

A_b : área das aberturas a barlavento (m^2)

³¹ Allard (2002) cita, além deste algoritmo indicado na normativa britânica (*Building Research Establishment- BRE*), outros modelos empíricos para a predição da ventilação natural em edificações como os métodos da ASHRAE, Aynsley, Gidds e Phaff, Givoni, além das metodologias propostas pela CSTB e por Ernest.

A_s : área das aberturas a sotavento (m^2)

As taxas de renovação horárias de ar³² (Equação 19), métrica comumente, utilizada por documentos normativos ou como dado de saída de grande parte dos programas utilizados para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações, que utilizam os modelos de rede, podem ser determinadas com a vazão calculada a partir da seguinte equação:

$$\text{Taxa de renovação de ar} = \frac{G \cdot 3600}{V} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

G : taxa de vazão de ar (m^3/s)

V : volume do ambiente (m^3)

2.2.4 Métodos de apoio à estimativa e/ou avaliação da ventilação natural no projeto arquitetônico

Os métodos³³ de apoio à estimativa e/ou avaliação da ventilação natural no projeto arquitetônico podem ser categorizados como teóricos, experimentais ou numéricos. A escolha de um ou da combinação de métodos a ser utilizada é dependente do problema estudado. Fortuna (2012) reforça que em investigações acerca do escoamento de fluidos é recorrente que eles se complementem e que a seleção de uma técnica não inviabiliza o uso de outras. Desta forma, deve-se analisar, ponderando vantagens e limitações, qual ou quais melhor fornecem com maior eficiência e precisão – dentro das limitações de tempo, operabilidade, custo e conhecimento – a variável desejada.

Baseados em uma revisão bibliográfica, Chen (2009) e Chen et al. (2010) elencam os métodos mais utilizados em estudos de ventilação natural em edificações e os dividiram em modelos: (a) analíticos; (b) empíricos; (c) experimentais em escala reduzida; (d) experimentais em escala real; (e) de rede (multizonas); (f) zonais e; (g) baseados em dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Os mesmos autores nomeiam como modelos híbridos os originados a partir do acoplamento de dois ou mais modelos como, por exemplo, o uso conjugado dos multizonas (característico de grande parte dos *softwares* de simulação do desempenho térmico e energético de edificações, os *Building Energy Simulation - BES*) e dos baseados em fluidodinâmica computacional (CFD). Rodríguez-Vásquez et al. (2020) apontam que a adoção BES-CFD é recente nos estudos, mas pode ser uma opção precisa e efetiva para investigações acerca da eficiência energética e do conforto térmico em edificações que façam uso da ventilação natural.

A Tabela 9 sintetiza as características, potencialidades e limitações peculiares de cada método de avaliação e/ou estimativa da ventilação natural (CHEN, 2009; CHEN et al., 2010; BLOCKEN, 2014; SAKIYAMA et al., 2020). Quanto à aplicação destes métodos para avaliação de edificações altas, Omrani et al. (2017), apresentam algumas informações adicionais como a limitação dos métodos empíricos para estas tipologias, o aumento da demanda de

³² Do inglês, *air changes per hour*.

³³ São também referenciadas em algumas publicações como técnicas, ferramentas ou modelos.

tempo computacional dos modelos multizonas, a necessidade da definição de maiores domínios computacionais e da indicação da camada limite atmosférica dentre as definições das condições de contorno nas simulações CFD. Para estudos experimentais, indicam a requisição de modelos em maiores escalas e da definição de camada limite com auxílio de elementos de rugosidade, para ensaios em túnel de vento e a impossibilidade de execução de uma avaliação em escala real desta tipologia em laboratórios.

Na sequência, uma explanação mais detalhada é restrita ao método selecionado para a resolução da problemática do trabalho em questão, o experimental em escala reduzida. Logo, são apresentados os critérios de semelhança que devem ser atendidos para a elaboração e utilização de modelos reduzidos e, em seguida, apresentam-se as ferramentas metodológicas selecionadas: (1) Mesa d'água e; (2) Túnel de vento.

2.2.4.1 Modelos reduzidos: critérios de semelhança

Adotam-se estudos experimentais sempre que o comportamento do fluido não for possível de ser determinado a partir de modelos teóricos ou quando um modelo matemático precisa ser verificado (BLESSMANN, 1983). As avaliações experimentais podem ser realizadas em escala real ou reduzida. Etheridge (2012) reforça que embora informações provenientes de análises em escala real sejam desejáveis, a obtenção de dados de alta qualidade torna esta opção realmente custosa.

Desta forma, avaliações experimentais de modelo reduzido em túneis de vento embasam grande parte do conhecimento científico adquirido e disponível sobre a ação dos ventos no ambiente construído. No entanto, para que as informações (quantitativas e/ou qualitativas) obtidas possam ser adotadas, é essencial que condições de semelhança entre os sistemas real (protótipo) e o experimental (modelo físico) sejam asseguradas, sendo estas de ordem (1) geométrica; (2) cinemática e; (3) dinâmica.

De acordo com Blessmann (1983), a **semelhança geométrica** consiste em uma reprodução reduzida fidedigna do modelo real, atentando-se aos detalhes, à escala e à orientação em relação ao escoamento incidente. A **cinemática** garante que a caracterização do perfil de vento seja coerente entre os sistemas analisados, ou seja, a distribuição de velocidade média e a caracterização da turbulência. E, por fim, a **dinâmica**, que os escoamentos apresentem forças proporcionais, sendo representada pela igualdade no Número de *Reynolds*³⁴.

No presente trabalho, modelos em escala reduzida foram utilizados em dois momentos distintos e em diferentes ferramentas, mesa d'água e túnel de vento, descritas na sequência.

³⁴ Blessmann (1983) enfatiza que as forças de viscosidade, pressão, gravidade e inércia são as atuantes em um escoamento. No entanto, para casos aerodinâmicos de avaliação de fluidos incompressíveis, o autor reforça que as forças de gravidade não apresentam significativa influência e, as de pressão, apoiando-se em uma citação de Kármán, conclui-se que são de “reação passiva”. Desta forma, restam-se as de viscosidade e de inércia, relacionadas a partir da relação de *Reynolds*.

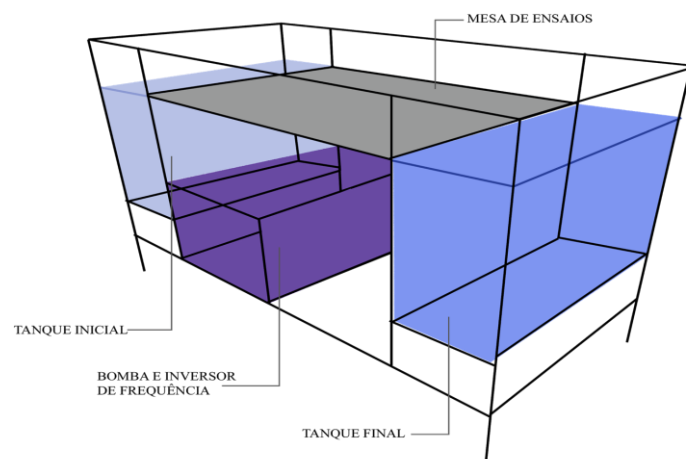
Tabela 9: Características, vantagens e limitações dos modelos de estimativa e/ou avaliação do desempenho de estratégias de ventilação natural.

CARACTERÍSTICAS		VANTAGENS	LIMITAÇÕES	
MÉTODOS SIMPLIFICADOS	Analíticos	<ul style="list-style-type: none"> Derivados de equações fundamentais da fluidodinâmica e da transferência de calor; Modelos analíticos são provavelmente o mais antigo método de predição de ventilação natural; Usam simplificações na geometria e nas condições de contorno. 	<ul style="list-style-type: none"> Simplicidade; Rico significado físico; Resolução de problemas simples, rápida estimativa; Baixa demanda computacional. 	<ul style="list-style-type: none"> São dependentes do caso utilizado em seu desenvolvimento.
	Empíricos	<ul style="list-style-type: none"> Derivados de equações fundamentais da fluidodinâmica e da transferência de calor; Os modelos empíricos usam mais aproximações que os analíticos. Modelos empíricos podem ser desenvolvidos a partir de dados oriundos de simulações computacionais ou análises experimentais. 		<ul style="list-style-type: none"> São dependentes do caso utilizado em seu desenvolvimento. Devem ser utilizados respeitando seus limites de aplicabilidade.
MÉTODOS EXPERIMENTAIS	Experimentais em escala reduzida	<ul style="list-style-type: none"> Usam técnicas de medição para a predição ou para a avaliação do desempenho da ventilação natural a partir de modelos reduzidos. 	<ul style="list-style-type: none"> Predição realista; São amplamente aplicados para validar casos analíticos, empíricos e numéricos; São mais viáveis economicamente que medições em modelos em escala real. 	<ul style="list-style-type: none"> Questões relacionadas à escala dos modelos reduzidos podem ser aspectos limitantes quando geometrias complexas são consideradas. Demandam de caracterização precisa do modelo reduzido, o que pode implicar em uma alta demanda de tempo, de equipamentos e, de profissionais especializados.
	Experimentais em escala real	<ul style="list-style-type: none"> Usam técnicas de medição para a predição ou para a avaliação do desempenho da ventilação natural em modelos de escala real ou edificações semelhantes (experimentos em laboratórios/ medições <i>in loco</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> Predição mais realista; São amplamente aplicados para validar casos analíticos, empíricos e numéricos; Não apresentam limitações em relação à escala como nos modelos reduzidos. 	<ul style="list-style-type: none"> Os equipamentos de medição necessitam de constante calibração; Experimentos custosos e demorados.
MÉTODOS NUMÉRICOS	Multizonas	<ul style="list-style-type: none"> São utilizados para prever taxas de trocas de ar e distribuição do fluxo de ar nas edificações com ou sem sistemas de ventilação mecânicos; Calculam o fluxo de ar ou o transporte de poluentes entre zonas da edificação ou entre as zonas e o ambiente externo; Assumem uniforme a temperatura do ar nas zonas analisadas. 	<ul style="list-style-type: none"> Ferramentas para o cálculo do fluxo de ar em médias e grandes edificações com ou sem sistemas de ventilação mecânicos; São utilizados para o cálculo da demanda energética, eficiência da ventilação, transporte de poluentes ou controle de fumaça. 	<ul style="list-style-type: none"> Não são muito precisos nos resultados atribuídos a cada zona; Normalmente, interface pouco amigável para a inserção de dados; Normalmente, não têm uma forma gráfica de apresentação dos resultados.
	Zonais	<ul style="list-style-type: none"> São desenvolvidos a partir de dados medidos ou de equações de balanço de massa e energia; São utilizados para resolver a limitação dos modelos multizona que consideram a temperatura uniforme do ar na zona analisada. 	<ul style="list-style-type: none"> A temperatura do ar é calculada para cada célula e mostra a distribuição não uniforme do ar. 	<ul style="list-style-type: none"> Não resolvem equações dinâmicas para tentar minimizar tempo e demanda computacional; Não é tão significativa a diferença de tempo em relação aos programas de simulação computacional fluidodinâmica.
	Dinâmica dos fluidos computacionais (CFD)	<ul style="list-style-type: none"> 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. 	<ul style="list-style-type: none"> São amplamente utilizados no estudo da qualidade do ar, conforto térmico, entre outros. As ferramentas CFD consistem no mais preciso dos métodos numéricos. 	<ul style="list-style-type: none"> Demandam que o usuário tenha uma boa base de mecânica dos fluidos; Simulações CFD demandam validação a partir de dados experimentais; Não substituem modelos de predição experimentais; Demandam tempo e computadores de alta performance.

Fonte: Elaborado pela Autora (2021) a partir das referências consultadas (CHEN, 2009; CHEN et al., 2010; BLOCKEN, 2014; SAKIYAMA et al., 2020).

2.2.4.2 Modelos experimentais em escala reduzida – Mesa d'água

Figura 9: Diagrama ilustrativo da mesa d'água.



A mesa d'água é um equipamento dotado de dois tanques interligados por uma base plana em que o modelo bidimensional em escala reduzida é disposto para análise. A partir da passagem de água acrescida de um indicador de um tanque para outro (auxiliada por bombas e um sistema elétrico) é possível emular visualizações do comportamento e distribuição do fluxo de ar no interior e no exterior do modelo (Figura 9).

Fonte: Acervo próprio (2018)³⁵.

É historicamente conhecida a transposição de informações e de conhecimentos de análises experimentais realizadas com água para o entendimento de problemas com ar. De acordo com Blessmann (1983), a água e o ar se comportam, sempre que não houver separação da camada limite, como fluidos próximos ao denominado de fluido ideal (incompressível e sem viscosidade para o ar e para os líquidos, somam-se as características de sem tensão superficial e sem vaporização). Logo, apresentam resultados semelhantes e passíveis de comparações.

No entanto, uma ressalva é válida: em ensaios em mesa d'água, usualmente, é acrescido um indicador ao líquido, como por exemplo o detergente, para auxiliar a visualização da distribuição do fluxo de ar interno, ao intensificar o contraste. Esse elemento adicional ao sistema pode perturbar as relações análogas asseguradas pelo conceito de fluidos ideais. Diante deste pressuposto, Rossi et al. (2021)³⁶, aferiram os valores de massa específica e viscosidade de diferentes concentrações da solução de água com detergente e constataram que embora o agente surfactante altere significativamente os valores de viscosidade das soluções, este pouco impacta nos valores de massa específica.

É crescente a bibliografia acerca do uso da mesa d'água para investigações de ventilação natural no ambiente construído (TOLEDO; PEREIRA, 2003; TOLEDO; PEREIRA, 2005; ACCIOLY; OLIVEIRA; BITTENCOURT, 2016; RAMOS; MATTIA; LUKIANTCHUKI, 2017; ROSSI et al., 2019a; XAVIER et al., 2020; MUNDHE et al., 2018; MUNDHE; DAMLE, 2020; ALMEIDA et al., 2020). Em quase sua totalidade, os estudos se baseiam em análises qualitativas para fins didático-pedagógico em disciplinas de Conforto Ambiental; na investigação do desempenho de estratégias adotadas; no auxílio à tomada de decisões, sendo seus resultados confrontados em algumas situações a ferramentas numéricas robustas como as simulações fluidodinâmicas. Mundhe e Damle (2020), distinguem-se deste padrão ao utilizarem ensaios em mesa d'água para delinear uma metodologia de quantificação do fluxo de ar de edificações naturalmente ventiladas.

Em ensaios em mesa d'água, o modelo reduzido deve atender aos critérios de semelhança geométrica, além de ser elaborado em material resistente e impermeável. Toledo e Pereira (2003) atentam que a escala deste modelo deve considerar às limitações da área de ensaio, de modo que as paredes laterais não influenciem no escoamento resultante. Quanto à caracterização do escoamento, este é uniforme e de baixa velocidade. Desta forma

³⁵ Ilustração elaborada pela aluna de iniciação científica Fernanda Itkes.

³⁶ ROSSI, M. M.; CHVATAL, K.M.S; MATTIA, P. H.; SHIMOMURA, A. R. P. **Artigo em desenvolvimento**. 2021.

essas características, potencializadas pela adição do indicador, permitem a visualização das linhas de corrente no interior do modelo analisado, assim como em seu entorno imediato.

As análises destes ensaios são possibilitadas através da captura de fotografias e vídeos. De acordo com Accioly, Oliveira e Bittencourt (2016), a elaboração de vídeos é de extrema importância para que não haja interpretações incoerentes ou imprecisas do fluxo de ar decorrentes do registro de um instante específico. A qualidade dos produtos dos ensaios qualitativos é determinante para o delineamento das conclusões alcançadas. Custódio (2021)³⁷ investiga, através de pré-testes, o impacto nas visualizações consequentes da utilização de diferentes traçadores, concentrações da solução e velocidades do escoamento, para fins de aprimoramento do contraste em seus ensaios e, conseqüentemente, da qualidade das visualizações obtidas.

Toledo e Pereira (2003) sintetizam as vantagens e limitações da ferramenta. As primeiras consistem: (a) no baixo custo de aquisição; (b) na baixa demanda de espaço físico; (c) na facilidade de operação e de 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 do ar. Em contraponto, as segundas se resumem em: (a) análises bidimensionais de um fenômeno que é estritamente tridimensional; (b) possibilidade de avaliações somente por ação os ventos e; (c) impedimento de medições quantitativas das grandezas aerodinâmicas (velocidade e pressão) (TOLEDO; PEREIRA, 2003).

2.2.4.3 Modelos experimentais em escala reduzida – Túnel de vento

Ensaio em túneis de vento estão entre os métodos mais robustos para o estudo do comportamento da ventilação natural no ambiente construído. Dados obtidos, por meio desta ferramenta, embasam grande parte do conhecimento científico produzido acerca da ação dos ventos em edificações, de problemas de ventilação natural no ambiente construído (nas escalas da edificação ou do urbano) ou de estabilidade das estruturas (TOLEDO, 1999). Além disso, são fontes utilizadas para a validação de modelos teóricos ou numéricos (ETHERIDGE, 2012).

Nos anos de 1890, registram-se as primeiras investigações acerca das pressões de vento em edificações, lideradas por W.C. Kernot na Austrália e J.O.V. Irminger na Dinamarca. Neste contexto, os túneis de vento eram utilizados, prioritariamente, para estudos voltados à aeronáutica, logo reproduziam escoamentos uniformes e de baixa turbulência. A partir da formulação de Jansen em 1958³⁸, esforços para a adoção de uma camada limite turbulenta escalonada de acordo com o perfil de velocidades passa a ser uma requisição nos ensaios de edificações (AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977).

Os túneis de vento de camada limite atmosférica de circuito aberto são caracterizados por seções de ensaios, usualmente, dotadas de significativos comprimentos. Em uma de suas extremidades são dispostos um ou mais ventiladores axiais e na outra, grelhas ou telas que têm como principal função conferir um escoamento mais uniforme ao vento que é succionado do ambiente externo para o interior da seção.

³⁷ CÚSTODIO, M.I.P. **Análise do potencial de ventilação natural**: ensaios em mesa d'água e simulações CFD. Dissertação de Mestrado em andamento. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

³⁸ "The correct model test for phenomena in the wind must be carried out in a turbulence boundary layer and the model-law requires that this boundary layer be to scale as regards to velocity profile" (AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977, p. 35)

A simulação do vento natural sempre foi um aspecto desafiante em análises experimentais. Usualmente, utilizam-se de grelhas, telas, barreiras casteladas, pináculos (*spires*) e elementos de rugosidades fixados no piso do túnel a fim de reproduzir a camada limite atmosférica desejada. O perfil de velocidades de vento decorrente da caracterização desta camada limite pode ser aferido a partir da disposição de *tubo de Pitot* ou de anemômetro de fio quente a diferentes alturas em local de escoamento não perturbado.

A velocidade a ser considerada nos ensaios é função do tipo de ensaio e das variáveis desejadas. Em ensaios para a determinação ou a verificação da estabilidade de estruturas, simulam-se situações crítica de vento, no entanto para problemas de ventilação natural em edificações, avalia-se o vento médio (TOLEDO, 1999). Outras questões dependentes do problema estudado consistem no tipo de ensaio, que pode ser qualitativo (ensaio de fumaça ou de erosão) ou quantitativo (aferição de grandezas aerodinâmicas como pressão e velocidade) e, na materialidade do modelo reduzido (acrílico, MDF, compensado, gesso). O material utilizado deve ser de fácil manuseio para a instalação dos sensores e da fixação da maquete no piso do túnel (MATSUMOTO; LABAKI; CARAM, 2011).

As vantagens e limitações deste tipo de experimentação estão citados na Tabela 9. A escala do modelo pode se configurar em uma barreira na avaliação do fenômeno em casos de geometrias complexas (CHEN, 2009). Diante disto, Toledo (1999) afirma que o modelo deve ser elaborado no maior tamanho que for compatível com a seção de ensaio, sendo que a relação entre as áreas de sua máxima de projeção e da seção transversal do túnel não deve exceder a 5%.

Para ensaios cujo objetivo é mensurar a pressão exercida pelo vento nas superfícies do modelo, é previamente estabelecida uma malha de tomadas de pressão. Estas tomadas são conectadas com auxílio de tubos flexíveis 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 garante o conhecimento dos valores de pressão em cada ponto. A aferição da pressão dinâmica do fluxo de ar é realizada a partir do *tubo de Pitot* que deve estar posicionado em local de fluxo 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 (C_p) nas superfícies do modelo são determinados.

2.3 USO CONJUGADO DAS ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL E SOMBREAMENTO DAS EDIFICAÇÕES

A combinação do sombreamento das aberturas e da ventilação natural pode representar uma efetiva estratégia projetual em edificações localizadas em climas quentes e úmidos, ao auxiliar na manutenção dos níveis adequados de conforto térmico aos usuários sem, necessariamente, recorrer ao condicionamento mecânico (CÂNDIDO et al., 2010).

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, principalmente nas translúcidas ou transparentes. Holanda (1976) reforça que, nos trópicos, a adoção de sombreamento nas aberturas é imprescindível por estas razões já conhecidas, mas também por garantir benefícios econômicos quando se compara o custo inicial de instalação aos de operação ao longo do ciclo de vida da edificação.

Devido à 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, 2005). As varandas características das casas

de senhores de engenho nordestinos é um exemplar da adaptação da Arquitetura Portuguesa ao ensolarado clima brasileiro (BITTENCOURT, 2004).

Modificações no desenho das janelas também acompanharam os avanços tecnológicos, o que justifica a 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; MOURA, 2011). 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, 2005). O *brise-soleil* (quebra-sóis), idealizado por Le Corbusier, tinha esta como sua principal funcionalidade e foi fortemente incorporado pela arquitetura brasileira desta época (BRUAND, 2005).

Denomina-se dispositivos de sombreamento ou de proteção solar todos os elementos arquitetônicos que têm como principal funcionalidade a proteção do ambiente contra a radiação solar indesejada. Frota (2004) lista alguns conhecidos: varanda, marquise, sacada, *brise-soleil* (horizontal, vertical ou combinado), telas, toldos, pérgulas, elementos vazados, cortinas e persianas.

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 (OLGYAY & OLGAYAY, 1957; GIVONI, 1976; FROTA, 2004; VIANNA; GONÇALVES; MOURA, 2011; OLGAYAY, 1998; LECHNER, 2009; DAVID et al., 2011; BELLIA; DE FALCO; MINICHIELLO, 2013; FREEWAN, 2014).

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). 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; GIVONI, 1976; OLGAYAY, 1998). Cuidados quanto à materialidade e ao acabamento superficial (cor, brilho e textura) dos elementos externos também devem ser considerados para evitar ganhos demasiados por condução, sobreaquecimento das peças, ofuscamentos prejudiciais aos ambientes internos e externos. 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 abóbada 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 eficácia 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 ao exterior do ambiente analisado 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 nas vedações das aberturas resulta em um sistema termicamente frágil, devido à sua

baixa resistência térmica. Deste modo, para que a resolução da problemática do calor seja efetiva em climas quentes e úmidos, é primordial o uso conjugado de sombreamento das aberturas e da ventilação natural³⁹, uma vez que esta última tem significativa influência nas cargas de aquecimento e resfriamento de edificações e, conseqüentemente, no seu desempenho térmico (BRUAND, 2005; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008; CÂNDIDO et al., 2010). No entanto, Allard (2002) alerta que qualquer obstrução (interna ou externa) pode representar uma barreira ao fluxo de ar, logo os projetistas devem avaliar de forma conjunta as estratégias de sombreamento e ventilação natural. O autor ainda indica que estas estratégias podem, em determinadas situações, coexistir e até incrementar o diferencial de pressão e, assim, intensificar o potencial de ventilação natural.

Desta forma, buscou-se mapear na literatura científica⁴⁰ trabalhos que investigaram o impacto na ventilação natural de detalhamentos presente nas fachadas das edificações, restringindo-se (tanto na busca quanto na leitura) aos exemplares que discutissem ventilação cruzada e fenômenos semelhantes aos investigados neste trabalho. Portanto, a literatura referente à dupla⁴¹ pele foi desconsiderada. Assim, foram verificados trabalhos que investigaram a integração de elementos arquitetônicos junto às fachadas e às janelas, tais como: dispositivos de sombreamento (CHAND; KRISHAK, 1971; STATHOPOULOS; ZHU, 1988; BITTENCOURT; BIANA; CRUZ, 1995; ROFAIL; KWOI, 1999; PRIANTO; DEPECKER, 2002; HIEN; ISTIADJI, 2003; HILDEBRAND, 2012; KIRIMTAT et al., 2016; VETTORAZZI et al., 2016; ACCIOLY; OLIVEIRA; BITTENCOURT, 2016; BACICHETTI; CARDOSO; SARDEIRO, 2016; CASTAÑO, 2017; DE QUADROS; ORDENES, 2017; LIN; XIAO; ZHAN, 2017; ELSHAFEI et al., 2017; MACIEL et al., 2017; MATHAN KANNAN; NAGARAJAN; DHANALAKSHMI, 2018; SUN et al., 2018; BAYRAKTAR; OK, 2019), sacadas (CHAND, BHARGAVA; KRISHAK, 1998; AI et al., 2011; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013; OMRANI et al., 2017; KOTANI; YAMANAKA, 2017; LOCHE et al., 2020) e grelhas de ventilação (CHANDRASHEKARAN, 2010; TABLADA et al., 2009; LEE et al., 2015; SACHT et al., 2016; KOSUTOVA et al., 2019; JIANG et al., 2019; ZHENG; TAO; LI, 2020; ZHENG; TAO; LI, 2019, 2020b) sendo os mais relevantes, à contextualização ao presente estudo, detalhados na sequência.

Bittencourt, Biana e Cruz (1995) realizaram análises paramétricas, auxiliadas por um *software* CFD, para verificar a influência de protetores solares externos (horizontais e verticais) na eficácia da ventilação natural em uma sala de aula padrão (com dimensões de 6,0 m x 6,0 m x 3,0 m de pé-direito) e com duas aberturas em faces opostas, sendo uma delas superior. A partir de análises de modelo em planta (avaliações de protetores verticais) e em corte longitudinal (de protetores horizontais), avaliou-se o efeito combinado da profundidade (variando de 1,2 m a 0,3 m) e do espaçamento entre os protetores (de 1,2 m a 0,2 m, para os horizontais e de 1,5 m a 0,5 m, dos verticais). A incidência do vento considerada nas simulações foi a oblíqua (45°) e a velocidade média de 3 m/s. Os resultados qualitativos (em planta e em corte) demonstraram que, para uma mesma máscara de sombra, protetores solares com menor profundidade e espaçamento entre os elementos são mais eficientes. 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. Quanto ao aumento da profundidade dos elementos, notou-se uma baixa influência deste parâmetro no comportamento de distribuição do fluxo, mas com potencial de redução da velocidade do ar.

³⁹ Em situações que a temperatura externa é inferior à temperatura interna.

⁴⁰ Utilizou-se de diferentes combinações das palavras-chave deste trabalho (“*natural ventilation*”; “*natural ventilation*” and “*wind tunnel*”; “*natural ventilation*” and “*wind tunnel*” and “*wind pressure coefficient*”; “*natural ventilation*” and “*wind tunnel*” and “*wind pressure coefficient*” and “*shading device*”; “*natural ventilation*” and “*shading device*” e, por fim, “*natural ventilation*” and “*wind tunnel*” and “*shading device*”) para a identificação em bases nacionais e internacionais de trabalhos semelhantes a este, restringindo a leitura aos redigidos em português ou língua inglesa.

⁴¹ Do inglês, *Double skin*.

Vettorazzi et al. (2016) focaram no desenvolvimento de um dispositivo de sombreamento complementar às janelas, o Filtro Sol – Ar, que proporcionasse o incremento da eficiência energética da edificação. O dispositivo caracterizado por formato em “L”, projetado à frente da fachada da edificação e com entrada de ar possibilitada por venezianas móveis locadas acima da abertura, garantiu, a partir da variação do comprimento do seu componente horizontal, uma redução média de 36,06% do ganho solar para diferentes latitudes do território brasileiro (de 5°N a 32,5°S). Simulações computacionais auxiliadas pelos *softwares Revit 2016 e Flow Design, Daylight Visualizer 2.8.4 e Design Bluider 4.2* compararam situações com e sem o Filtro Sol-Ar e comprovaram a contribuição deste elemento arquitetônico nas condições de radiação solar e de iluminação e ventilação naturais. 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: um ambiente com e sem Filtro Sol-Ar, ambos com a janela fechada. A partir destas simulações, observou-se o comportamento da distribuição do fluxo interno ocasionado por uma incidência de vento normal à janela e com velocidade média de 15 m/s.

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 m²; 1,6 m² e 2,0 m²) e, (b) do muro externo (caso com e sem varanda) na distribuição de pressão (C_p), nas temperaturas internas e nos níveis de conforto térmico nos ambientes de maior permanência (sala-cozinha e dormitórios) de uma habitação brasileira térrea (de aproximadamente 54 m²) naturalmente ventilada e, localizada em clima predominantemente quente e úmido (Natal/ Rio Grande do Norte). Todas as variações foram analisadas para a edificação em duas orientações: Norte-Sul (N1) e Leste-Oeste (N2). As avaliações ocorreram a partir de simulações computacionais no *software EnergyPlus* (módulo *AirflowNetwork*) em que os coeficientes de pressão, obtidos de ensaios em túnel de vento, foram inseridos manualmente. As principais conclusões foram sintetizadas na Figura 10. Devido à baixa influência dos tamanhos das janelas nos coeficientes médios de pressão (C_p), deduzidos a partir das tomadas localizadas na região da janela, as análises foram conduzidas tendo como base a abertura intermediária (1,6 m²). Quanto aos dispositivos de sombreamento, estes indicaram impactos significativos em todas as variáveis observadas (C_p, temperaturas internas e níveis de conforto térmico). O dispositivo horizontal básico e a varanda reduziram os valores de sobrepressão e de sucção e, apresentaram um decréscimo em torno de 25% nas taxas de renovação de ar por hora, culminando na elevação das temperaturas internas no período noturno. A adoção destes elementos sempre reduziu o desconforto total da edificação ao longo do ano, independente da orientação. Para o dispositivo horizontal afastado, os efeitos foram semelhantes às tipologias anteriores, exceto para orientação N2. O uso de venezianas aumentou os valores de sobrepressão e de sucção para a maioria dos ângulos de incidência, traduzindo aumentos nas taxas de renovações e reduções (em determinados horários) das temperaturas internas no período noturno, apresentando o melhor desempenho térmico dentre as tipologias avaliadas. O dispositivo tipo “L” foi avaliado apenas para a orientação N1 devido à sua assimetria e resultou na redução das taxas de renovação de ar por hora em alguns ambientes e no incremento em outros. Sempre reduziu o desconforto total ao longo do ano. Por fim, os muros apresentaram os maiores impactos dentre as tipologias avaliadas. A adoção deste elemento arquitetônico submeteu todas as faces da edificação a situações de sucção, diminuindo as taxas de renovação de ar em 50% (caso com muro) e 75% (caso com muro e varanda).

Figura 10: 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
↓ Sobrepessão	↑ Sobrepessão	↓ Sucção	↑ Sucção
			↓ Inversão da sobrepessão

Fonte: Castaño (2017).

De Quadros e Ordenes (2017) avaliaram o impacto de brises na ventilação natural de uma enfermaria em Florianópolis (Santa Catarina, Brasil), a partir de uma avaliação integrada de simulações computacionais (*EnergyPlus e Phoenix*) usando modelos de rede (para análise de ganhos de calor pela janela e quantificação de trocas de ar) e CFD (para observação da distribuição da velocidade do ar interno). A enfermaria avaliada apresentou área útil de 208 m² e pé direito de 2,8 m, com aberturas nas orientações norte, leste e oeste. Os brises verticais e horizontais de 0,8 m de profundidade foram colocados em todas as janelas. Desta forma, dois exemplares foram simulados (caso base, sem brises, e caso com brises) para os dias 4 e 15 de janeiro, devido às altas temperaturas e velocidades de vento mais expressivas. Em síntese, os resultados indicam que a adoção de brises aumentou a velocidade de entrada do ar e, conseqüentemente, promove o incremento da velocidade média do ar interno (cerca de 20%). Além disso, os brises direcionam o fluxo de ar para o interior da edificação ao aumentarem o diferencial de pressão entre as entradas e saídas de ar. A média das trocas de ar calculadas pelo modelo de rede foi de 27 e 38 renovações de ar por hora nos dias 4 e 15, respectivamente. Os resultados das simulações CFD complementaram as informações através do entendimento da distribuição da velocidade do ar interno plotadas em um plano

horizontal localizado a 0,9 m do piso (altura de uma pessoa deitada) e um vertical, ao centro da enfermaria. Ademais, estes resultados compensarem as limitações do modelo de rede ao não considerar o impacto dos dispositivos de sombreamento no fluxo de ar interno.

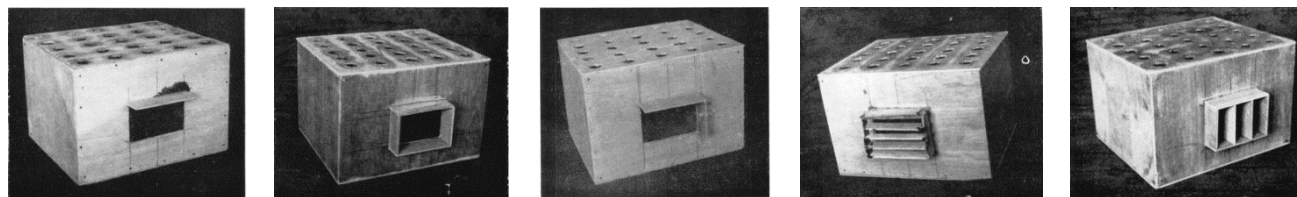
Accioly, Oliveira e Bittencout (2016) estudaram, a partir de ensaios qualitativos em mesa d'água, a influência do formato de quatro⁴² tipologias de prateleira de luz (superfície plana, plana com curvatura na extremidade externa, plana com curvatura na extremidade interna e, plana com curvaturas em ambas as extremidades) na captação e na distribuição do ar no interior de um modelo reduzido. O modelo fazia referência a um ambiente de dimensões de 3,0 m x 3,0 m x 2,7 m de pé direito e com duas aberturas (de 1,2 m x 1,0 m e peitoril de 1,1 m) dispostas em faces opostas. No total foram realizados oito ensaios. Devido à variação na caracterização das janelas de entrada (podendo estar somente a inferior ou ambas abertas, superior e inferior) foram computados dois ensaios por tipologia de prateleira. Os resultados indicaram que a tipologia plana com curvas em ambas as extremidades apresentou o melhor potencial (para ventilação e iluminação, simultaneamente), podendo estar com janela superior aberta ou fechada dependendo da necessidade do ambiente.

Bacicheti, Cardoso e Sardeiro (2016) observaram o impacto, a partir de ferramentas simplificadas como os *softwares* Luz do Sol 1.1 e FluxoVento, da adoção de brises horizontais de 0,6 m na iluminação e na ventilação naturais em uma sala de aula, da Universidade Estadual de Maringá, com ventilação cruzada possibilitada por portas ou por uma abertura superior localizadas em face oposta à abertura externa. Quanto à ventilação natural, os resultados do FluxoVento indicaram que, ao adicionar o dispositivo de sombreamento à abertura externa, a ventilação cruzada ocorreu no nível próximo a laje, auxiliando na dissipação do calor quando janela a superior foi mantida aberta. Na situação em que as portas estavam abertas, o fluxo de ar foi direcionado ao usuário.

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) (Figura 11) na velocidade do ar no interior de um modelo reduzido (30 cm x 25 cm x 20 cm) confeccionado na escala de 1:15 e com aberturas (equivalentes a 10% da área do piso) dispostas em faces opostas. As aferições foram realizadas por meio de 25 pontos distribuídos em três planos passando pelo 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 comparados aos dados do modelo de referência (sem a presença de dispositivos). A inclusão de um dispositivo de proteção horizontal logo acima da abertura acarretou o aumento do movimento de ar nos níveis mais elevados da abertura e em um decréscimo 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 em situações oblíquas. 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 em situações de incidência perpendicularmente à fachada, houve aumento desta variável nos níveis superiores para a opção com aletas horizontais.

⁴² Segundo os autores, duas destas tipologias foram, previamente, propostas e estudadas por Taufner, Maioli e Alvarez (2014) acerca do seu impacto na distribuição de iluminação natural em um ambiente.

Figura 11: Análise da influência de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento na velocidade média do ar.



Fonte: Chand e Krishak (1971).

Mathan Kannan; Nagarajan e Dhanalakshmi (2018) investigaram a influência, por meio de simulações fluidodinâmicas, na distribuição do fluxo de ar interno, na sua velocidade e na taxa de renovação de ar, da adição de um dispositivo de sombreamento externo horizontal de concreto aliado a diferentes tipologias de janelas. O tipo e as dimensões do dispositivo de sombreamento permaneceram fixas em todas as simulações, sendo este horizontal, com 0,6 m de profundidade e com 0,23 m ultrapassando cada lado da abertura. A área total de aberturas (de entrada e de saída), dispostas em faces opostas do ambiente analisado (sala de estar) corresponderam a 30% da área do piso. A velocidade externa do vento considerada foi de 7 m/s, com incidência normal ao plano da abertura. Para fins de avaliar o impacto do dispositivo de sombreamento, três tipologias de janela foram simuladas com e sem a sua presença (a barlavento e a sotavento), foram elas: janela de abrir com múltiplas folhas, veneziana e de correr, com áreas efetivas de abertura correspondente a 84%, 78% e 54%, respectivamente. De modo geral, as conclusões indicaram que os dispositivos de sombreamento reduzem os valores médios da velocidade interna do ar. Na janela de abrir com múltiplas folhas, a adição do sombreamento promoveu um decréscimo na velocidade média de 2,94 m/s para 2,64 m/s. Nas venezianas, esta migrou de 2,45 m/s para 2,27 m/s e, por fim, nas de correr, a velocidade média passou de 2,85 m/s para 2,57 m/s.

Prianto e Depecker (2002) investigaram o efeito combinado de alguns elementos arquitetônicos (configurações de sacadas, tipos de abertura e presença de divisões internas) na velocidade do ar⁴³ 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* N3S⁴⁴. Foram simuladas 46 configurações que combinaram de diferentes formas os elementos arquitetônicos analisados. Os resultados apontaram grande influência na velocidade interna do ar proporcionada por estes elementos e a possibilidade de incremento desta variável ao priorizar combinações que favoreciam, por exemplo, o Efeito Venturi⁴⁵.

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 dispositivos de sombreamento. O desempenho lumínico (intensidade, distribuição da luz e ofuscamento) e da ventilação natural (velocidade interna e distribuição do fluxo de ar) foram avaliados a partir de simulações nos *softwares* LIGHTSCAPE e PHOENICS (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

⁴³ Expressa por um coeficiente médio que correlaciona as velocidades em planos horizontais a 1,0 m e 1,5 m, para caracterizar situações de pessoas sentadas ou em pé, com as velocidades externas a mesma altura.

⁴⁴ 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 fluidos.

⁴⁵ Este efeito, teorizado por Giovanni Venturi no século XIX, baseia-se na Equação de Bernoulli e foi demonstrado a partir de uma experimentação em um tubo, dotado de expansões e contrações. Observou-se que em um escoamento de um fluido incompressível a sua pressão aumenta com o decréscimo de sua velocidade. Na aerodinâmica das construções, este fenômeno pode ser observado, por exemplo, em ambientes dotados com aberturas de entrada e saída de diferentes áreas ou em passagens de pedestres localizadas entre prédios altos (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008).

apartamento avaliado. Já a segunda etapa foi caracterizada por simulações de seis tipologias de protetores solares para dois momentos pré-determinados. As principais conclusões deste estudo foram: (a) de modo geral, todas tipologias avaliadas causam redução (de pequena ordem) na velocidade interna do ar; (b) para a situação sem dispositivos, a janela de abrir com suas folhas totalmente abertas acelerou o fluxo de ar na entrada e por fim; (c) a falta de efetividade de elementos de sombreamento verticais em aprimorar a ventilação e a iluminação naturais. No caso da ventilação natural, principalmente, por se constituírem como barreiras ao vento incidente em orientações oblíquas.

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 de uma sala de aula (de 4,25 m x 4,5 m x 2,9 m, com aberturas idênticas e dispostas em faces opostas). Ensaios em túnel de vento foram conduzidos para um modelo reduzido na escala de 1:8. Foram examinadas duas tipologias de sombreamento externos (tela perfurada e veneziana externa) e três tipos de esquadrias (basculante, de abrir e guilhotina). As avaliações experimentais (qualitativas e quantitativas⁴⁶) embasaram o estudo individual e combinado 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.

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. Devida à expressiva utilização do condicionamento artificial em edificações, apenas dois estudos⁴⁷ (HIEN; ISTIADJI, 2003; VAN MOESEKE; BRUYÈRE; DE HERDE, 2007) englobado por esta revisão abordaram 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.

Lin; Xiao e Zhan (2017) através de aferições *in loco* (de temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e temperaturas superficiais do vidro e do brise de alumínio) e simulações fluidodinâmicas avaliaram o impacto de um sistema dinâmico de brises, nas temperaturas internas e na ventilação natural, em uma edificação comercial de dois andares em Guangzhou, China para um dia típico de verão. Os autores concluíram que a adoção de dispositivos de sombreamento externo pode reduzir a temperatura interna da edificação mas também a velocidade do ar no seu interior.

Sun et al. (2018) utilizaram uma edificação retangular de salas de aulas e laboratórios, com área total de 9680 m² e altura de 23,85 m de uma universidade de Jinan na Província de Shandong para avaliar, por meio de simulações computacionais (*DesignBuilder e Phoenix*), o impacto da adição de elementos de sombreamento na iluminação natural, ventilação e na economia de energia em regiões frias. Desta forma, os dispositivos de sombreamento externos foram projetados para as orientações sul (elementos horizontais fixos), leste e oeste (plano de aletas horizontais móveis

⁴⁶ As análises quantitativas foram realizadas com auxílios de anemômetros distribuídos em um plano horizontal a 1,1m e três verticais a 0,1 m; 0,6 m e 1,7 m. As qualitativas, por meio de ensaios de fumaça.

⁴⁷ Outros estudos, citados na tabela-resumo elaborada pelos autores que consideram a ventilação natural ou fizeram uso de *softwares* CFD, por exemplo, fazem referência a avaliações de edificações com dupla pele, parede trombe ou bio fachadas, portanto foram desconsiderados.

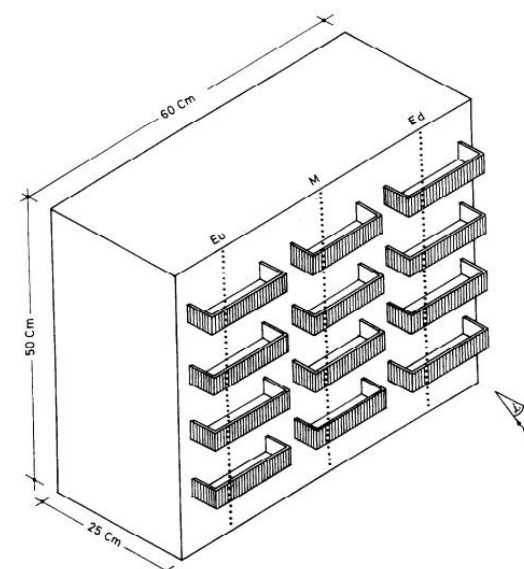
posicionadas a 0,3 m das aberturas externas) e avaliados. Os resultados indicaram que as temperaturas internas e os níveis de conforto podem ser favorecidos, assim como uma redução do consumo energético em razão da diminuição da demanda do condicionamento artificial.

Bayraktar e Ok (2019) observaram o impacto de tipologias de dispositivos de sombreamento externos na sensação térmica dos usuários em diferentes locais de um escritório naturalmente ventilado em condições de verão na Turquia. O escritório de 4,5 m x 4,1 m x 3,7 m com janelas em faces opostas de 4,1 m x 1,8 m e 4,1 m x 0,5 m foi avaliado para situação perpendicular de incidência de vento e com quatro possibilidades de dispositivos de sombreamento alocados na janela a barlavento (aletas horizontais posicionadas de modo paralelo ou perpendicular à fachada e com ângulos de inclinação de 90° e 45°). A metodologia deste estudo foi dividida em três etapas: (1) valores de pressão e velocidades foram aferidos através de ensaios de modelo reduzido (escala 1:25) em túnel de vento; (2) os valores de velocidade foram inseridos no *EnergyPlus* para os cálculos de conforto térmico e, por fim, (3) os valores obtidos para as tipologias avaliadas foram comparados ao modelo de referência (sem sombreamentos). De modo geral, os resultados indicaram que adoção de sombreamentos reduzem os níveis de insatisfação dos usuários em todos os pontos do ambiente avaliado. E, dentre as alternativas avaliadas, a opção com aletas horizontais (com inclinação de 90°) e posicionadas de modo perpendicular à fachada se mostrou a melhor opção.

Elshafei et al. (2017) indicaram, por meio de simulações fluidodinâmicas validadas com dados aferidos *in loco*, o impacto que pequenas modificações na caracterização de aberturas (variação do seu tamanho, posicionamento e presença de dispositivos de sombreamento) podem auxiliar na ventilação e nos níveis de conforto térmico de apartamentos estudantis em Alexandria, no Egito. Amini et al. (2020), ao avaliarem numericamente os parâmetros relacionados à radiação solar, às configurações de sombreamentos e às aberturas nos níveis de conforto térmico e na qualidade do ar de salas de aula em Auckland, na Austrália, apontaram uma maior sensibilidade (nos critérios avaliados) proporcionados pelas áreas envidraçadas em relação aos sombreamentos. Ademais, complementaram que o uso conjugado de aberturas para a ventilação e sombreamentos pode auxiliar na qualidade do ar das salas e, no inverno, adequadas caracterizações das superfícies envidraçadas, compensar a demanda por aquecimento.

Chand, Bhargava e Krishak (1998), baseados em ensaios em túnel de vento, mensuraram os efeitos, da presença ou não de sacadas, na distribuição de pressão devido ao vento em um modelo (0,60 m x 0,25 m x 0,50 m) reduzido (escala 1:30) selado correspondente a uma edificação de cinco andares (Figura 12). Os dados de pressão foram aferidos em três eixos distribuídos ao longo da sua fachada (um central e dois laterais, próximos às quinas da geometria) e os coeficientes de pressão deduzidos. Em síntese, tanto na incidência perpendicular quanto na oblíqua, ao confrontar os dados dos ensaios com e sem sacadas, variações nos C_p s foram observadas na face a barlavento e insignificantes alterações na sotavento.

Figura 12: Análise do impacto da presença de sacadas na distribuição de pressão nas envoltórias do modelo.



Fonte: Chand, Bhargava e Krishak (1998).

Kotani e Yamanaka (2007), baseados em ensaios em túnel de vento, avaliaram o impacto de duas tipologias de sacadas na distribuição de pressão (Cps) e na velocidade média do escoamento à frente da fachada de uma edificação de cinco andares. Foram aferidas as pressões e as velocidades em 50 pontos distribuídos na face a barlavento e à frente, respectivamente, de um modelo reduzido (escala 1:60, sendo a sua altura igual a 0,25 m). Três variações (sem sacadas, sacadas com elementos horizontais e, combinados) foram ensaiadas para as direções de vento: 0°, 22,5°, 45°, 67,5°, 90°, 135° e 180°. Os resultados indicaram que os coeficientes de pressão (Cps) não são muito influenciados pela tipologia da sacada, mas pelo ângulo de incidência de vento. Quanto à velocidade ao longo da face a barlavento, nas situações de sacadas sem partições, menores valores foram registrados quando os Cps foram maiores.

Ai et al. (2011), baseado nos dados experimentais produzidos por Chand, Bhargava e Krishak (1998), testaram a partir de simulações fluidodinâmicas (*Fluent*), a influência na ventilação natural da presença de sacadas em um modelo com aberturas, considerando situações de ventilação cruzada e unilateral e incidências de vento a 0° e 45°. Os impactos da inclusão destes elementos foram observados a partir de taxas de fluxo de massa e da velocidade do ar aferida a 1,0 m do piso. Os resultados indicaram que a inclusão de sacadas resultou em aumento na taxa de fluxo de massa e redução da velocidade média do ar na altura do plano de trabalho na maioria dos ambientes para situações de ventilação unilateral. Já, para ventilação cruzada não foram registrados impactos significativos nas variáveis observadas, independente da incidência de vento.

Baseados nos mesmos ensaios em túnel de vento desenvolvidos no estudo de Chand, Bhargava e Krishak (1998), Montazeri e Blocken (2013), apresentaram uma análise sistemática acerca da potencialidade de uma ferramenta CFD em prever os coeficientes de pressão devido ao vento nas fachadas da edificação (com e sem a presença de sacadas) para incidências de vento perpendicular ou oblíqua. A ferramenta computacional se mostrou precisa na predição dos dados de pressão (para simulações com e sem as sacadas) na fachada a barlavento, em ambas as incidências observadas. No entanto, os dados numéricos e experimentais apresentaram grandes discrepâncias na predição dos Cps para a face a sotavento na situação de vento oblíquo.

Omran et al. (2017) investigaram a influência das 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, dispostas em faces opostas, permitiu que tais medições avaliassem os sistemas de ventilação natural cruzada e unilateral. Os dados medidos foram utilizados para validar o modelo de simulação CFD e uma boa concordância foi verificada entre ambos. Deste modo, a partir de simulações fluidodinâmicas, foram avaliadas as influências, na velocidade do ar e nos níveis de conforto térmico, 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 expressas como uma porcentagem do comprimento da área da sala (10%, 20%, 30% e 40%) e quatro direções de vento (0°, 45°, 90° e 180°). As principais conclusões 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 foram observadas em incidências perpendiculares à fachada enquanto que menores ocorreram na incidência paralela; (d) análises de sensibilidade indicaram a direção do vento como o parâmetro mais sensível a variações; (e) em relação ao desempenho da ventilação natural, a ventilação cruzada se mostrou superior, e a ventilação unilateral mais sensível à variação de parâmetros.

Loche et al. (2020) avaliaram, através de ensaios em túnel de vento, o efeito causado pela inclusão de sacadas nos coeficientes de pressão (C_p) devido ao vento em um edifício de escritórios de onze andares. Quatorze cenários foram criados a partir das combinações de parâmetros sob o caso base: grau de exposição (isolado ou com entorno); localização das sacadas (frente, atrás e laterais) e dimensões (variação de 1,0 m a 5,0 m na largura e de 0,5 m a 2,0 m na profundidade) para 24 ângulos de incidência de vento. A inclusão das sacadas alterou os valores de C_p tanto a barlavento quanto sotavento. Para os andares inferiores e intermediários, o diferencial de pressão decresceu com o incremento da profundidade deste elemento arquitetônico. Já os superiores indicaram reduções nos valores de C_p para aumentos tanto na largura quanto na profundidade das sacadas. A consideração do entorno imediato impactou significativamente os C_p s, com registro de valores negativos nas faces a barlavento.

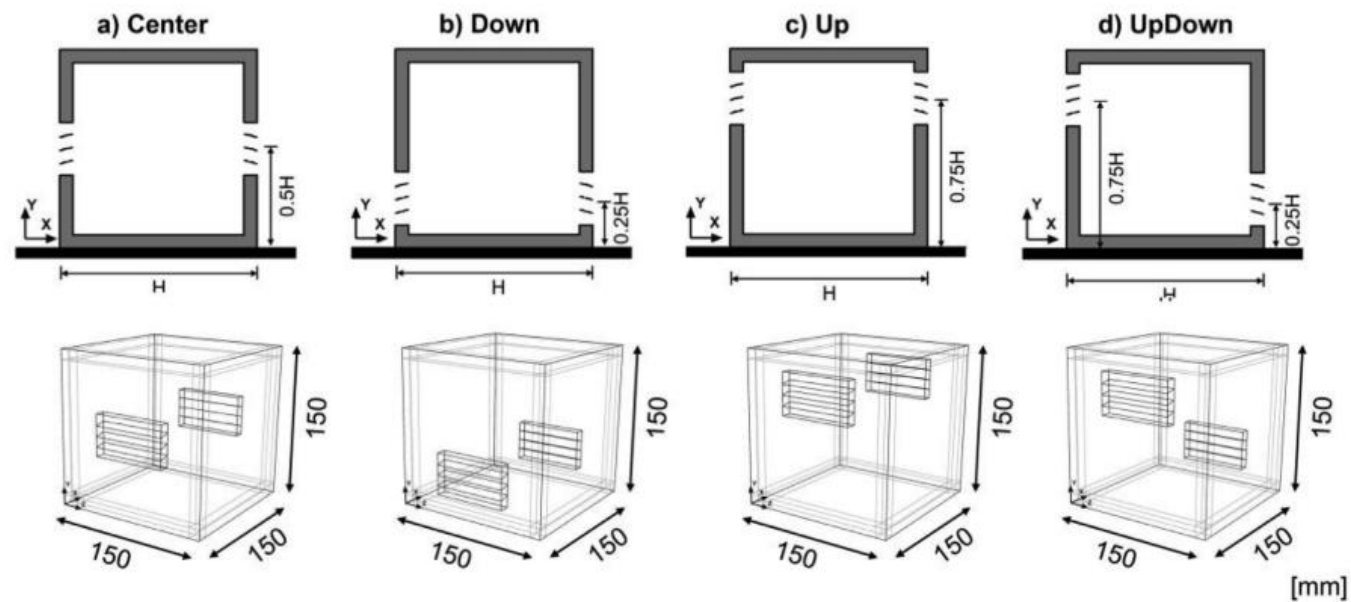
É crescente a literatura acerca de investigações dos chamados *louvers* na ventilação natural (TABLADA et al., 2009; SACHT et al., 2016; LEE et al., 2015; ZHENG; TAO; LI, 2020; KOSUTOVA et al., 2019; ZHENG; TAO; LI, 2019, 2020b; JIANG et al., 2019; CHANDRASHEKARAN, 2010). Alguns estudos os caracterizam como grelhas para ventilação, outros atribuem a mesma terminologia para uma subestrutura composta, usualmente, por aletas horizontais e disposta a frente da fachada. Seus impactos têm sido avaliados por meio de ferramentas numéricas e experimentais. Neste trabalho, restringe-se a descrição aos trabalhos que utilizam essas grelhas na fachada da edificação ou modelo considerados.

Sacht et al. (2016) avaliaram, a partir de ensaios em túnel de vento, a influência, nas velocidades do ar externa e interna, de módulos de grelhas de ventilação na constituição de um sistema de fachada. Quatro configurações deste sistema⁴⁸ foram analisadas e englobaram variações no tipo (grelha posicionada verticalmente ou horizontalmente) e no posicionamento na fachada (peitoril ventilado, módulos locados abaixo do vão de abertura, e módulos dispostos acima e abaixo da abertura). As análises foram conduzidas em um modelo reduzido (escala 1:20) e com dimensões de 0,16 m x 0,28 m x 0,28 m. A manutenção de uma porta, em face oposta, aberta ou fechada permitiu que sistemas de ventilação cruzada e unilateral fossem observados. Embora a vazão de ar nos casos analisados tenha sido a mesma, o peitoril ventilado em situação de ventilação cruzada apresentou maiores velocidades e melhor distribuição do ar na altura do usuário no interior do modelo. Em casos de ventilação unilateral, independente da opção de posicionamento dos módulos, os valores de velocidades resultantes foram baixos.

Kosutova et al. (2019) analisaram o impacto da adoção de quatro configurações de grelhas de ventilação em um modelo genérico – (a) grelhas situadas ao centro, (b) na parte superior; (c) na parte inferior e (d) na parte superior a barlavento e inferior, a sotavento – por meio de ensaios em túnel de vento e simulações fluidodinâmicas (Figura 13). Objetivou-se com este estudo (a) apresentar dados experimentais das diferentes configurações de grelhas de ventilação; (b) validar simulações fluidodinâmicas a partir dos experimentos e; (c) investigar o impacto destas grelhas no desempenho da ventilação natural (padrão de distribuição do fluxo, idade do ar, adimensional de taxa de volume de fluxo; e na eficiência das trocas de ar). Deste modo, aferições de velocidade foram realizadas a partir do método PIV em um plano vertical passando na metade do modelo reduzido (escala 1:50) com dimensões de 0,15 m x 0,15 m x 0,15 m e com aberturas idênticas e dispostas em faces opostas representando 12,5% da área da face. A incidência de vento foi normal à fachada sendo a velocidade de referência (no topo de cobertura) de 1,9 m/s. Na sequência, os dados foram utilizados para validar as simulações (refinamento da malha, definição do modelo de turbulência) e por fim, seus resultados foram plotados e comparados entre si e aos equivalentes sem a presença das grelhas. A tipologia com grelhas ao centro registrou a maior eficiência de trocas de ar e o maior adimensional de taxa de volume de fluxo foi encontrado na tipologia com grelhas superiores.

⁴⁸ Composto por seis módulos (equivalentes à 0,5 m x 0,5 m cada).

Figura 13: Configurações de grelhas de ventilação em um modelo genérico



Fonte: Kosutova et al. (2019)

Chandrashekar (2010) investigou, por meio de ensaios experimentais e simulações fluidodinâmicas, o efeito resultante da angulação de múltiplas aletas posicionadas nos vãos de abertura nas velocidades e caracterização do fluxo de ar interno de um ambiente residencial típico. O ambiente (representado por um modelo reduzido de 0,25 m x 0,50 m x 0,25 m) dotado de janelas dispostas em fases opostas (com 30% de área de fachada cada), teve seus vãos caracterizados por aletas horizontalmente posicionadas e equidistantes e com quatro variações quanto ao ângulo de rotação das aletas: 0° (completamente aberto), 15°, 30° e 45°, com áreas de aberturas equivalentes, respectivamente, a 95%, 75%, 50% e 27%. Aferições de velocidade foram realizadas no interior, na entrada e saída do modelo. A velocidade externa foi variada 2,94 m/s; 4,51 m/s; 6,13 m/s com incidência de vento única e perpendicular às aberturas. Dos dados de velocidades (interna e da relação das velocidades internas e externas) as seguintes conclusões foram pontuadas: os ângulos de inclinação das aletas impactaram no fluxo de ar pelas aberturas e nas velocidades do ar no interior do ambiente. Aletas horizontalmente posicionadas de 0° a 30° promoveram a aceleração das velocidades de ar internas. Na situação de 45°, velocidades relativamente baixas foram caracterizadas. Simulações computacionais (CFD da ferramenta *DesignBuilder*) indicaram boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

A Tabela 10 sintetiza as referências apresentadas, elencando os tipos de análise e ferramentas empregadas e, os parâmetros e impactos avaliados. Indicou-se apenas os impactos e parâmetros referentes à ventilação natural, os demais, quando existentes, foram omitidos.

Tabela 10: Tabela-resumo de estudos que observaram o impacto de elementos arquitetônicos (dispositivos de sombreamento, sacadas e grelhas de ventilação natural) na ventilação natural (continua).

Referência	Tipo de análise	Ferramentas	Parâmetros variados	Impactos avaliados
Bittencourt; Biana; Cruz (1995)	Numérica (qualitativa e quantitativa)	CFD	Profundidade e espaçamento de protetores verticais e horizontais	Padrão de distribuição do fluxo e velocidade do ar interno
Vettorazzi et al., 2016	Numérica (qualitativa)	CFD	Presença ou não do Filtro Sol Ar com variação do seu dispositivo horizontal em função da latitude	Comportamento da distribuição do fluxo de ar interno
Castañó, 2017	Numérica e experimental (quantitativa)	<i>EnergyPlus</i> e Túnel de vento	Dispositivos de sombreamento (horizontal básico, horizontal afastado, veneziana, tipo “L”, varanda), área das aberturas e presença de muro externo (caso com e sem varanda) e ângulo de incidência de vento	Distribuição de pressão (C_p), temperaturas internas e níveis de conforto térmico
De Quadros e Ordenes, 2017	Numérica (qualitativa e quantitativa)	<i>EnergyPlus</i> e CFD	Presença ou não de brises nas aberturas	Comportamento, distribuição e velocidade do fluxo de ar interno
Accioly; Oliveira e Bittencourt, 2016	Experimental (qualitativa)	Mesa d'água	Tipologias de prateleira de luz (superfície plana, plana com curvatura na extremidade externa, plana com curvatura na extremidade interna e, plana com curvaturas em ambas as extremidades)	Comportamento e distribuição do comportamento do fluxo de ar na entrada e no interior do ambiente
Bacicheti; Cardoso; Sardeiro, 2016	Numérica (qualitativa)	Fluxo Vento	Presença ou não de brises nas aberturas	Comportamento e distribuição do comportamento do fluxo de ar no interior do ambiente
Chand e Krishak, 1971	Experimental (quantitativa)	Túnel de vento	Dispositivos de sombreamento solar (horizontal, tipo caixa, tipo L, de múltiplas aletas horizontais e verticais) e ângulo de incidência de vento	Velocidade do ar interno
Mathan Kannan; Nagarajan; Dhanalakshmi, 2018	Numérica (qualitativa e quantitativa)	CFD	Presença ou não de um dispositivo de sombreamento externo aliado a diferentes tipologias de janelas	Distribuição e velocidade do fluxo de ar interno e taxas de renovação de ar
Prianto e Depecker, 2002	Numérica (quantitativa)	N3S	Efeito combinado de alguns elementos arquitetônicos (configurações de sacadas, tipos de abertura e presença de divisões internas)	Velocidade interna do ar
Hien e Istiadji, 2003	Numérica (qualitativa e quantitativa)	CFD	Tipologias de dispositivos de sombreamento	Velocidade interna e distribuição do fluxo de ar
Hildebrand, 2012	Experimental (qualitativa e quantitativa)	Túnel de vento	Tipologias de sombreamento externos (tela perfurada e veneziana externa) e de esquadrias (basculante, de abrir e guilhotina)	Velocidade interna e distribuição do fluxo de ar
Lin; Xiao; Zhan, 2017	Experimental e numérica (quantitativa)	Aferições <i>in loco</i> e CFD	Presença ou não de um sistema dinâmico de brises	Velocidade do ar interno
Sun et al., 2018	Numérica	CFD	Presença ou não de dispositivos de sombreamento	Temperaturas internas, níveis de conforto e consumo energético
Bayraktar e Ok, 2019	Experimental e numérica (quantitativa)	<i>EnergyPlus</i> e Túnel de Vento	Presença ou não de dispositivos de sombreamento externos	Sensação térmica dos usuários
Elshafei et al., 2017	Experimental e numérica (quantitativa)	Aferições <i>in loco</i> e CFD	Características de aberturas (variação do seu tamanho, posicionamento e presença de dispositivos de sombreamento)	Níveis de conforto térmico dos usuários

Dispositivos de sombreamento

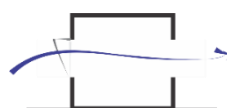
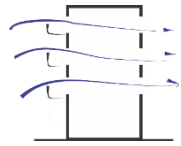
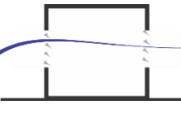


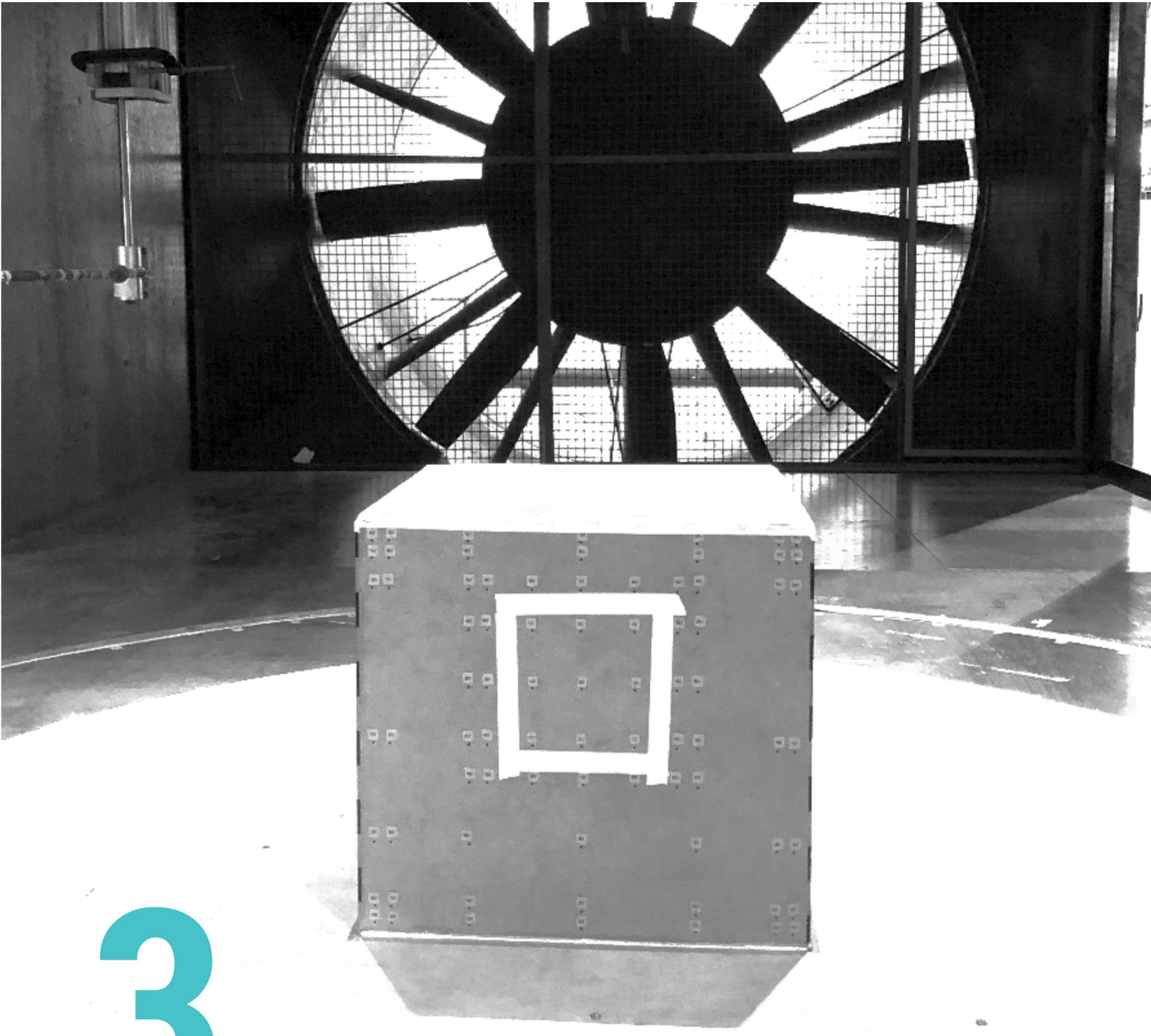
Tabela 10: Tabela-resumo de estudos que observaram o impacto de elementos arquitetônicos (dispositivos de sombreamento, sacadas e grelhas de ventilação natural) na ventilação natural (conclusão).

	Sacadas	Chand, Bhargava e Krishak, 1998	Experimental (quantitativa)	Túnel de vento	Presença ou não de sacadas (modelo selado)	Distribuição de pressão (C_p)
		Kotani e Yamanaka, 2007	Experimental (quantitativa)	Túnel de vento	Presença ou não de sacadas, variações de tipologias e ângulos de incidência de vento	Distribuição de pressão (C_p) e velocidade média do vento aferida à frente da fachada
		Ai et al., 2011	Numérica (quantitativa)	CFD	Presença ou não de sacadas (modelo com aberturas)	Taxas de fluxo de massa e velocidade interna do ar
		Montazeri e Blocken, 2013	Numérica (quantitativa)	CFD	Presença ou não de sacadas (modelo selado)	Distribuição de pressão (C_p)
		Omrani et al., 2017	Experimental e numérica (quantitativa)	Aferições <i>in loco</i> e CFD	Configurações de sacadas (abertas ou semi-enclausuradas)	Velocidade do ar interna
		Loche et al., 2020	Experimental (quantitativa)	Túnel de vento	Presença ou não de sacadas, variação de suas características (localização e dimensões), presença ou não de entorno e ângulo de incidência de vento	Distribuição de pressão (C_p e ΔC_p)
	Grelhas de ventilação	Sacht et al., 2016	Experimental (quantitativa)	Túnel de vento	Posicionamento de módulos de grelhas de ventilação	Velocidades médias do ar externas e internas ao modelo
		Kosutova et al., 2019	Experimental e numérica (qualitativa e quantitativa)	Túnel de vento e CFD	Quatro configurações de grelhas de ventilação em um modelo genérico	Desempenho da ventilação natural (padrão de distribuição do fluxo, idade do ar, adimensional de taxa de volume de fluxo; e na eficiência das trocas de ar)
		Chandrashekar, 2010	Experimental e numérica	Túnel de vento e CFD	Ângulo de rotação das aletas e velocidade média do vento	Velocidades e caracterização do fluxo de ar interno

Fonte: Elaborado pela Autora com base nos estudos citados e revisados (2021).

2.4 SÍNTESE DO ITEM

Nesta seção, buscou-se apresentar os conceitos necessários, acerca da aerodinâmica da Arquitetura e da ventilação natural em edificações, para embasar o entendimento da discussão proposta nesta investigação. Ademais, a partir da revisão da literatura científica, pontua-se a lacuna, a qual se pretende contribuir. Destaca-se, com base nestes estudos, o impacto que o uso de elementos arquitetônicos nas aberturas ou nas suas proximidades resulta nos parâmetros aerodinâmicos e, conseqüentemente, no potencial de ventilação natural nos ambientes. A distribuição de pressão nas superfícies externas de modelos e/ou edificações, quantificada por meio dos Cps, consiste em um dado crucial, requerido em modelos numéricos ou teóricos para a estimativa ou avaliação do desempenho da ventilação natural por indução eólica. No entanto, dados experimentais que mapeiam a distribuição de pressão (C_p) em exemplares dotados de detalhamentos nas fachadas, tais como, os dispositivos de sombreamento externos ainda são reduzidos quando comparados ao volume disponível desta informação para geometrias lisas, logo, necessários de serem fornecidos e investigados.



3

DEFINIÇÃO DOS MODELOS

Portanto, o bom projeto costuma ser uma resposta integrada a toda uma série de questões. Se houvesse uma característica única que pudesse ser usada para identificar os bons projetistas, seria a capacidade de integrar e combinar. Um bom projeto é quase como um holograma: a imagem inteira está em cada fragmento.

(LAWSON, 2011, p.66).

Nesta seção⁴⁹ é apresentado o processo de definição dos modelos e das condições de contorno que caracterizaram os ensaios nos túneis de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), realizados em momentos distintos do desenvolvimento desta pesquisa. As matrizes de ensaio do IPT e do LNEC, apresentadas ao final desta seção, divergem entre si pela quantidade e tipologia dos dispositivos de sombreamento externos avaliados.

Objetivou-se, em ambas as análises experimentais, a avaliação do impacto na ventilação natural – mensurado, principalmente, por meio dos coeficientes de pressão (C_p) – de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento externos acoplados a abertura a barlavento de uma base comum nomeada de **modelo genérico**.

O **modelo genérico** é caracterizado por uma geometria paralelepípeda e com dimensões equivalentes a um ambiente residencial. A seleção de uma forma geométrica regular para representá-lo teve como objetivos: (a) tornar a geometria um parâmetro fixo; (b) minimizar o efeito de parâmetros adicionais; (c) priorizar a quantificação do impacto dos dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural; (d) elaborar e fornecer regras gerais acerca de tais impactos e por fim; (e) gerar dados quantitativos de primeira ordem para a validação de ferramentas numéricas aplicadas no desenvolvimento de estudos de ventilação natural.

⁴⁹ O conteúdo desta seção resultou em três publicações:

ROSSI, M. M.; VALE, F. I.; SHIMOMURA, A. R. P.; CHVATAL, K.M.S. Desenvolvimento de modelo genérico para avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento na ventilação natural. In: 5º Congreso Sudamericano de Simulación de Edificios, 2018, Valparaíso. **Anais...5º Congreso Sudamericano de Simulación de Edificios**, 2018.

ROSSI, M. M.; VALE, F. I.; SHIMOMURA, A. R. P.; CHVATAL, K.M.S. A mesa d'água como ferramenta de apoio para a caracterização de um modelo genérico a ser ensaiado em túnel de vento. **Revista IPT: Tecnologia e inovação**, v. 3, p. 89, 2019.

ROSSI, M. M.; CHVATAL, K.M.S; MATTIA, P. H.; SHIMOMURA, A. R. P. **Artigo em desenvolvimento**. 2021.

Segundo Blessmann (1983) adotam-se estudos experimentais sempre que o comportamento do fluido não for possível de ser determinado a partir de modelos teóricos ou quando um modelo matemático precisa ser verificado. As avaliações experimentais podem ser realizadas em escala real ou reduzida. Conforme mencionado, no caso de investigações em escala reduzida é essencial que condições de semelhança entre os sistemas real (protótipo) e o experimental (modelo físico) sejam asseguradas, tais como: (1) semelhança geométrica (forma e orientação em relação ao fluxo); (2) semelhança cinemática (padrões de velocidades médias e turbulência) e; (3) semelhança dinâmica (igualdade no número de *Reynolds*).

Com o objetivo de garantir essas condições de semelhança, delineou-se uma metodologia para a definição das características do modelo genérico, dos seus dispositivos de sombreamento e das suas condições de contorno, composta por três etapas sucessivas: (1) seleção das classes de parâmetros de interesse; (2) especificação dos parâmetros pertencentes a cada classe e; (3) definição das ferramentas metodológicas utilizadas para a determinação dos mesmos. Na sequência, tais etapas são apresentadas em detalhes (Figura 14).

- (1) Seleção das classes de parâmetros:** foram definidas três grandes classes para categorizar os parâmetros de interesse: Classe I: Geometria; Classe II: Dispositivos de sombreamento e; Classe III: Condições de contorno.
- (2) Especificação dos parâmetros por classe:** a Classe I: Geometria, englobou características tanto do modelo (dimensões) quanto de suas aberturas (quantidade, localização, tamanho, e posicionamento na fachada); a Classe II: Dispositivos de sombreamento, reuniu as características dos elementos de sombreamento externos (tipologias, dimensões e posicionamentos) e; a Classe III: Condições de contorno, descreveu as situações em que os modelos seriam ensaiado (tipo de terreno, ângulos de incidência e exposição). No total foram elencados 14 parâmetros de interesse.
- (3) Definição das ferramentas metodológicas:** após selecionados, estes parâmetros foram definidos com o auxílio de três ferramentas metodológicas: (a) revisão bibliográfica; (b) levantamento de dados e; (c) análises qualitativas.

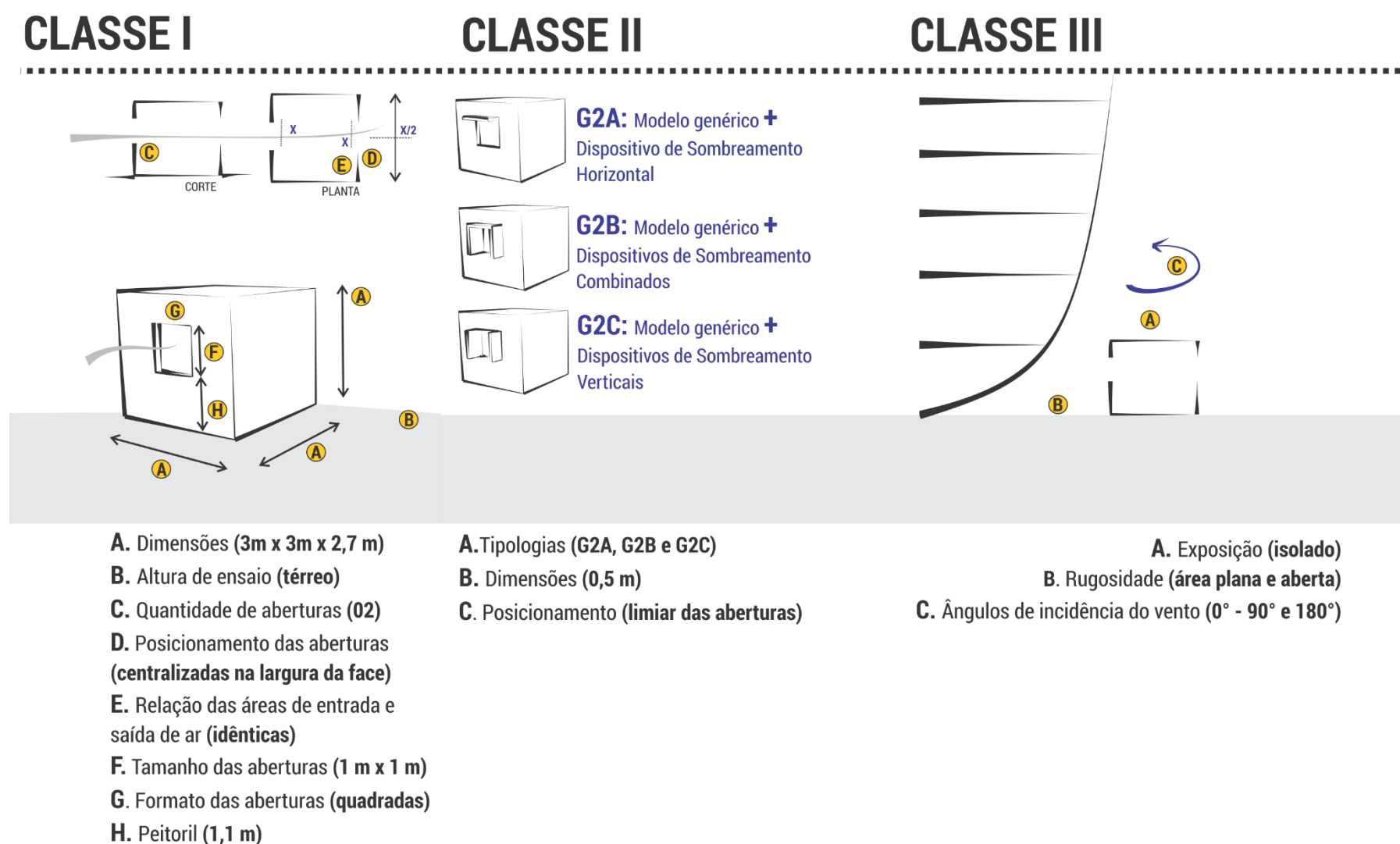
Figura 14: Procedimento metodológico para a definição dos modelos.



Fonte: Adaptado de Rossi et al. (2018).

O modelo genérico obtido a partir do procedimento metodológico descrito, compreendeu parâmetros fixos e variáveis, conforme sintetizados na Figura 15. A revisão da literatura científica embasou a escolha de todos os parâmetros, englobando importantes referências nacionais e internacionais acerca das temáticas de ventilação natural em edificações, de sombreamento de aberturas e do uso conjugado destas estratégias bioclimáticas, principalmente em edificações em climas quentes e úmidos. O levantamento de dados permitiu a consulta de pesquisas prévias que catalogaram aspectos de projetos residenciais e de saletas comerciais. As análises qualitativas consistiram: (1) nos ensaios na mesa d'água do Laboratório de Conforto Ambiental do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU-USP) e; (2) na elaboração das máscaras de sombra dos dispositivos de sombreamento externos selecionados. De acordo com Passos, Lamenha e Bittencourt (2017), devido à complexidade inerente ao fenômeno da ventilação natural, é necessário fixar alguns parâmetros a fim de permitir a investigação de outros. Deste modo, simplificações foram adotadas sempre que a opção em questão atribuiu uma complexidade à análise que não se justificava no cumprimento do objetivo proposto por esta tese. Portanto, nas páginas a seguir é apresentado, em detalhe, o processo de aplicação da metodologia e as justificativas para os valores descritos na Figura 15.

Figura 15: Definição dos modelos.



Fonte: A Autora (2018).

3.1 CLASSE I: GEOMETRIA

Esta classe reúne a descrição dos parâmetros relacionados às características geométricas tanto do modelo – (a) dimensões (comprimento, largura e pé-direito) e (b) altura em que o modelo foi ensaiado – quanto de suas aberturas – (c) quantidade e posicionamento; (d) relação entre as áreas de entrada e saída de ar; (e) formato; (f) tamanho e por fim, (g) peitoril. As ferramentas metodológicas utilizadas para estas definições foram: revisão bibliográfica; levantamento de dados e; avaliações qualitativas.

3.1.1 Dimensões do modelo

Buscou-se que as dimensões do modelo genérico (largura, comprimento e pé-direito) representassem um ambiente também genérico. Para embasar esta definição dois grupos de informações foram verificados. O primeiro grupo reuniu alguns exemplares da literatura científica de modelos de análises experimentais, cujos dados validaram estudos numéricos ou teóricos (EVOLA & POPOV, 2006; MERONEY, 2009; KARAVA et al., 2011, entre outros). Já o segundo, agrupou informações de projetos residenciais (ROSSI, 2016; ANCHIETA, 2016; FAVRETTO, 2016) e de saletas comerciais (SANTESSO, 2017; NEVES et al., 2017) oriundas de levantamentos de dados realizados em pesquisas prévias, em parceria ou conduzidas no Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU-USP).

3.1.1.1 Modelos: exemplares da literatura científica

Os modelos experimentais (escala real e reduzida) são amplamente utilizados na validação de casos teóricos e numéricos, uma vez que consistem em uma predição mais realista. Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017) validaram simulações fluidodinâmicas (*Computational Fluid Dynamic – CFD*) de uma geometria tridimensional, isolada e com ventilação cruzada a partir de dados experimentais. Ainda neste mesmo trabalho, os autores apresentaram uma revisão bibliográfica que compilou uma série de outras investigações numéricas que utilizaram dados aferidos para o mesmo fim.

Desta forma, partindo-se da revisão elaborada por tais autores, realizou-se uma seleção dos estudos validados por dados oriundos de ensaios em modelos genéricos, tridimensionais, isolados e composto por uma única zona. A Tabela 11 reúne informações das referências, fontes de obtenção dos dados (túnel de vento – WT⁵⁰ ou escala real – FS) e parâmetros validados (velocidade – V; campos de vetores de velocidade – VF; parâmetros de turbulência – TP; pressão – P e taxa de fluxo de ar – Q).

Na sequência, algumas destas referências são detalhadas. No entanto, em razão do objetivo desta tese, priorizaram-se informações acerca dos modelos genéricos avaliados ou dos ensaios realizados. Resultados e discussões sobre a concordância entre os dados numéricos e aferidos foram omitidos.

⁵⁰ As siglas foram utilizadas em inglês, a fim de manter coerência com a tabela de referência (VAN HOOFF; BLOCKEN; TOMINAGA, 2017).

Tabela 11: Tabela-resumo de estudos numéricos que utilizaram dados experimentais de modelos genéricos para validações.

REFERÊNCIA	DADOS EXPERIMENTAIS	PARÂMETROS VALIDADOS
Kato et al. (1992)	WT	V, VF, Q, P
Straw et al. (2000)	FS	V,Q
Jiang et al. (2003)	WT	V, VF, TP, P
Kurabuchi et al. (2000)	WT	VF, TP, P, Q
Kurabuchi et al. (2004)	WT	VF, TP, P
Hu et al. (2005)	WT	VF,TP,Q
Evola e Popov (2006)	WT	V,Q,P
Yang et al. (2006)	FS	Q,P
Hu et al. (2008)	WT	VF,TP,P
Kobayashi et al. (2009)	WT	Q,P
Meroney (2009)	WT	V,VF
Nikas et al. (2010)	WT/FS	V,Q
Cheung e Liu (2011)	WT	V,VF,TP,Q
Larsen et al. (2011)	WT/FS	V
Ramponi e Blocken (2012 a, 2012b)	WT	V,VF
Mohamed et al. (2013)	WT	Q
Peren et al. (2015 a e b)	WT	V,VF
Tong e Malkawi (2016)	WT	V

Fonte: Adaptado de Van Hooff; Blocken; Tominaga (2017).

Kato et al. (1992) investigaram o processo de dissipação de energia e a validade da equação (modelo teórico) de determinação do fluxo de ar, em função da queda da pressão estática e do coeficiente de descarga nas aberturas, a partir de ensaios em túnel de vento e simulações fluidodinâmicas (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Utilizaram como referência uma unidade habitacional (cúbica), cujo modelo físico reduzido apresentou 0,18 m de aresta (Figura 16). A porcentagem de área de abertura nas fachadas (barlavento e sotavento) foi o parâmetro variado. Pressões (interna e na envoltória externa do modelo), campos de velocidades (no interior e ao redor da geometria) e taxas de renovações de ar por hora foram os parâmetros investigados.

Figura 16: Modelo genérico utilizado por Kato et al. (1992).

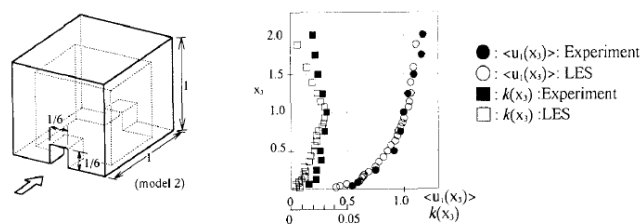


Fig. 1. Schematic view of model Fig. 2. Vertical profile of approaching wind

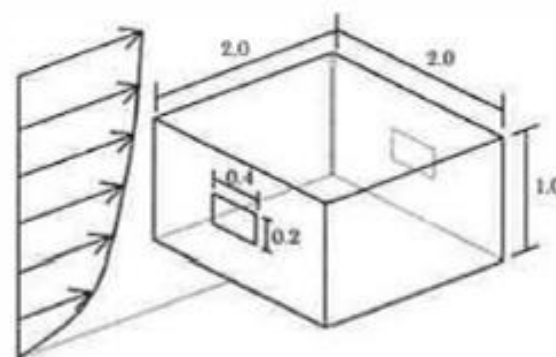
Table 1. Types of models analysed

Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Tunnel type: windward and leeward wall is connected by a square duct of $1/6 \times 1/6$	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. (1922).

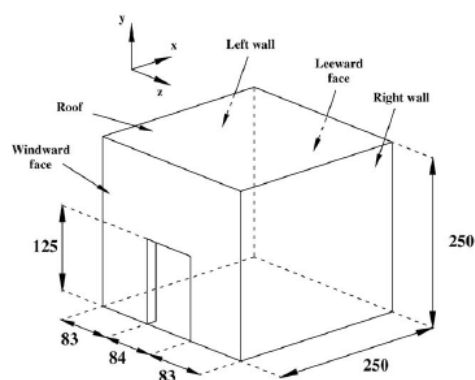
Kurabuchi et al. (2000) utilizaram-se de dados experimentais de um modelo genérico – forma paralelepédica na proporção de 2:2:1 e com aberturas idênticas dispostas em faces opostas (Figura 17) – para avaliar a validade e a aplicabilidade de simulações CFD (com variados modelos de turbulência) na investigação de problemas de ventilação cruzada. Compararam-se dados medidos e simulados das seguintes variáveis: (a) quociente de vazão, (b) padrão do fluxo de ar no exterior e no interior do modelo, (c) distribuição da energia cinética turbulenta e (d) distribuição dos coeficientes de pressão nas envoltórias.

Figura 17: Modelo genérico utilizado por Kurabuchi et al. (2000).



Fonte: Kurabuchi et al. (2000).

Figura 18: Modelo genérico de Jiang et al. (2003) adotado no estudo de Evola e Popov (2006).

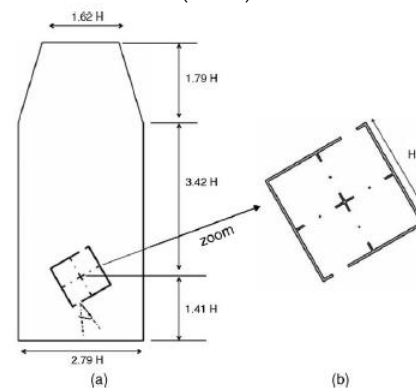


Fonte: Evola e Popov (2006).

Evola e Popov (2006) aplicaram simulações CFD para prever a ventilação em um modelo genérico cúbico isolado (250 mm x 250 mm x 250 mm) similar ao utilizado no estudo de Jiang et al. (2003). (Figura 18). 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) na face a sotavento.

Nikas, Nikolopoulos, Nikolopoulos (2010) desenvolveram um estudo com o objetivo de prever o padrão de fluxo de ar dentro e ao redor de um modelo genérico em situação de ventilação cruzada. O modelo (5,56 m x 5,56 m x 3,00 m) (Figura 19) e os dados experimentais foram baseados nas investigações, em escala reduzida em túnel de vento e em escala real, de Larsen (2005) e Larsen e Heiselberg (2008). Simulações CFD foram conduzidas e dois parâmetros foram variados: a velocidade do vento incidente (1, 3 e 5 m/s), e sua direção (0° , 30° e 60° e -90°).

Figura 19: Modelo genérico desenvolvido por Larsen (2005) e Larsen e Heiselberg (2008) e adotado no estudo de Nikas, Nikolopoulos, Nikolopoulos (2010).

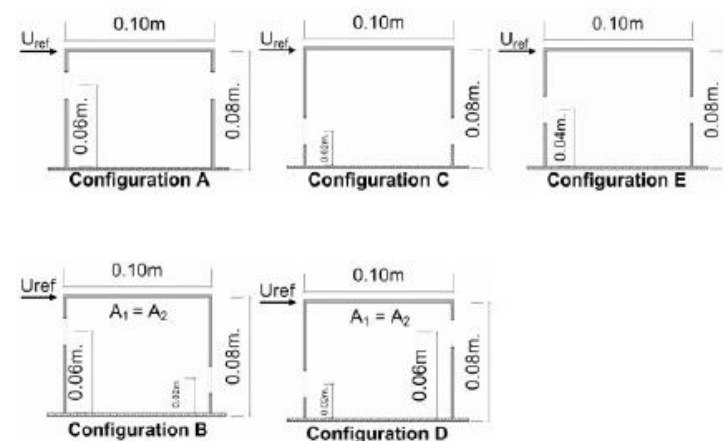


Fonte: Nikas, Nikolopoulos, Nikolopoulos (2010).

Meroney (2009) examinou a concordância dos dados de simulações CFD (2D e 3D) aos dos ensaios em túnel de vento conduzidos por Karava (2008). Cinco configurações de janelas foram avaliadas, variando-se parâmetros de modelagem e simulação, tais como modelos de turbulência, geometria da malha e a decomposição do domínio computacional para a simulação dos fluxos internos.

O modelo genérico (Figura 20) desenvolvido por Karava (2008) corresponde a uma edificação de quatro a cinco pavimentos (20 x 20 x 16 m), sendo sua versão reduzida na escala de 1:200 (10 x 10 x 8 cm). A partir deste modelo, suas investigações mensuraram a influência da: (a) porosidade da edificação, (b) proporção do fluxo entre a janela de entrada e saída, (c) configurações das aberturas e (d) obstruções internas (KARAVA, 2008). Por apresentar uma vasta documentação experimental, este modelo também foi utilizado também como referência para outros trabalhos (RAMPONI; BLOCKEN, 2012a; RAMPONI; BLOCKEN, 2012b; PÉREN et al., 2015a; PÉREN et al., 2015b; TOMINAGA; BLOCKEN, 2015; TOMINAGA; BLOCKEN, 2016).

Figura 20: Modelos desenvolvidos por Karava (2008) e adotados por Meroney (2009).

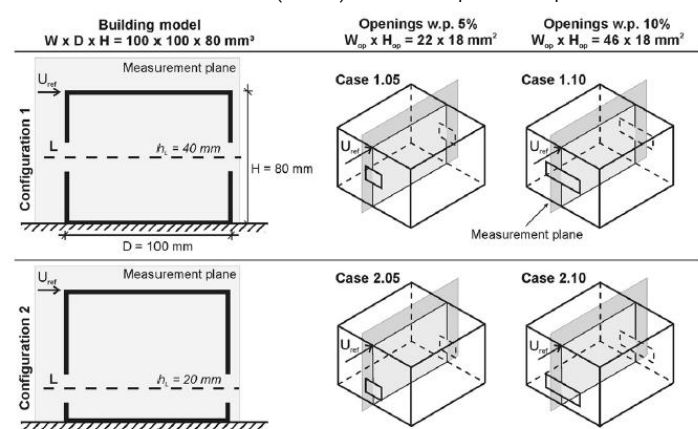


Fonte: Meroney (2009).

Ramponi e Blocken (2012a) avaliaram a sensibilidade dos resultados de simulações CFD (de ventilação cruzada) aos inúmeros dados de entrada modelados pelo usuário. O modelo de Karava et al. (2011) e seus dados experimentais (mensurados em túnel de vento a partir da aplicação do método *Particle Image Velocimetry – PIV*) foi utilizado como referência para as simulações CFD 3D e para validação dos seus resultados. A partir dos dados numéricos foram analisados os impactos do: (a) tamanho do domínio computacional; (b) resolução da malha; (c) perfil da energia cinética turbulenta; (d) ordem dos esquemas de discretização e (e) critérios de convergência iterativa, sendo a velocidade média do ar o parâmetro de comparação.

Em um segundo estudo (RAMPONI; BLOCKEN, 2012b) investigaram o impacto da difusão física e numérica no fluxo de ventilação cruzada previsto por simulações CFD 3D. Neste trabalho, o modelo de Karava et al (2011) (Figura 21) e seus dados experimentais validaram quatro configurações de geometrias (com variações no posicionamento da abertura na fachada e a porcentagem de porosidade).

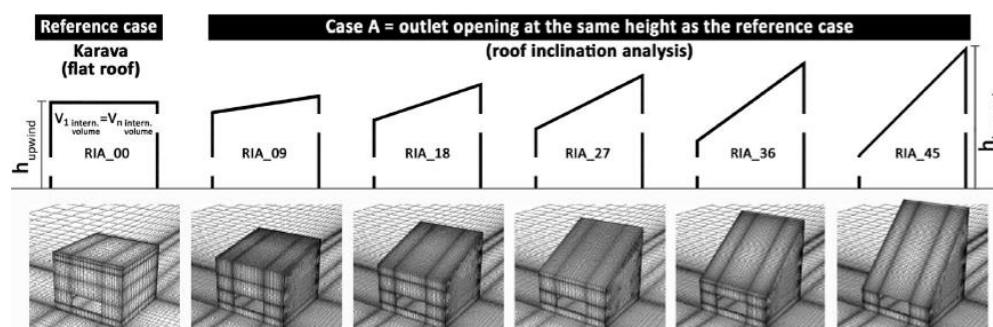
Figura 21: Modelo de Karava (2008) utilizado por Ramponi e Blocken (2012b)



Fonte: Ramponi e Blocken (2012b).

Péren et al. (2015a), por meio de simulações CFD em modelo genérico, avaliaram o impacto do posicionamento de janelas assimétricas e de telhados inclinados na ventilação cruzada, comparando taxas de fluxo e velocidades internas. Utilizaram-se do modelo de Karava et al. (2011) e de seus dados experimentais para realizar análises de sensibilidade em relação aos parâmetros de modelagem (resolução da malha computacional, modelos de turbulência e da energia cinética turbulenta de entrada da simulação) e às variações geométricas, tais como: (a) inclinação do telhado (9° , 18° , 27° , 36° e 45°) e; (b) posicionamento vertical da janela de saída (Figura 22):

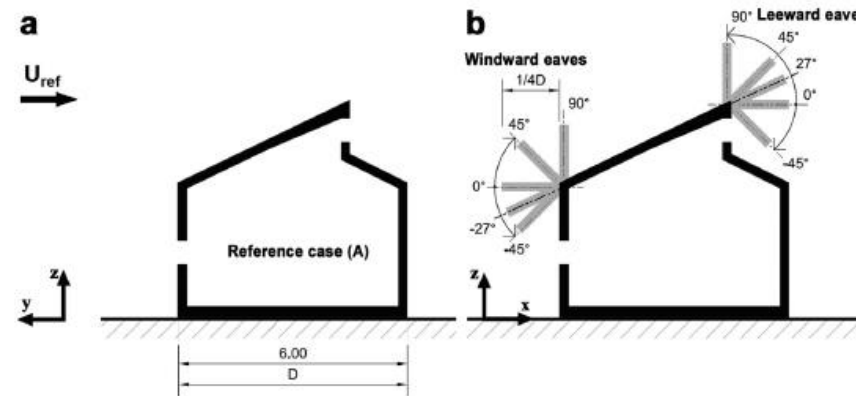
Figura 22: Modelos com diversas inclinações de telhados resultantes de variações do modelo de Karava (2008).



Fonte: Péren et al. (2015a).

Em outro estudo, Péren et al. (2015b) quantificaram o impacto de beirais (nas faces barlavento e sotavento) no desempenho da ventilação natural de um modelo genérico isolado com telhado inclinado. A partir das simulações CFD 3D, validadas pelos dados de Karava et al. (2011), avaliaram a influência de beirais com diferentes ângulos de inclinação (-45° , -27° , 0° , 45° e 90°) (Figura 23) (a) na face barlavento; (b) na sotavento e; (c) em ambas as faces. Os impactos foram analisados a partir da comparação das taxas de fluxo, velocidades internas e padrões de fluxo no interior e exterior.

Figura 23: Modelo genérico com variações nas inclinações dos beirais nas faces barlavento e sotavento.



Fonte: Péren et al. (2015b).

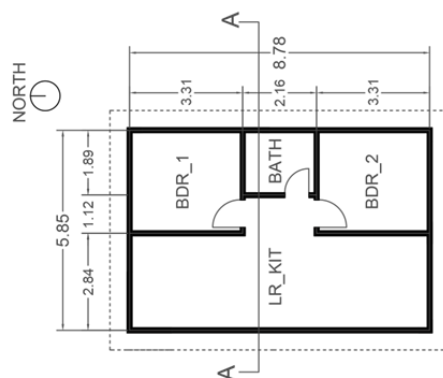
3.1.1.2 Modelos: pesquisas prévias

Neste tópico foram analisados modelos (residenciais e comerciais) oriundos de pesquisas prévias em parceria ou realizadas no Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU-USP).

Primeiramente, foram estudados 20 exemplares de projetos residenciais (habitações unifamiliares e multifamiliares) localizadas em diferentes partes do território brasileiro (em municípios dos estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso). Esses projetos foram obtidos, organizados e estudados por Rossi (2016); Anchieta (2016) e Favretto (2016) para o desenvolvimento de um modelo de habitação de interesse social típica brasileira (Figura 24). Este modelo embasou avaliações de desempenho térmico, cujos resultados foram utilizados para a elaboração de metamodelos (ROSSI et al., 2019) para predição de desconforto térmico (por frio e por calor) para três localidades brasileiras (Manaus, São Paulo e Curitiba)

Baseando-se nos mesmos projetos arquitetônicos, estudou-se as dimensões (largura, comprimento e pé-direito) dos ambientes de maior permanência (dormitórios e sala). Para situações de sala e cozinha conjugadas, observou-se a menor dimensão deste ambiente. Após esta análise valores médios, mínimos e máximos foram determinados (Tabela 12).

Figura 24: 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).

Tabela 12: Dimensões internas dos ambientes (m) de maior permanência das unidades residenciais reunidas 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	2,40 x 2,95	2,40 x 2,96	-	2,95 x 3,08	2,80	-
2	3,00 x 3,77	2,40 x 3,60	-	Conjugada	2,70	largura: 2,95
3	2,80 x 2,80	2,80 x 2,80	-		2,60	largura: 2,80
4	2,57 x 3,04	2,57 x 3,04	-	2,57 x 3,24	2,60	-
5	2,57 x 3,05	2,57 x 3,05	-	2,58 x 3,25	2,60	-
6	2,40 x 2,95	2,10 x 3,15	-	Conjugada	2,40	largura: 2,40
7	3,40 x 3,40	2,40 x 3,10	-	3,25 x 4,45	2,60	-
8	2,40 x 3,10	2,40 x 3,45	2,20 x 2,40	4,00 x 4,00	2,50	-
9	2,40 x 3,25	2,30 x 3,85	-	3,25 x 3,85	2,50	-
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	2,00 x 3,84	-	3,84 x 5,19	2,63	-
14	2,79 x 3,02	2,00 x 3,87	-	3,51 x 5,21	2,63	-
15	2,43 x 3,02	2,63 x 3,02	-	Conjugada	2,60	largura: 2,68
16	2,88 x 3,25	2,88 x 3,25	-	3,20 x 3,33	2,80	-
	2,70 x 3,20	2,70 x 3,20	-	3,29 x 3,47	2,80	
17	2,40 x 3,00	2,40 x 3,00	-	3,00 x 3,02	2,80	-
	2,57 x 3,13	2,57 x 3,13	-	3,24 x 4,32	2,70	
18	3,00 x 3,00	3,00 x 3,00	-	Conjugada	2,50	largura: 2,90
19	2,60 x 3,01	2,60 x 3,10	-	3,10 x 3,76	2,50	-
20	2,40 x 3,00	2,40 x 2,90	-	2,98 x 3,00	2,60	-
MÉTRICAS						
Média	2,60 x 3,10	2,50 x 3,30		3,10 x 3,90	2,60	-
Mínimo	2,40 x 2,80	2,00 x 2,80	2,20 x 2,40	2,50 x 3,00	2,40	-
Máximo	3,40 x 3,80	3,00 x 4,10		4,00 x 5,40	2,80	-

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

Pesquisas prévias em edificações comerciais (SANTESSO, 2017 e NEVES et al., 2017) também foram consultadas. Santesso (2017) a partir de dados disponibilizados pela Empresa *Buildings* em 2016 catalogou 55 exemplares de saletas comerciais e observou que a área média correspondia a 36,4 m².

Neves et al. (2017), baseados em dados, disponibilizados pela mesma fonte, de 153 tipos de edifícios de escritórios, constataram que o tamanho médio das saletas comerciais era de 42 m² (Figura 25), sendo preponderante o formato retangular com largura de 5 a 9 m (Figura 26).

Figura 25: Área das saletas comerciais (m²) (% do total).

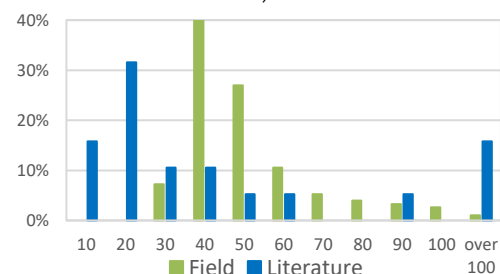
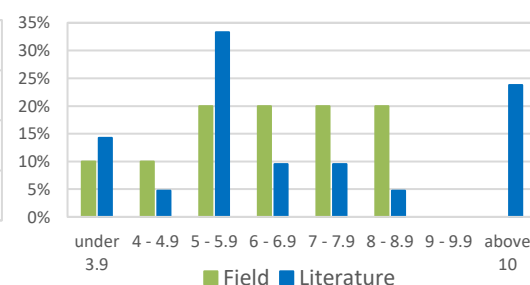


Figura 26: Largura da saleta (m) (% do total).



Fonte: NEVES et al. (2017).

Após consultadas às referidas fontes, optou-se que as dimensões do modelo genérico fossem representativas de um ambiente residencial, contexto em que possivelmente os dispositivos de sombreamento externos e fixos poderiam ser mais facilmente empregados. Em edificações comerciais é comum que os elementos de sombreamento sejam propostos em uma subestrutura, independente da fachada da edificação, como uma segunda pele, o que destoa do objetivo desta investigação. Portanto, o modelo genérico foi definido por um paralelepípedo de 3,0 m x 3,0 m x 2,7m (largura x comprimento x pé-direito), assim como o ambiente utilizado por Accioly, Oliveira e Bittencourt (2016).

3.1.2 Altura em que o modelo será ensaiado

O modelo genérico foi avaliado na situação térrea. O estudo do impacto dos dispositivos de sombreamento externos na ventilação natural em um modelo em altura incrementaria a complexidade da análise e da confecção do modelo físico reduzido, já que o mesmo precisaria reproduzir a avaliação em um módulo intermediário para que as influências na ventilação natural dos protetores pertencentes aos módulos superior e inferior também fossem consideradas.

Ademais, em edificações altas o impacto que detalhamentos nas fachadas, como por exemplo sacadas, implicam nos coeficientes de pressão devido ao vento já tem sido averiguado, por meio de simulações computacionais e ensaios em túneis de vento, pela literatura científica (HIEN; ISTIADJI, 2003; AI et al., 2011; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013; LOCHE et al., 2020).

3.1.3 Quantidade e posicionamento das aberturas

O fluxo de ar resultante de processos de ventilação natural (eólico, térmico ou ação conjunta) podem ocorrer por meio de ventilação cruzada – quando as aberturas estão dispostas em faces opostas ou adjacentes – ou unilateral – quando se encontram localizadas na mesma fachada (MARQUES DA SILVA, 2010).

Quanto ao posicionamento das aberturas, Lechner (2009) aponta que os maiores valores de pressão são encontrados no centro da face a barlavento. Bittencourt e Cândido (2008) enfatizam que em uma edificação térrea o máximo diferencial de pressão ocorre se as aberturas de entrada e saída forem localizadas nas máximas pressões positivas e negativas, respectivamente.

Tendo isso considerado, definiu-se que o modelo genérico apresentaria duas aberturas dispostas em faces opostas e centralizadas em suas larguras.

3.1.4 Relação entre as aberturas de entrada e saída de ar

Givoni (1976) discutiu o impacto da relação entre as aberturas de entrada e saída de ar na velocidade do ar interno em ambientes com ventilação cruzada e unilateral (Tabela 13). As variações (isoladas ou simultâneas) nas larguras das aberturas ocorreram em intervalos de 1/3 em relação à área da fachada. Os valores médios de velocidade do ar interno foram apresentados como um percentual em relação a velocidade externa do vento na altura da abertura. Em síntese, seus resultados indicaram que a influência dessa relação é mais preponderante em ambientes com ventilação cruzada e que ganhos efetivos na velocidade interna do ar podem ser alcançados a partir do incremento simultâneo das áreas de aberturas de entrada e saída de ar (Tabela 13).

Portanto, definiu-se que as janelas do modelo genérico seriam idênticas.

Tabela 13: Velocidade média interna do ar em relação à velocidade externa (em porcentagem) 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).

3.1.5 Tamanho das aberturas

As aberturas do modelo genérico são de 1,0 m x 1,0 m. 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 3.4. Análises qualitativas: visualizações em mesa d'água e elaboração de máscaras de sombra.

3.1.6 Peitoril das aberturas

A partir do levantamento de dados de projetos residenciais, verificou-se a preponderância de aberturas com peitoris de 1,1 m para os ambientes de maior permanência (sala e dormitórios). Logo, este valor foi adotado.

3.2 CLASSE II: DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO

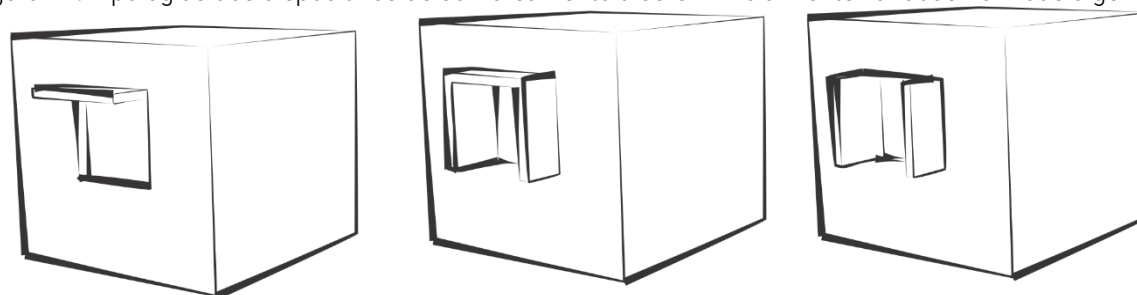
Nesta segunda classe são apresentadas as características dos dispositivos de sombreamento externos: (a) tipologia; (b) posicionamento em relação à abertura e por fim; (c) dimensões. Análises qualitativas para avaliar o impacto da variação destes parâmetros na ventilação natural e na insolação foram desenvolvidas por meio de ensaios na mesa d'água do Laboratório de Conforto Ambiental do IAU-USP e elaboração de máscaras de sombra. Os resultados destas análises foram compilados no subitem 3.4. Análises qualitativas: visualizações em mesa d'água e elaboração de máscaras de sombra.

3.2.1 Tipologias

Inicialmente, três tipologias de dispositivos de sombreamento externos foram selecionadas para compor as variações do modelo genérico: dispositivo de sombreamento horizontal, verticais e combinados (Figura 27). Estas tipologias são comumente apresentadas aos estudantes de Arquitetura e Urbanismo durante o ensino de geometria da insolação e dimensionamento de protetores solares, além de representarem formas de simples execução e fácil aplicabilidade em projetos arquitetônicos.

Nesta tese, objetiva-se observar e mensurar o impacto dos dispositivos de sombreamento na ventilação natural por meio das distribuições de pressão na envoltória do modelo genérico, logo elementos à frente da abertura alterariam as pressões e também, significativamente, o coeficiente de descarga (Cd) por impor uma resistência ao escoamento. Tendo isso considerado, neste momento, priorizou-se tipologias simples ao invés de complexas como por exemplo, *brise soleil* de múltiplas aletas, a fim de evitar essa somatória de impactos no desempenho da ventilação natural e, conseqüentemente, dificultar a identificação das suas origens. Posteriormente, com o domínio acerca da influência na distribuição de pressão causada por dispositivos de sombreamento simples, as complexidades tanto da análise quanto das geometrias dos protetores podem ser incrementadas.

Figura 27: Tipologias dos dispositivos de sombreamento a serem inicialmente variadas no modelo genérico.



Fonte: A autora (2020).

3.2.2 Posicionamento e dimensões dos dispositivos de sombreamento em relação à abertura

As definições de tais parâmetros foram embasadas pelas análises qualitativas: visualizações em mesa d'água e elaboração de máscaras de sombra e estão reunidas em um subitem particular (ver item 3.4).

3.3 CLASSE III: CONDIÇÕES DE CONTORNO

Nesta classe são apresentadas as condições de contorno em que o modelo genérico foi avaliado, tais como: (a) rugosidade do terreno; (b) exposição e; (c) ângulos de incidência do vento.

3.3.1 Rugosidade do terreno

Conforme abordado na seção “Revisão Bibliográfica”, a rugosidade do terreno é função do tipo de superfície e dos obstáculos nela existentes, sendo que quanto maior a sua altura, menor é a velocidade aferida a uma mesma cota (ALLARD, 2002). A região, onde a força de atrito promovida por esta rugosidade é notada, compreende um faixa de velocidade de vento que varia de zero (no contato com a superfície) até a de escoamento livre, e é denominada Camada Limite Atmosférica (CLA) (MARQUES DA SILVA, 2010). Desta forma, diferentes rugosidades do terreno resultam em diferentes espessuras de CLA e, conseqüentemente, em gradientes de velocidade de vento também diversos.

Optou-se em considerar um terreno de baixa rugosidade (equivalente a uma área aberta) e de orografia plana. No entanto, essa premissa é passível de alteração, já que a caracterização da CLA utilizada nos ensaios em túnel de vento é consoante às possibilidades da ferramenta.

Ademais, os dados de pressão devido ao vento obtidos nas superfícies do modelo considerando um determinado tipo de terreno (orografia e rugosidade) podem ser corrigidos para outros cenários a partir de alterações nas respectivas velocidades de referência (valor aferido na cota de cobertura do modelo).

3.3.2 Exposição

Os coeficientes de pressão (C_p) devido ao vento dependem da forma da edificação, da sua porosidade, da direção de incidência do vento e da influência do entorno imediato (orografia, rugosidade e obstáculos) (MARQUES DA SILVA, 2010; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008). Loche et al. (2020), apontaram significativa influência do entorno nos valores de C_p e de ΔC_p para modelos de edificações altas com sacadas, avaliados nas condições com e sem entorno. Tominaga e Blocken (2015) indicaram uma redução de aproximadamente 30% na taxa de fluxo de ar de um modelo com ventilação cruzada ao incluir o impacto de vizinhança durante o ensaio. Ambos os estudos reforçam a importância de se considerar o entorno em uma avaliação de ventilação natural. No entanto, como o objetivo desta tese é apresentar regras gerais acerca do impacto de protetores solares nos C_p s e, conseqüentemente, na ventilação natural, optou-se por analisar o modelo genérico de forma isolada, a fim de minimizar a ação de impactos adicionais.

3.3.3 Ângulos de incidência do vento

O ângulo formado no sentido horário entre a direção de vento incidente e a normal da face a barlavento é denominado ângulo de incidência do vento. Este é determinante na força que o vento imprime sobre as superfícies do modelo e, conseqüentemente, na pressão estática resultante nas mesmas. Logo, nos ensaios em túnel de vento, os ângulos de incidência considerados foram de 0° a 90° , em intervalos de 15° , e 180° . Os dados para as demais situações podem ser deduzidos com base nas aferições realizadas, devido à simetria do modelo e das tipologias de dispositivos de sombreamento avaliadas.

3.4 ANÁLISES QUALITATIVAS: VISUALIZAÇÕES EM MESA D'ÁGUA E ELABORAÇÃO DE MÁSCARAS DE SOMBRA

Análises qualitativas foram possibilitadas a partir do uso da mesa d'água e da elaboração de máscaras de sombra sobrepostas a cartas solares. Estas investigações delinearão as definições de formato e dimensões tanto das aberturas do modelo genérico como dos dispositivos de sombreamento externos. É válido ressaltar que neste processo de tomada de decisões embora os aspectos de insolação fossem verificados, foram priorizados os de ventilação natural em razão do objetivo desta tese.

Os resultados das análises qualitativas são detalhados nos seguintes subitens: (a) visualizações do fluxo de ar a partir de ensaios em mesa d'água e; (b) elaboração de máscaras de sombra.

3.4.1 Visualizações do fluxo de ar a partir de ensaios em mesa d'água

As visualizações – do comportamento do fluxo de ar incidente e da sua distribuição no interior e entorno imediato do modelo genérico – por meio de ensaios em mesa d'água possibilitaram definições acerca das dimensões das aberturas, das profundidades dos dispositivos de sombreamento, além da investigação do impacto da variação do ângulo de incidência do vento.

A intenção foi caracterizar o fluxo de ar de forma qualitativa, de modo a identificar semelhanças e diferenças, e assim selecionar os casos mais relevantes. Desta forma, essa ferramenta auxiliou à tomada de decisões e à redução do número de ensaios no túnel de vento.

Esta análise foi dividida em duas etapas: (a) definições e avaliações experimentais e; (b) análises dos resultados.

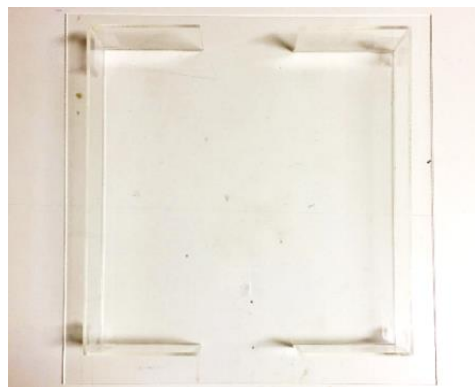
3.4.1.1 Definições e avaliações experimentais

Esta etapa consistiu na confecção dos modelos físicos, na definição da matriz de ensaios e nas avaliações experimentais propriamente ditas. Devido à limitação da ferramenta, em permitir visualizações apenas bidimensionais de um fenômeno que é tridimensional, foram propostos ensaios em planta e em corte longitudinal. Desta forma, dois modelos físicos reduzidos na escala de 1:10 foram confeccionados⁵¹.

As peças do modelo foram planificadas no *software AutoCad®* e cortadas a *laser* no Laboratório de Modelos, Maquetes e Plástica do IAU-USP, a fim de garantir uma alta precisão de corte. As maquetes foram confeccionadas em acrílico transparente de 3 mm por ser um material resistente, impermeável e não interferir nas visualizações. Em ambas as situações (modelo em planta ou em corte longitudinal) a altura das peças foi de 5 cm, já os planos, nos quais estas peças foram fixadas, apresentaram dimensões distintas de 40 cm x 40 cm e de 40 cm x 35 cm, respectivamente, devido à necessidade de apoio, na situação em corte, de uma das faces da maquete na borda do equipamento (Figura 28).

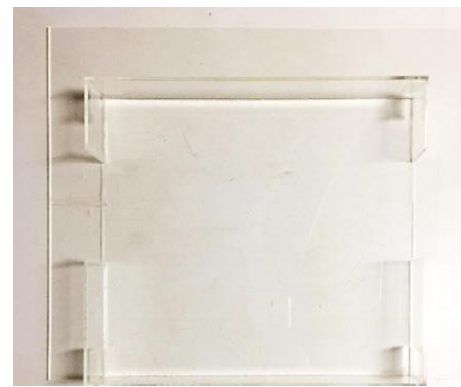
Figura 28: Modelos físicos reduzidos em planta (a) e em corte longitudinal (b) confeccionados em acrílico 3 mm para os ensaios em mesa d'água.

MODELO FÍSICO REDUZIDO EM PLANTA



(a)

MODELO FÍSICO REDUZIDO EM CORTE LONGITUDINAL



(b)

Fonte: A autora (2018).

Considerou-se nos ensaios que o modelo genérico em escala real (protótipo) tivesse janelas com distintas larguras (0,6 m; 1,0 m; 1,2 m; 1,6 m; 2,0 m), as quais foram avaliadas em planta; diferentes alturas (0,6 m e 1,0 m), ensaiadas em corte; e dispositivos de sombreamento externo horizontal ou verticais com variadas profundidades (0,1 m; 0,5 m e; 1,0 m), verificados em corte ou em planta, respectivamente (Tabela 14). Essas alterações foram possíveis,

⁵¹ O protótipo é caracterizado por dimensões de 3,0 m x 3,0 m x 2,7m (largura x comprimento x pé-direito), peitoril de 1,1 m e com aberturas em faces opostas e centralizadas na largura das mesmas.

entre um ensaio e outro, a partir da substituição de peças (das faces com aberturas, para a caracterizar as suas diferentes dimensões, e dos dispositivos de sombreamento), sendo a fixação das mesmas realizada com o uso de clorofórmio.

Tabela 14: Matriz de ensaios em mesa d'água (continua).


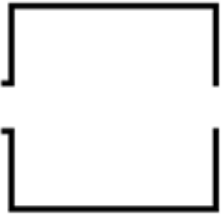
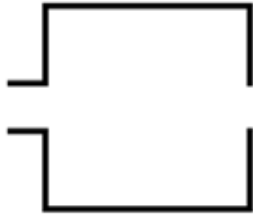
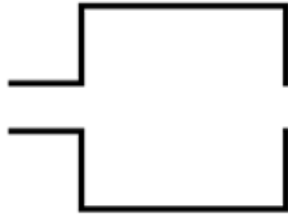
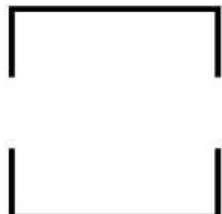
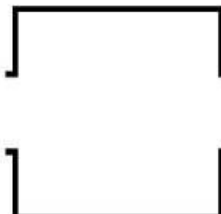
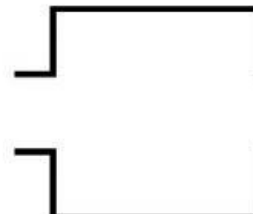
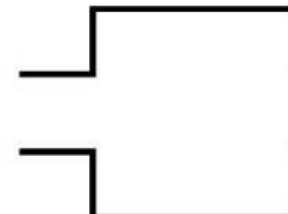
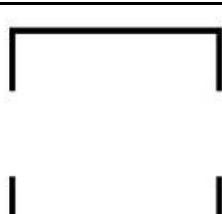
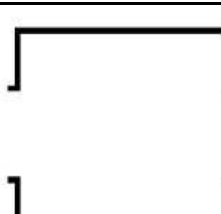
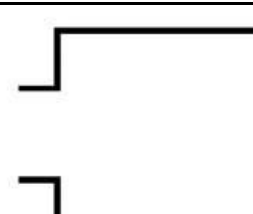
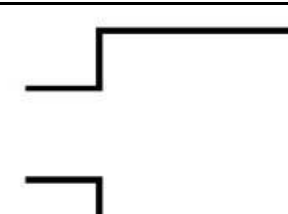
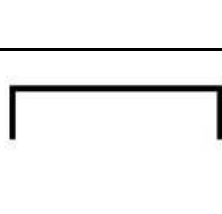
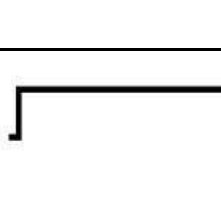
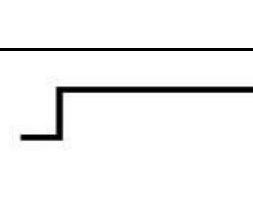
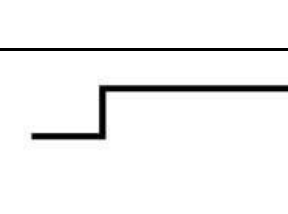

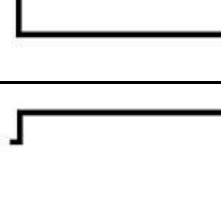
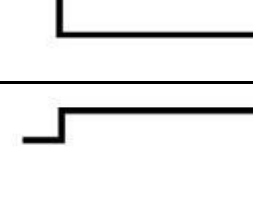
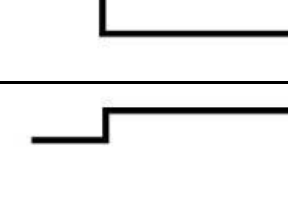
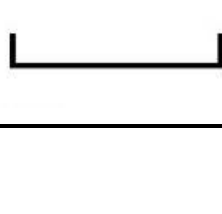
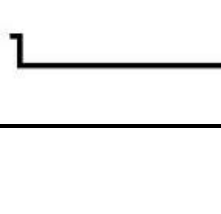
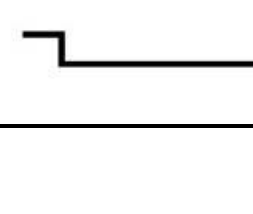
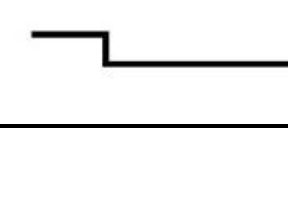



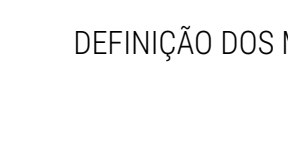
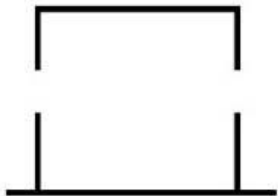


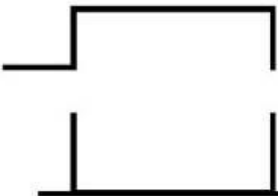

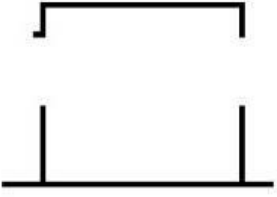
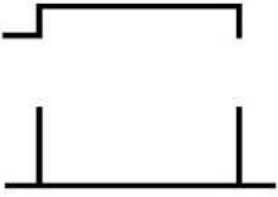
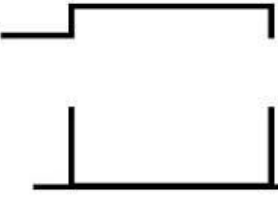
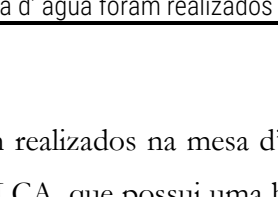
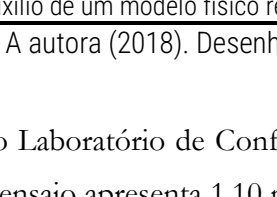
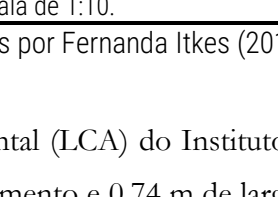
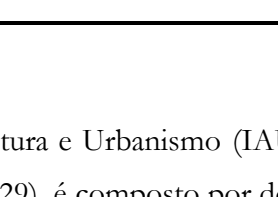
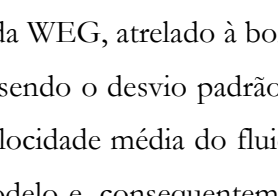
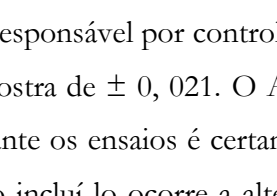
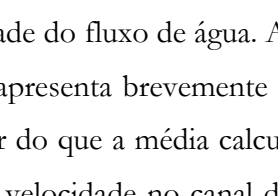
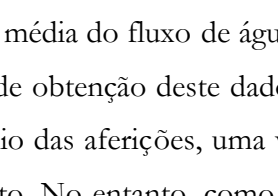
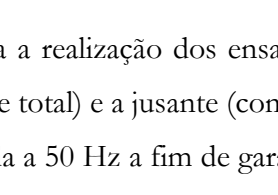
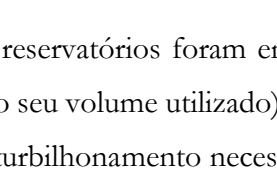
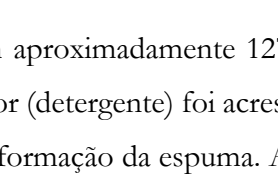
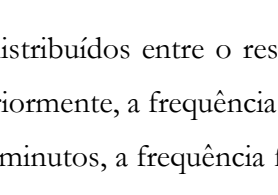
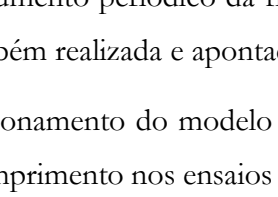
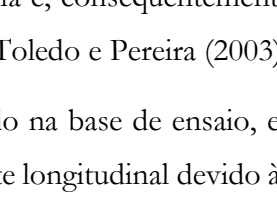
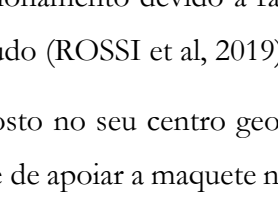
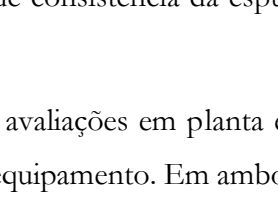
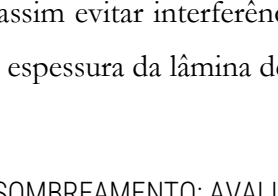
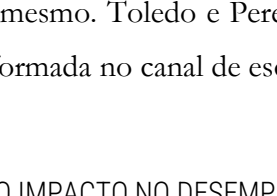
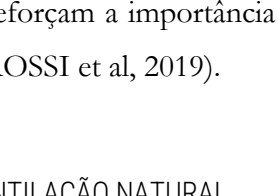
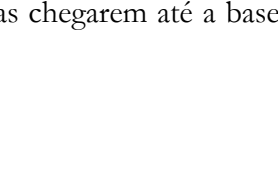




ENSAIOS EM PLANTA				
Vão	Caso sem proteção	Proteção solar (0,1m)	Proteção solar (0,5m)	Proteção solar (1,0m)
0,6 m				
				
1,0 m				
				
1,2 m				
				
1,6 m				
2,0 m				

Tabela 14: Matriz de ensaios em mesa d'água (conclusão).

ENSAIOS EM CORTE LONGITUDINAL				
0,6 m				
				
				
				
1,0 m				
				
				
				

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

Fonte: A autora (2018). Desenhos elaborados por Fernanda Itkes (2018).

Os ensaios foram realizados na mesa d'água do Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU-USP). O equipamento do LCA, que possui uma base de ensaio apresenta 1,10 m de comprimento e 0,74 m de largura (Figura 29), 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 0,75 CV e 60 Hz. Um variador de frequência, modelo CFW08 da WEG, atrelado à bomba é responsável por controlar a velocidade do fluxo de água. A velocidade média do fluxo de água calculada foi de 0,25 m/s, sendo o desvio padrão da amostra de $\pm 0,021$. O Apêndice A apresenta brevemente o processo de obtenção deste dado. É válido ressaltar que a velocidade média do fluido durante os ensaios é certamente menor do que a média calculada por meio das aferições, uma vez que foi aferida sem o modelo e, conseqüentemente, ao incluí-lo ocorre a alteração desta velocidade no canal do escoamento. No entanto, como as análises apresentadas são comparativas e qualitativas essa problemática não é preponderante (ROSSI et al, 2019).

Inicialmente, para a realização dos ensaios, os reservatórios foram enchidos com aproximadamente 127l de água distribuídos entre o reservatório a montante (volume total) e a jusante (com 1/3 do seu volume utilizado) e o indicador (detergente) foi acrescido. Posteriormente, a frequência do sistema elétrico foi elevada a 50 Hz a fim de garantir o turbilhonamento 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 de fluxo laminar. Durante os ensaios, houve a necessidade do aumento periódico da frequência e, conseqüentemente, do turbilhonamento devido à rápida perda de consistência da espuma, sendo esta situação também realizada e apontada por Toledo e Pereira (2003) em seu estudo (ROSSI et al, 2019).

Quanto ao posicionamento do modelo reduzido na base de ensaio, este foi disposto no seu centro geométrico nas avaliações em planta e no ponto médio do seu comprimento nos ensaios em corte longitudinal devido à necessidade de apoiar a maquete na borda do equipamento. Em ambos os casos, os modelos foram simulados com o plano (no qual as peças foram fixadas) para cima a fim de assegurar a inexistência de superfícies entre a maquete e o escoamento e, assim evitar interferências no mesmo. Toledo e Pereira (2003) reforçam a importância das aberturas chegarem até a base de ensaio, devido à pequena espessura da lâmina de água formada no canal de escoamento (ROSSI et al, 2019).

A incidência do vento a 0° , perpendicular à face a barlavento, foi adotada em todos os ensaios, assim como a opção de acoplar os dispositivos de sombreamento externos à abertura a barlavento. Por fim, a instalação de uma câmera digital em um sistema de tripé disposto sobre uma mesa de apoio (Figura 30) garantiu a captura de imagens e vídeos, posteriormente, utilizados na etapa de análise de resultados.

Figura 29: Mesa d'água do Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do IAU-USP. Figura 30: Sistema elaborado para a captura de imagens e vídeos dos ensaios em mesa d'água no LCA (IAU-USP).



Fonte: A autora (2018).

3.4.1.2 Análise de resultados

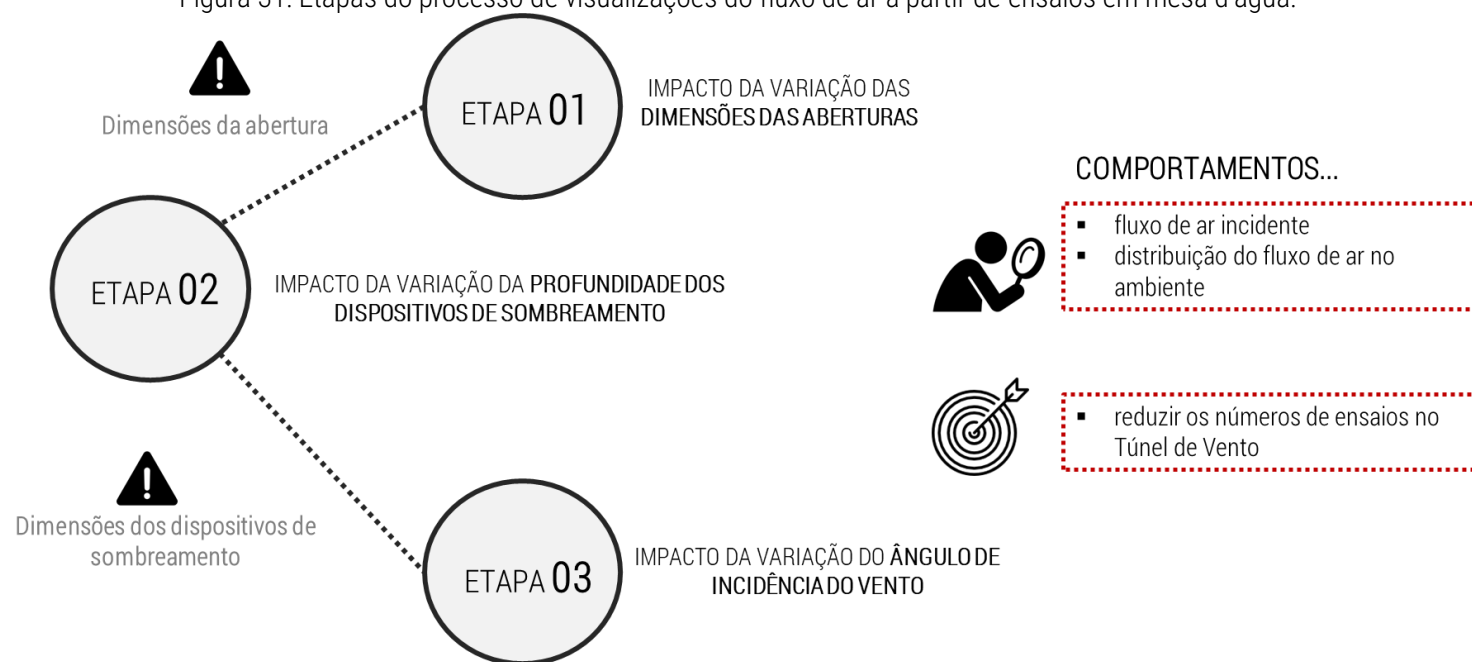
Para a etapa de análise de resultados foram utilizados: (a) fotografias; (b) vídeos e; (c) desenhos que simplificaram os padrões de fluxo de ar observados a partir dos meios anteriores. Accioly, Oliveira e Bittencourt (2016) enfatizam a importância da captura em vídeos e não somente em fotografias, em razão de imprecisões ou incoerências nas análises que a última técnica pode resultar ao registrar apenas um instante.

Primeiramente, objetivou-se uma estrutura de análise dos resultados, composta por três etapas (Figura 31), que reduzisse progressivamente os graus de incerteza e assim auxiliasse o processo de tomada de decisões, foram elas, impacto da variação: (1) das dimensões das aberturas; (2) da profundidade dos dispositivos de sombreamento e por fim, (3) do ângulo de incidência do vento.

Tendo isso considerado, partiu-se dos ensaios (em planta e em corte longitudinal) que avaliaram o impacto da variação de largura e altura das aberturas, respectivamente. Como resultado desta etapa, obteve-se as dimensões das aberturas do modelo genérico.

Na sequência, migrou-se para a avaliação do impacto dos dispositivos de sombreamento externos horizontal (ensaios em corte longitudinal) e verticais (ensaios em planta) exclusivamente para o vão definido na etapa anterior. A partir das comparações entre os resultados das opções com e sem protetores foi possível verificar o impacto da variação das profundidades dos mesmos, sendo priorizada dentre as possibilidades, a opção que apresentasse menor impacto na ventilação natural e ainda agregasse um potencial de bloqueio de insolação. A resultante desta fase consistiu na definição das profundidades dos protetores solares do modelo genérico.

Figura 31: Etapas do processo de visualizações do fluxo de ar a partir de ensaios em mesa d'água.



Fonte: A Autora (2018).

Findadas estas avaliações de caracterização do modelo genérico, os valores obtidos foram fixados e uma nova etapa foi incluída à matriz de ensaios inicial, na qual o ângulo de incidência do vento foi alterado (0° , 45° , 90° e 180°). Devido à limitação da mesa d'água em possibilitar apenas análises bidimensionais, estas avaliações foram possíveis somente para a situação em planta.

Em todas as avaliações as análises se pautaram na observação dos seguintes aspectos: (a) comportamento do fluxo incidente (jato de entrada) e; (b) comportamento e distribuição do fluxo no ambiente (tendências à formação de recirculações, sombra de vento, entre outros). Na sequência, o conteúdo de cada item é apresentado em detalhe.

(1) Avaliação do impacto das dimensões das aberturas

As avaliações acerca do impacto nas variações de largura das aberturas (dimensões equivalentes à 0,6 m; 1,0 m; 1,2 m; 1,6 m e 2,0 m) foram realizadas a partir dos ensaios em planta. Os resultados dos casos de 1,2 m e 1,6 m foram omitidos, em razão da semelhança entre os padrões observados aos casos de 1,0 m e 2,0 m, respectivamente.

A Tabela 15 reúne os resultados (em fotografias e desenhos representativos) para os vãos equivalentes à 0,6 m; 1,0 m e 2,0 m. No primeiro caso, devido ao regime de escoamento uniforme (na abertura), o fluxo de ar, ao adentrar no ambiente, desenvolve um movimento ondulatório que origina recirculações tanto na porção superior como inferior do ambiente analisado. Com o incremento da largura da abertura o fluxo de ar no interior do ambiente tendeu a se tornar mais “linear”. Zonas de sombra de vento mais definidas e extensas também foram observadas ao comparar os comportamentos dos fluxos de ar no interior dos ambientes com o menor e maiores vãos avaliados (ROSSI et al, 2019).

As variações de altura das aberturas (equivalentes aos vãos de: 0,6 m e 1,0 m) foram observadas a partir dos ensaios do modelo reduzido em corte longitudinal. Assim como nas avaliações em planta, o vão correspondente a 0,6 m resultou em um escoamento marcado por um movimento ondulatório

e por recirculações de ar decorrentes dele. Ao aumentar a altura do vão para 1,0 m, o fluxo de ar ficou mais linearizado. Menores recirculações de ar e zonas de sombra de vento mais definidas foram observadas no interior do ambiente. As diferenças nos padrões de escoamento, em relação à análise anterior, são justificadas pela ocorrência de fluxo exterior em apenas um dos lados do modelo, o que condiciona a pressão da face oposta (ROSSI et al, 2019).

A partir das avaliações do impacto do incremento das dimensões das aberturas, selecionou-se a opção quadrada de aresta de 1,0 m para caracterizar as aberturas do modelo genérico. Essa dimensão de vão além de ser mais representativa do valor adotado para ambientes de maior permanência das habitações brasileiras, apresentou o fluxo de ar mais “linear”, menores recirculações e sombras de vento mais definidas. É importante pontuar que zonas de recirculação do ar não necessariamente correspondem a uma ventilação mais eficaz (ROSSI et al, 2019).

Tabela 15: Avaliação do impacto da variação da largura da abertura para os vãos equivalentes à 0,6 m; 1,0 m e 2,0 m (continua).

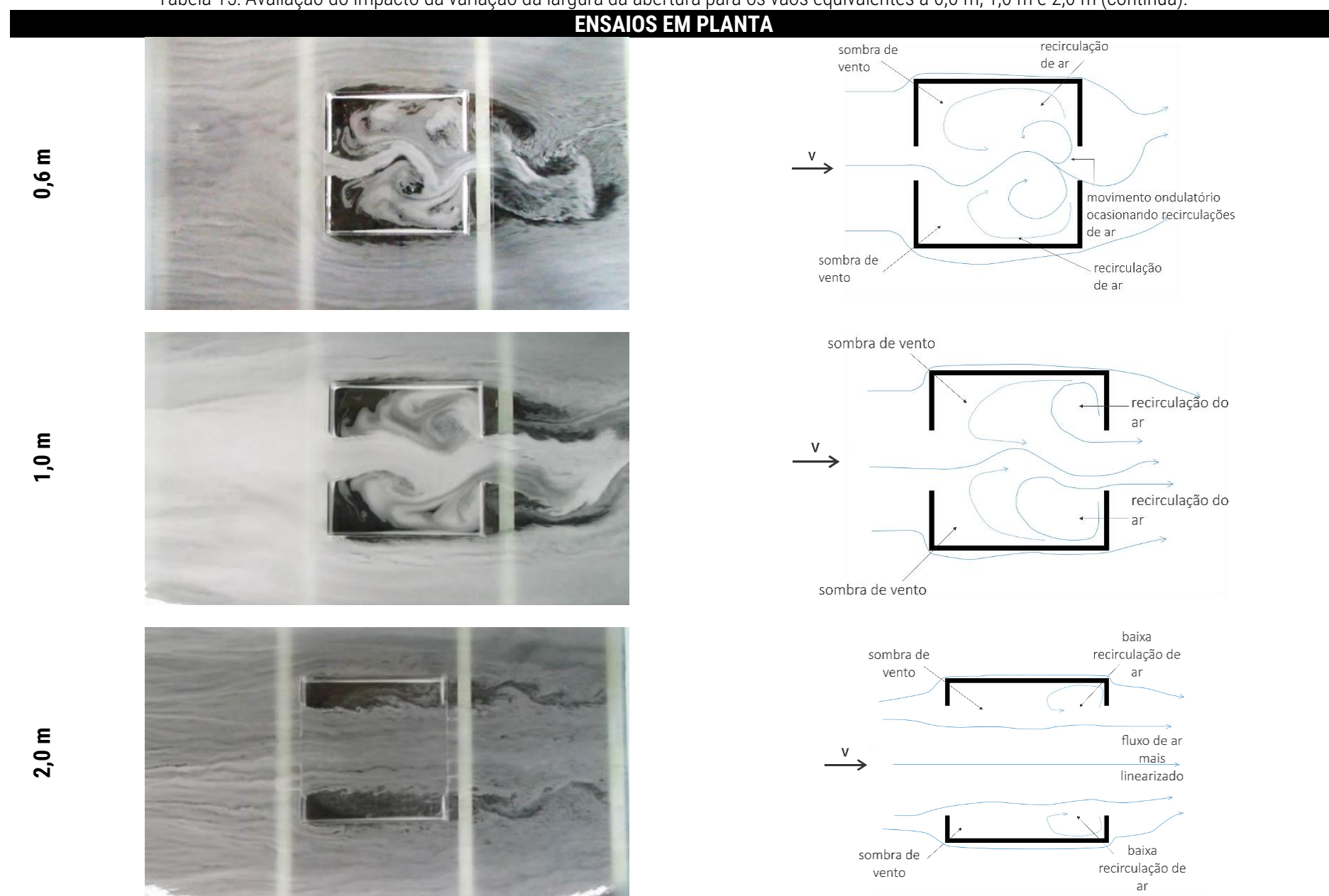
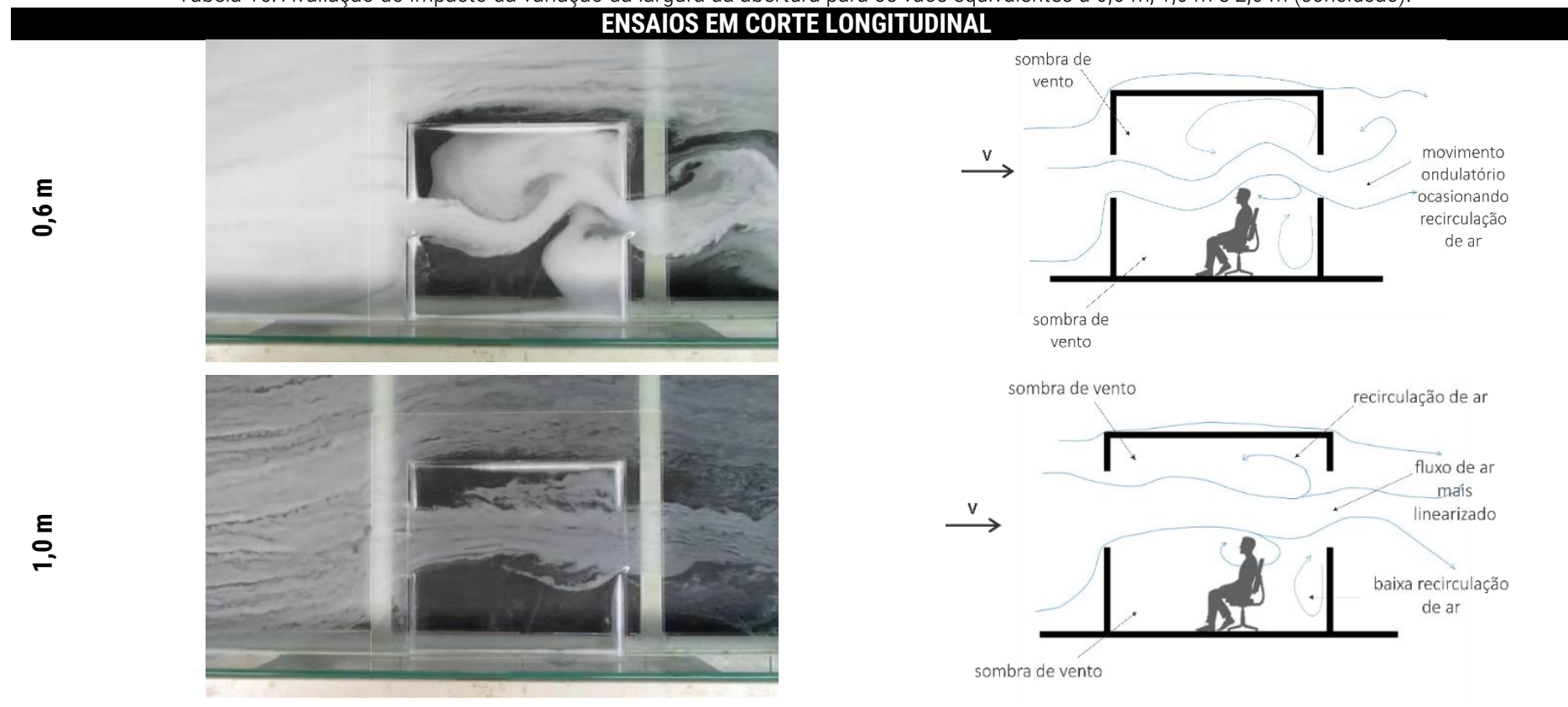


Tabela 15: Avaliação do impacto da variação da largura da abertura para os vãos equivalentes à 0,6 m; 1,0 m e 2,0 m (conclusão).



Fonte: A autora (2018). Desenhos elaborados por Fernanda Itkes (2018).

(2) Avaliação do impacto da profundidade dos dispositivos de sombreamento externos

As avaliações do impacto da profundidade dos dispositivos de sombreamento externos verticais (ensaios em planta) e horizontal (ensaios em corte longitudinal) foram realizadas para aberturas de vão de 1,0 m (dimensão definida na etapa anterior). O modelo reduzido foi ensaiado sem e com protetores de sombreamento na sua abertura a barlavento e as profundidades dos elementos (equivalentes à 0,1 m; 0,5 m e 1,0 m) foram variadas.

A partir dos ensaios em planta (Tabela 16), observou-se o impacto da variação da profundidade dos protetores verticais. A inclusão de elementos equivalentes a 0,1 m resultou em pouca influência no comportamento e distribuição do fluxo no interior do ambiente quando comparado ao modelo sem protetor. Com incrementos nas profundidades dos elementos de sombreamento (0,5 m e 1,0 m), o fluxo se tornou mais linear. Quanto ao padrão das recirculações, este é mantido em razão da dimensão da abertura e, conseqüentemente, do regime de escoamento não serem alterados (ROSSI et al, 2019).

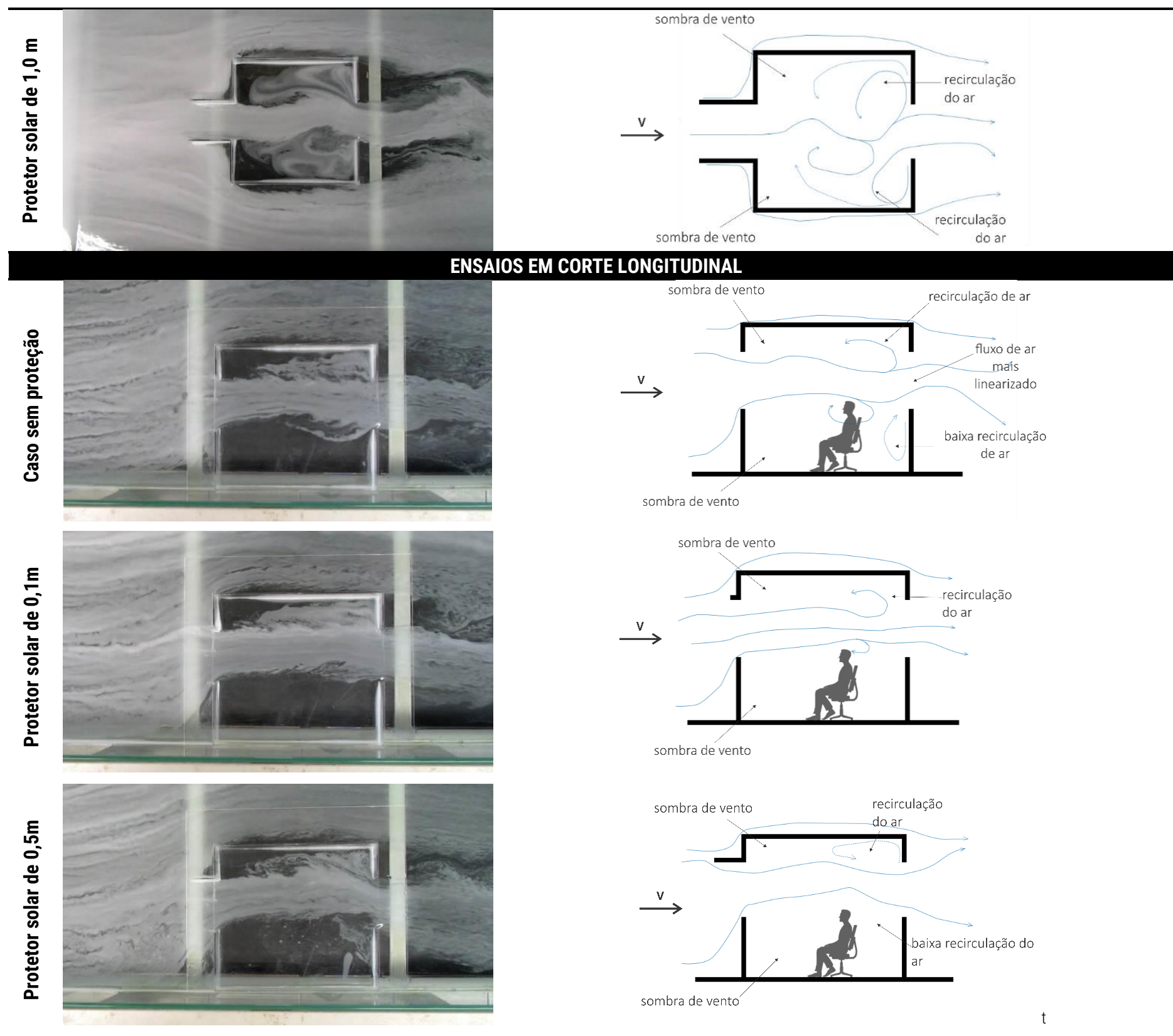
A partir dos ensaios do modelo reduzido em corte longitudinal (Tabela 16) o impacto do dispositivo de sombreamento horizontal foi avaliado de acordo com as mesmas variações e condições dos ensaios em planta. A inclusão de um elemento de sombreamento com profundidade equivalente à 0,1 m apresentou pouca influência no comportamento do fluxo de ar interno. Os protetores de maiores profundidades (0,5 m e 1,0 m) alteram o escoamento do jato de entrada e o tornaram mais assimétrico, dando origem a uma componente ascendente e, conseqüentemente, o encurvamento do jato no interior do ambiente. Em ambas as situações, o encontro do escoamento com a face a sotavento resultou em recirculações do ar, sendo estas maiores na parte superior do ambiente e menores na porção inferior. Ademais, o encurvamento do jato fez com que o fluxo de ar interno se mantivesse sempre acima

da zona do usuário e com formações de sombra de vento na parte superior, logo após a face a barlavento e na parte inferior do ambiente. Em síntese, quanto à variação na profundidade dos dispositivos de sombreamento pouca interferência foi notada com a inclusão dos elementos equivalentes à 0,1 m. Maiores influências foram observados nos de maiores dimensões (0,5 m e 1,0 m). Optou-se pelos protetores de 0,5 m por configurarem uma dimensão mais realista e de maior aplicabilidade em edificações brasileiras (ROSSI et al, 2019).

Tabela 16: Avaliações do impacto de protetores solares verticais e horizontais (continua).

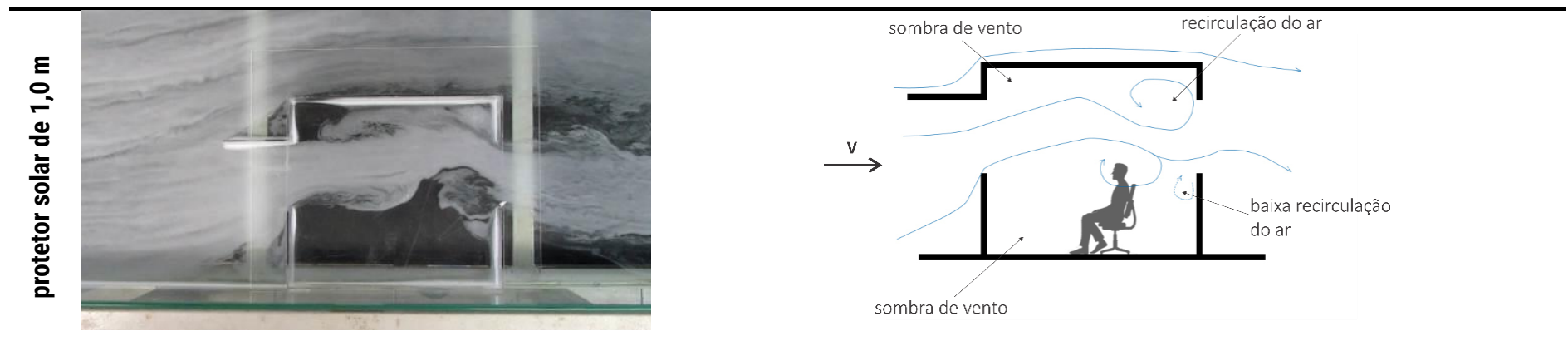
ENSAIOS EM PLANTA	
Caso sem proteção	
Protetor solar de 0,1m	
Protetor solar de 0,5m	

Tabela 16: Avaliações do impacto de protetores solares verticais e horizontais (continua).



t

Tabela 16: Avaliações do impacto de protetores solares verticais e horizontais (conclusão).



Fonte: Rossi et al. (2019)

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

Definidas as dimensões das aberturas do modelo genérico (1,0 m x 1,0 m) e a profundidade dos dispositivos de sombreamento externos (0,5 m), estas foram fixadas. O impacto da variação do ângulo de incidência do vento (0° , 45° , 90° e 180°) no fluxo de ar no interior do ambiente foi observado a partir de ensaios em planta (Tabela 17).

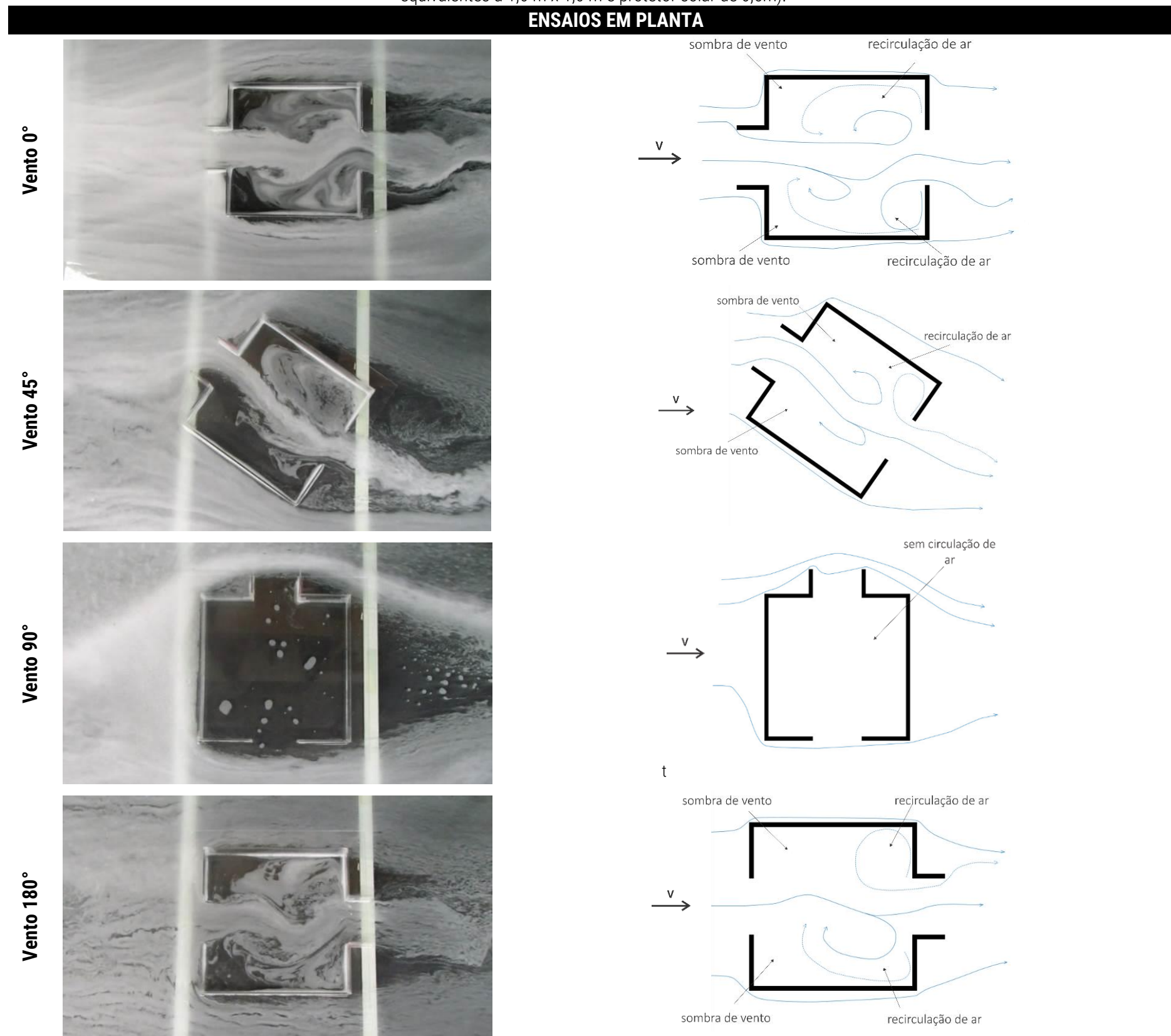
Para a incidência a 0° , a presença dos elementos de sombreamento verticais na abertura a barlavento auxiliou na “linearização” do jato de entrada. Esse padrão começa a ser perdido quando o escoamento atinge a porção central do ambiente, apresentando a partir deste momento um comportamento mais ondulatório que promove o desprendimento de recirculações de ar na parte superior e inferior do ambiente que se somam às recirculações decorrentes do encontro do escoamento com a face a sotavento.

Para a incidência oblíqua (a 45°), nota-se que um dos elementos de sombreamento promove uma separação do escoamento o que reduz praticamente em metade a largura da abertura disponível para a ventilação. Desta forma, ocorre uma inclinação do jato de entrada e, conseqüentemente, do de saída. As recirculações, em resposta também a esse comportamento, são mais notadas na parte superior do ambiente e na porção inferior apenas próxima a face a sotavento.

Para incidência a 90° , praticamente não houve circulação do ar no interior do ambiente, como já era esperado. O escoamento ao encontrar um obstáculo (face selada, sem aberturas) contorna-o retomando seu comportamento inicial a jusante. As arestas da própria geometria promovem a separação deste escoamento. Logo, ambas as aberturas ficam expostas a situações muito semelhantes de distribuição de pressão, sendo o diferencial entre elas próximo a zero, portanto o fluxo é nulo. O pequeno indício de circulação proveniente da abertura sem protetor em direção à abertura com sombreamento, pode ser decorrente de um pequeno diferencial de pressão entre as faces ocasionados justamente pela presença dos elementos, gerando um fluxo reverso.

Por fim, para incidência de vento a 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 é 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 à presença dos protetores solares na abertura de saída, o fluxo de ar tende a ficar mais linearizado.

Tabela 17: 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 $1,0\text{ m} \times 1,0\text{ m}$ e protetor solar de $0,5\text{ m}$).



Fonte: A autora (2018). Desenhos elaborados por Fernanda Itkes (2018).

Em síntese, a mesa d'água teve a sua potencialidade confirmada como ferramenta de auxílio à tomada de decisões assim como em outros estudos (TOLEDO; PEREIRA, 2003; TOLEDO; PEREIRA, 2005; ACCIOLY; OLIVEIRA; BITTENCOURT, 2016; RAMOS; MATTIA; LUKIANTCHUKI, 2017; MUNDHE et al., 2018; XAVIER et al., 2020; ALMEIDA et al., 2020), por ser um equipamento acessível, e que fornece respostas instantâneas e extremamente visuais. Desta forma, a partir de avaliações qualitativas e comparativas, a mesma atendeu o objetivo proposto em auxiliar na investigação do impacto (de algumas características do modelo genérico) no comportamento e na distribuição do fluxo de ar no seu interior; viabilizou uma redução da matriz de ensaios no túnel de vento e; conseqüentemente, o uso mais racional desta ferramenta de avaliação robusta, de alto custo e pouco acessível.

No entanto, é importante considerar que a extrapolação (para escala real) de algumas conclusões obtidas por meio da mesa d'água devem ser feitas com parcimônia. Primeiramente, precisa-se atentar para que não haja a adoção da somatória das conclusões provenientes de ensaios bidimensionais na tentativa de visualizar uma resultante tridimensional do fenômeno avaliado. Outra questão consiste na baixa velocidade média do fluido empregada que imprime, em algumas situações, comportamentos inerentes ao escoamento mais uniforme, que é irreal de ser alcançado em situações concretas de aerodinâmica das edificações. Esse tipo de incoerência também pode ocorrer em ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento, principalmente quando o modelo físico é muito pequeno ou em geometrias complexas. Entretanto, no túnel de vento, essas incoerências podem ser reduzidas ou solucionadas a partir da alteração da velocidade de vento utilizada durante os ensaios.

Na mesa d'água, a qualidade da visualização é função da baixa velocidade média do fluido, logo essa possibilidade de ajuste é inexistente. Por fim, deve-se considerar as interferências das bordas do equipamento no escoamento (efeito de blocagem). Em um estudo qualitativo e comparativo como o aqui apresentado, as conseqüências deste efeito não são impeditivas como seriam em ensaios com fins quantitativos. No entanto, ainda sim é importante considerar que o estrangulamento do escoamento, promovido entre modelo físico reduzido e as bordas do equipamento, modifica a sua velocidade e, conseqüentemente, as pressões nas superfícies do modelo, alterando principalmente o comportamento das bolhas de separação e do jato de saída.

Assim, a partir dos ensaios em mesa d'água foi possível definir as dimensões das aberturas do modelo genérico (1,0 m x 1,0 m) e a profundidade dos elementos de sombreamento (0,5 m). Quanto às tipologias de sombreamento, estabeleceu-se que três variações caracterizariam a matriz de ensaios no túnel de vento, sendo elas: com dispositivo de sombreamento horizontal, verticais e combinado. Esta última por ser a combinação das tipologias anteriores não teve seu impacto observado a partir dos ensaios em mesa d'água devido à limitação da ferramenta de possibilitar análises apenas bidimensionais.

Como já citado, em razão do objetivo desta tese, as análises de insolação são secundárias, realizadas para fins de verificação e detalhados apenas o suficiente para embasar ou justificar as escolhas realizadas. Desta forma, findadas as definições, máscaras de sombra foram elaboradas para verificar o potencial de bloqueio da insolação promovido pelas tipologias selecionadas.

3.4.2 Elaboração de máscaras de sombra

Para a elaboração de máscaras de sombra, algumas variáveis foram fixadas a fim de reduzir a complexidade das análises. Desta forma, nos ensaios no túnel de vento do IPT, estabeleceu-se que independente da tipologia, os elementos de sombreamento apresentariam profundidades equivalentes a 0,5 m; seriam locados no limiar das aberturas e; suas dimensões de comprimento não ultrapassariam as do vão. Fixadas estas condições, utilizou-se o

transferidor auxiliar para verificar os ângulos verticais frontais (α), horizontais (β) e verticais laterais (γ), e assim, as máscaras de sombra correspondentes a cada tipologia foram determinadas.

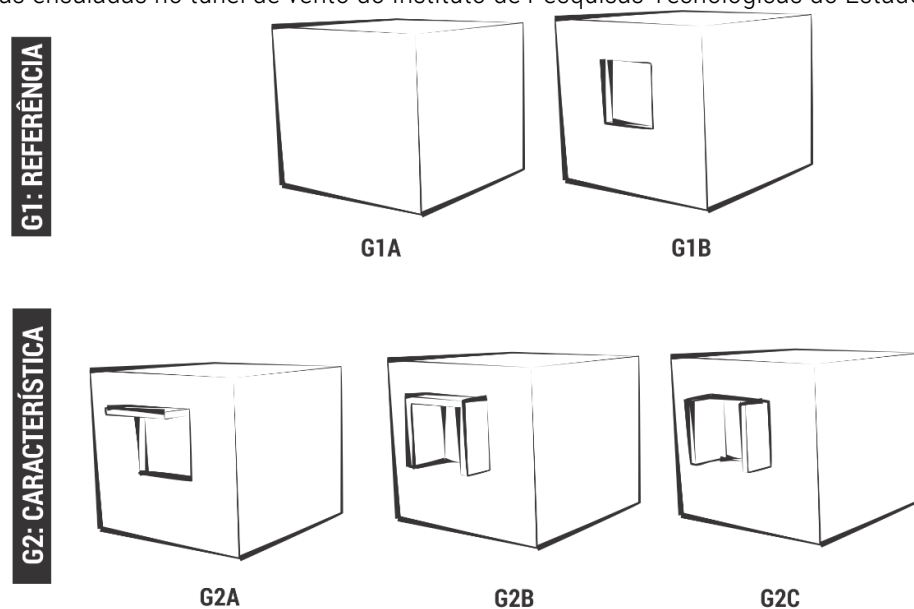
A fim de visualizar a aplicabilidade e o potencial de bloqueio da insolação em território brasileiro das tipologias de sombreamento propostas, as máscaras de sombra elaboradas foram aplicadas sobre as cartas solares para latitudes de 4°N a 32°S, considerando intervalos de 4°. Para configurar um exemplo projetual, orientou-se a norte a abertura do modelo genérico, na qual os dispositivos de sombreamento externos seriam acoplados. Esta orientação foi priorizada em razão do seu significativo ganho solar durante o ano em grande parte do país. Na situação de latitude 4°N (Hemisfério Norte), as verificações foram feitas para orientação Sul.

Nos ensaios no túnel de vento do LNEC, outras tipologias de sombreamento foram consideradas, atendendo ao mesmo conjunto de critérios e são descritas, na sequência, no subitem 3.6. Assim como nos ensaios realizados no IPT, máscaras de sombra auxiliaram a definição de dimensões, formatos e posicionamento dos dispositivos de sombreamento externos. As máscaras de sombra das diferentes tipologias de sombreamento (consideradas nos ensaios nos túneis de vento do IPT e LNEC) são apresentadas no Apêndice B e, as descrições das tipologias de sombreamento, no Apêndice C.

3.5 DEFINIÇÕES PARA OS ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO DO IPT

Quanto à caracterização dos dispositivos de sombreamento, para os ensaios no túnel de vento do IPT, três variações foram definidas. Desta forma, a matriz de ensaios foi composta por dois grupos tipológicos: G1: Referência e G2: Dispositivos (Figura 32). Assim, o primeiro grupo englobou o modelo genérico (selado, G1A e com aberturas, G1B) para configurarem as referências de análise para a mensuração do impacto dos dispositivos de sombreamento. Já o segundo grupo, foi composto pelo acoplamento na abertura a barlavento do modelo genérico de um dispositivo de sombreamento horizontal (G2A); verticais e horizontal (G2B) e verticais (G2C) (Figura 32).

Figura 32: Tipologias ensaiadas no túnel de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).



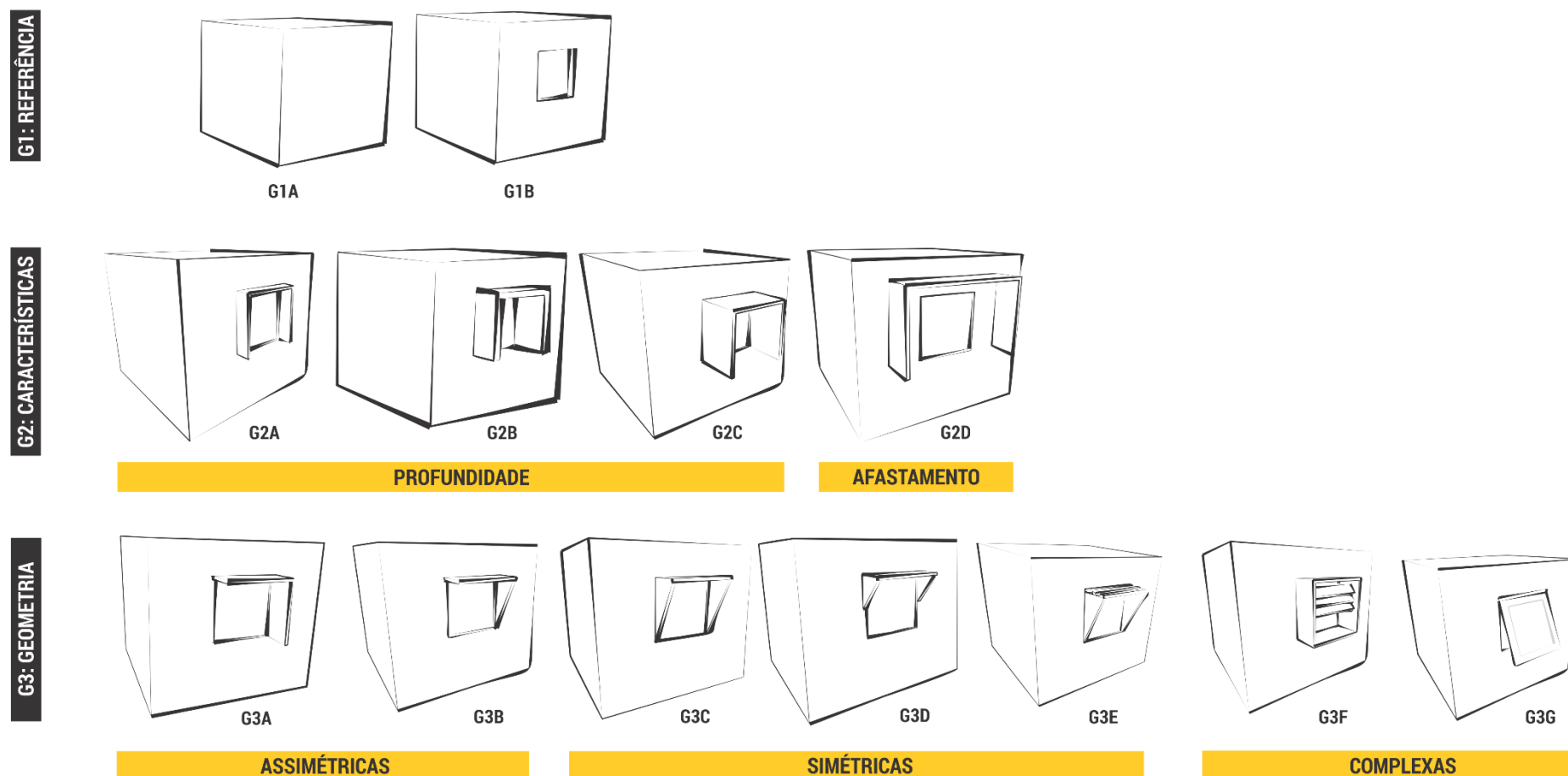
Fonte: A Autora (2020).

3.6 DEFINIÇÕES PARA OS ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO DO LNEC

Para os ensaios realizados no túnel de vento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), houve a expansão das tipologias de dispositivos de sombreamento externos consideradas. As proposições destas novas tipologias foram realizadas a partir das conclusões obtidas das análises experimentais feitas no túnel de vento do IPT, detalhadas na seção “5 Análise dos Resultados”.

Deste modo, em virtude dos aspectos a serem explorados (complexidade e impacto no desempenho da ventilação natural), estabeleceu-se três grupos tipológicos (Figura 33): (1) referências, ou seja, modelo genérico selado e com aberturas; (2) características, com variações nas dimensões e no posicionamento dos elementos e; (3) geometrias, com alterações formais dos protetores. Todas as tipologias foram ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas.

Figura 33: Tipologias ensaiadas no túnel de vento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).



Fonte: A Autora (2020).

Grupo 01: Tipologias de referência

As tipologias **sem** dispositivos de sombreamento – modelo genérico totalmente selado (**G1A**) e com aberturas (**G1B**) – caracterizaram o primeiro grupo de análise (G1: Referências) e foram fixadas como bases de comparação para a avaliação do impacto (dos protetores) na ventilação natural.

Grupo 02: Tipologias com variações nas características dos dispositivos de sombreamento

O segundo grupo (G2: Características) foi composto por tipologias com variações restritas às características dos protetores, tais como profundidade e posicionamento em relação à abertura.

Quanto à profundidade dos elementos, partiu-se da tipologia **G2B** (profundidade equivalente a 0,50 m no protótipo) e, propuseram-se cenários de redução e de incremento da dimensão inicial. Desta forma, as profundidades consideradas foram equivalentes a: 0,25 m; 0,50 m e 0,75 m, e identificadas como **G2A**, **G2B** e **G2C**, respectivamente. A **G2C** foi mantida na matriz como um exemplo teórico, pois ainda que apresentasse uma máscara de sombra demasiada e dimensões pouco aplicáveis a projetos arquitetônicos, ela viabilizou e enriqueceu a discussão acerca do impacto do incremento progressivo da profundidade dos elementos na ventilação natural.

Quanto ao posicionamento em relação à abertura, realocaram-se⁵² os elementos da **G2B** a 0,225 m⁵³ do topo e 0,45 m das laterais do vão, definindo a tipologia **G2D**. Para esta configuração, máscaras de sombra de elementos com profundidades equivalentes a 0,25 m e 0,50 m no protótipo foram estudadas, sendo a segunda opção selecionada em razão do baixo potencial de proteção à radiação solar proporcionado pela primeira.

Grupo 03: Tipologias com variações nas geometrias dos dispositivos de sombreamento

O terceiro grupo (G3: Geometrias) foi composto por tipologias, cujas variações ficaram restritas aos aspectos formais dos protetores, sendo categorizadas em três subgrupos: (a) assimétricas, (b) simétricas e; (c) complexas.

Os resultados preliminares indicaram uma significativa variação de pressão, no sentido da largura da face a barlavento do modelo genérico, nas tipologias com elementos verticais (G2B e G2C). Somado a essa informação, o comportamento irregular (de velocidade e de direção predominante) do vento ao longo dos dias ou anos, pode resultar em requisições contrastantes de ventilação natural dentro de um mesmo cenário. Portanto, optou-se por incluir propostas de geometrias assimétricas, que captassem ou bloqueassem o vento, em função do seu ângulo de incidência.

Assim, tendo como base a tipologia G2B, duas assimétricas foram propostas: **G3A** e **G3B**. Em ambas as geometrias, retirou-se o elemento vertical à direita da abertura, a fim de caracterizar uma situação de exposição à radiação solar proveniente da orientação leste e à proteção na situação oposta (oeste). Essa alteração definiu a tipologia **G3A**. O acréscimo de um chanfro longitudinal a 45° no elemento à esquerda da abertura configurou a tipologia **G3B**. Esta pequena modificação (chanfro) impacta o padrão de ventilação natural, ao resultar em uma diferente configuração de distribuição de pressão, sem alterar a máscara de sombra efetiva em relação à primeira.

⁵² A realocação dos elementos foi condicionada pelo posicionamento das tomadas de pressão.

⁵³ Dimensões equivalentes ao protótipo.

O segundo subgrupo englobou tipologias, com dispositivos de sombreamento simétricos, identificadas por **G3C**; **G3D** e **G3E**. A tipologia **G3C** apresentou seus elementos verticais chanfrados a 45°, ocupando a totalidade da altura da abertura. Na **G3D**, estes dispositivos verticais tiveram suas alturas reduzidas e passaram a ocupar metade do vão. Por fim, na **G3E**, os protetores verticais chanfrados abrangeram novamente a totalidade da altura da abertura e propôs-se uma alteração no protetor horizontal, subdividindo-o, em sua profundidade, em aletas equivalentes à 0,10 m e espaçadas entre si nesta mesma dimensão. Quanto às máscaras de sombra efetivas correspondentes, pouca ou nenhuma variação foi verificada.

O terceiro e último subgrupo (geometrias complexas) diverge dos anteriores ao não apresentar a tipologia G2B como norteadora das variações formais propostas. Neste momento, dois exemplares emblemáticos das Arquiteturas Brasileira e Portuguesa, seja pela presença em obras relevantes na História da Arquitetura ou seja pela recorrência do uso, foram incluídos na matriz de ensaios e nomeados como **G3F** e **G3G**, respectivamente.

A tipologia **G3F** reproduziu um dos módulos do *brise-soleil* desenvolvido com auxílio de Le Corbusier para o Ministério de Educação e Saúde⁵⁴ (Figura 34). A partir do conhecimento das dimensões reais do módulo⁵⁵, estas foram adequadas ao protótipo e, conseqüentemente, ao modelo reduzido, de modo a garantir a coerência (formal e da taxa de porosidade) em relação à referência.

Por fim, a última tipologia, **G3G**, remeteu-se a um elemento muito recorrente na Arquitetura Portuguesa e também presente em obras da Arquitetura Brasileira. A estore de correr projetável ou persiana Copacabana (Figura 35), como conhecida em Portugal e no Brasil, respectivamente, é usualmente metálica, locada no exterior da janela e apresenta aletas perfuradas que deslizam em uma subestrutura, permitindo maior ou menor permeabilidade. De modo análogo a G3F, buscou-se assegurar que o modelo experimental reproduzisse aspectos formais e a taxa de porosidade semelhante ao real.

Figura 34: *Brise-soleil* do Ministério de Educação e Saúde.



Figura 35: Estore de correr projetável ou persiana Copacabana.



Fonte: Acervo pessoal (2020).

⁵⁴ Edifício icônico da primeira fase da Arquitetura Moderna Brasileira, localizado na cidade do Rio de Janeiro.

⁵⁵ Informações obtidas a partir pesquisas historiográficas (artigos, livros que apresentassem detalhes do projeto do edifício) e visita local.

3.7 SÍNTESE DO ITEM

Esse item apresentou, detalhadamente, a caracterização dos cenários ensaiados, posteriormente, nos túneis de vento do IPT e LNEC. Estes ensaios, recorreram-se a uma base comum, nomeada de modelo genérico com dimensões **3,0 m x 3,0 m x 2,7 m** (largura x comprimento x pé-direito). **Dois aberturas idênticas, quadradas (1,0 m de aresta) e posicionadas na metade da largura de faces opostas** representaram uma situação clássica de ventilação cruzada. O peitoril foi fixado em **1,1 m**, devido à recorrência deste valor em projetos arquitetônicos. Por fim, adotou-se a **configuração térrea** para as análises a fim de reduzir a sua complexidade e as interferências de parâmetros adicionais.

Os ângulos de incidência de vento variaram de **0° a 90° em intervalos de 15° e 180°** nos ensaios conduzidos no IPT, totalizando uma matriz composta por **cinco tipologias e 40 cenários**. Já, no LNEC, as rotações variaram de **0° a 90°** para configurações simétricas e de **-90° a 90°** para as assimétricas. Em ambas as situações o intervalo de aferições foi de 15°, resultando em uma matriz de **13 tipologias e 192 cenários**.

As descrições completas acerca ensaios realizados em ambas as Instituições são apresentadas na próxima seção “4. Ensaios em túnel de vento”.



4

ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

As many environmental wind problems around buildings are due to the shape of buildings, location of openings or relative position of buildings, decision makers in the early stages of development, such as planners and architects, can benefit greatly from inexpensive wind tunnel studies at the preliminary design stage. Such studies can help designers identify serious wind problems at a stage when basic building concepts can be changed without prohibitive expense and avoid embarrassing and costly changes in the final design stage.

(AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977, p.V)

Esta seção tem como objetivo descrever os ensaios realizados nos túneis de vento do Laboratório de Vazão (Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), em São Paulo, Brasil, sob supervisão dos Engenheiros Gilder Nader e Gabriel Borelli Martins e do Departamento de Estruturas (Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Lisboa, Portugal, sob supervisão do Engenheiro Fernando Marques da Silva.

Recorrendo-se à mesma base (modelo genérico), ensaios quantitativos e/ou qualitativos possibilitaram investigar o impacto dos dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural, variando-se suas dimensões, formatos e posicionamentos. Avaliaram-se, a partir destes ensaios⁵⁶, (a) a distribuição de pressão externa, para o modelo selado e com aberturas, para várias incidências do vento e; (b) a velocidade média do fluxo de ar interno na abertura a sotavento em relação à externa. O comportamento (qualitativo) do fluxo de ar interno foi observado como dado complementar para o melhor entendimento das análises quantitativas.

Desta forma, as descrições dos equipamentos e ensaios percorridos em ambas as Instituições são apresentadas de forma individualizada, mas seguindo a mesma estrutura de exposição do conteúdo⁵⁷, composta pelos seguintes subitens: (1) descrição dos túneis de vento (do IPT e do LNEC); (2) apresentação das condições de contorno e da matriz de ensaios; (3) confecção e preparação do modelo físico reduzido; (4) ensaios quantitativos e qualitativos; (5) calibração dos instrumentos e; (6) pós-processamento dos dados.

⁵⁶ A distribuição de pressão externa foi um parâmetro observado nos ensaios realizados em ambas as Instituições, enquanto que as avaliações acerca da velocidade média relativa e do comportamento de distribuição do fluxo de ar interno foram exclusivas das experimentações desenvolvidas no LNEC. Ademais, nos ensaios do IPT, os modelos com dispositivos de sombreamento foram avaliados apenas na configuração de modelo genérico com aberturas.

⁵⁷ Na descrição do IPT os tópicos acerca dos ensaios qualitativos e calibração dos equipamentos foram omitidos, devido à inexistência do primeiro e da não participação da pesquisadora no processo do segundo.

4.1 TÚNEL DE VENTO DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA DO IPT

Em atividade desde 2002, o túnel de vento do IPT (Figura 36 a) se configura como o maior da América Latina, com 28 m de comprimento e 6 m² de área de seção transversal de ensaio, sendo esta de 3,0 m x 2,0 m (largura x altura) (Figura 36 b e c). Essa ferramenta experimental é intensamente 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).

Figura 36: (a e b) Túnel de vento de camada limite atmosférica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo [IPT]; (c) área da seção transversal de ensaio.



(a)



(b)



(c)

Fonte: A autora (2019).

4.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E MATRIZ DE ENSAIOS

As condições de contorno consistiram nas definições: (1) da escala do modelo reduzido a fim de assegurar a sua semelhança geométrica com o protótipo (escala real); (2) da matriz de ensaios, que reuniu as tipologias e os cenários considerados e; (3) da camada limite atmosférica e, conseqüentemente, do perfil de velocidades utilizado nos ensaios.

4.2.1 Escala do modelo reduzido

No item “Revisão bibliográfica” foi elucidada a importância de se respeitar o limite de obstrução da área da seção transversal de ensaio do túnel de vento ocasionado pela máxima projeção do modelo reduzido. Segundo Toledo (1999), a área de obstrução não deve ser maior do que 5%. Além disso, Blessmann (1983) enfatiza que a semelhança geométrica (escala e orientação em relação ao escoamento) entre os sistemas real (protótipo) e o experimental (modelo reduzido) deve ser assegurada.

Tendo isso considerado, foi calculada a escala avaliando duas situações: (1) quando a incidência do vento é perpendicular à fachada do modelo (Tabela 18) e; (2) quando a incidência é oblíqua (45°) às suas faces (Tabela 19), sendo esta última caracterizada como a área máxima de projeção e, portanto, a ser considerada na definição da escala. Após esta verificação foi definido que o modelo reduzido seria confeccionado na escala de 1:7,5 (Tabela 20).

Tabela 18: 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 DO PROTÓTIPO (m)		DIMENSÕES DO MODELO (m)
altura	2,70	0,36
largura	3,00	0,40
comprimento	3,00	0,40
Área da seção de ensaio (m ²):		6,00
Área frontal do modelo (m ²):		0,14
Obstrução da seção de ensaio (%):		2,40

Fonte: A autora (2018).

Tabela 19: 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 (45°) às suas fachadas.

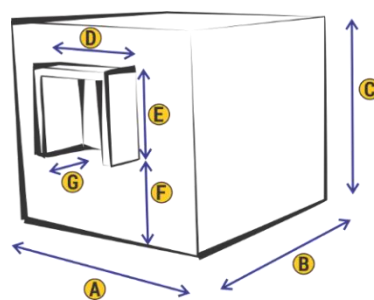
ESCALA 1: 7,5		
DIMENSÕES DO PROTÓTIPO (m)		DIMENSÕES DO MODELO (m)
altura	2,70	0,36
largura	3,00	0,40
comprimento	3,00	0,40
Área da seção de ensaio (m ²):		6,00
Área frontal do modelo (m ²):		0,20
Obstrução da seção de ensaio (%):		3,39

Fonte: A autora (2018).

4.2.2 Matriz de ensaios: tipologias e cenários

Cinco tipologias (Figura 37) – modelo genérico selado (**G1A**); modelo genérico com aberturas (**G1B**); com dispositivo de sombreamento horizontal (**G2A**); combinados (horizontal e verticais) (**G2B**) e verticais (**G2C**) – foram avaliadas para oito ângulos de incidência do vento (**de 0° a 90° com intervalos de 15°, além de 180°**), resultando em uma matriz de 40 cenários. A descrição das tipologias, em detalhe, pode ser conferida no Apêndice C.

Tabela 20: Dimensões do modelo genérico (em m) na situação de protótipo (escala real) e de modelo reduzido.

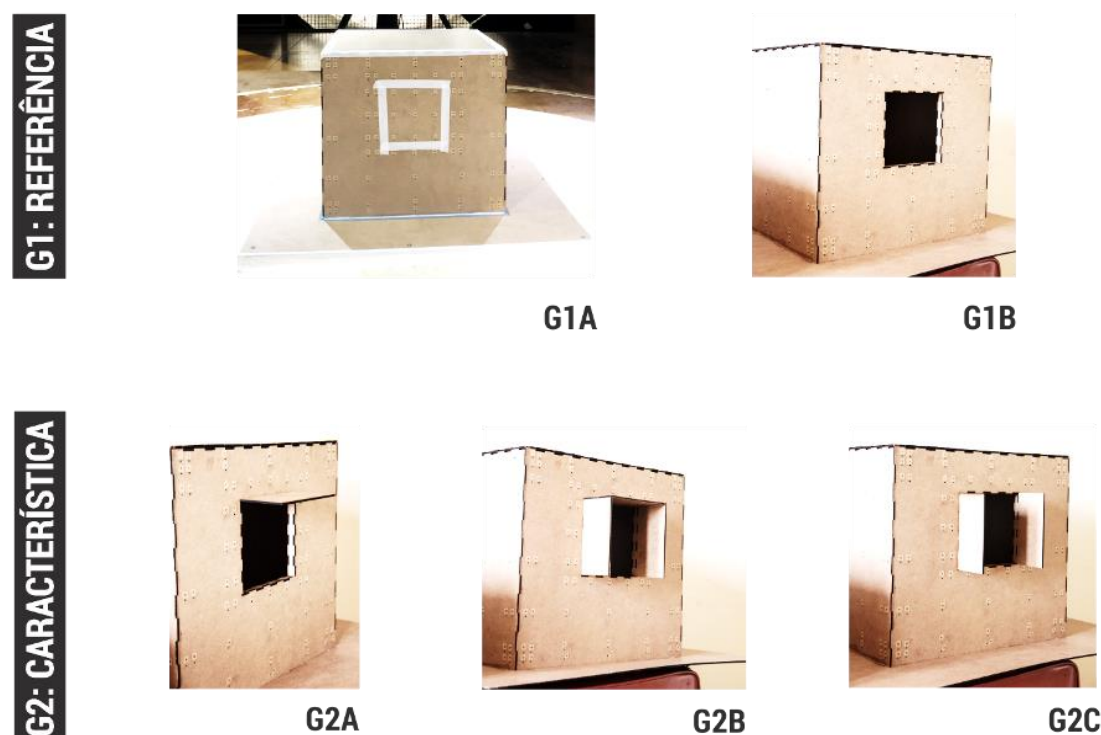


DIMENSÃO	PROTÓTIPO (m)	MODELO REDUZIDO (m)
A. Largura	3,00	0,40
B. Comprimento	3,00	0,40
C. Pé-direito	2,70	0,36
D. Largura da abertura	1,00	0,13
E. Altura da abertura	1,00	0,13
F. Peitoril	1,10	0,15
G. Profundidade dos dispositivos de sombreamento ⁽¹⁾	0,50	0,07

⁽¹⁾ A altura e o comprimento dos dispositivos de sombreamento são os mesmos das aberturas já que estão posicionados no seu limiar e ocupam a totalidade da altura e do comprimento do vão.

Fonte: A autora (2018).

Figura 37: Tipologias ensaiadas no túnel de vento do IPT.



Fonte: A autora (2018).

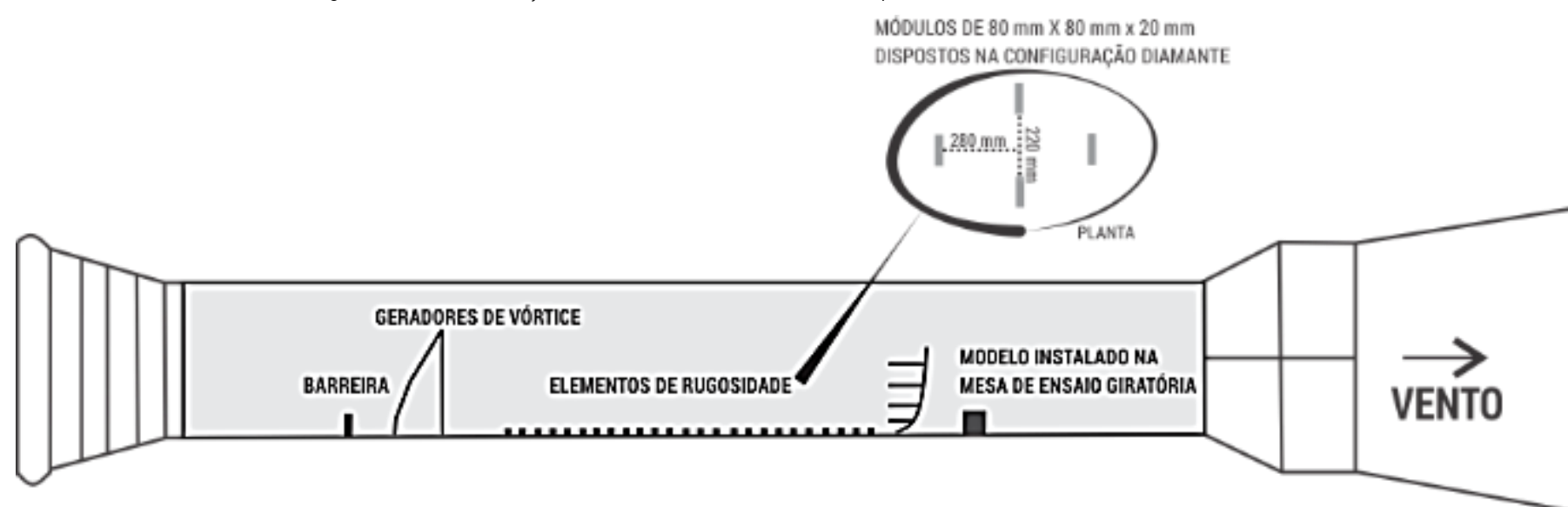
4.2.3 Camada limite atmosférica

O escoamento turbulento dentro da camada limite é característico na aerodinâmica das edificações comuns (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010). Em ensaios de modelos reduzidos em túneis de vento – em que a finalidade das investigações é verificar (quantitativamente e/ou qualitativamente) a influência das características da edificação ou do seu entorno imediato no desempenho da ventilação natural – é essencial que concordâncias entre o sistema real e o avaliado sejam asseguradas. Desta forma, além das semelhanças geométricas, as cinemáticas (padrões de velocidades médias e turbulência) e as dinâmicas (igualdade no número de *Reynolds*) também devem ser atendidas (BLESSMANN, 1983).

De acordo com Armitt e Counihan (1968) a reprodução da estrutura do vento atmosférico é complexa (correlaciona a descrição de inúmeros parâmetros) e a rugosidade em um escoamento do tipo turbulento é função da geometria dos obstáculos na superfície. Armitt e Counihan (1968) e Counihan (1969), a partir de uma série de avaliações experimentais, concluíram que de uso de geradores de vórtices, barreira e elementos de rugosidade dispostos a montante do modelo consistia em uma técnica adequada para a reprodução da camada limite atmosférica em túneis de vento.

Baseando-se em tal metodologia, a camada limite atmosférica dos ensaios no túnel de vento do IPT foi gerada com o auxílio de uma barreira castelada, geradores de vórtices (*spires*) e elementos rugosos de 80 mm de altura, 80 mm de largura e 20 mm de espessura dispostos a montante do modelo. O espaçamento entre os blocos emuladores de rugosidade foi de 220 mm entre si na largura do túnel e 280 mm entre as filas no comprimento do túnel, sendo que os blocos pertencentes à fila posterior foram posicionados no ponto médio da fila anterior, configurando-se uma disposição do tipo diamante (Figura 38).

Figura 38: Caracterização da Camada Limite Atmosférica para os ensaios no túnel de vento do IPT.



Fonte: Adaptado de IPT (2018).

O perfil de velocidade da camada limite atmosférica adotado nos ensaios no túnel de vento do IPT foi representado pela seguinte lei logarítmica (Equação 20).

$$\frac{V}{u_*} = \frac{l}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Equação 20

Onde:

V: velocidade média na altura z

u* : velocidade de atrito⁵⁸

k: constante de von Kármán (0,40)

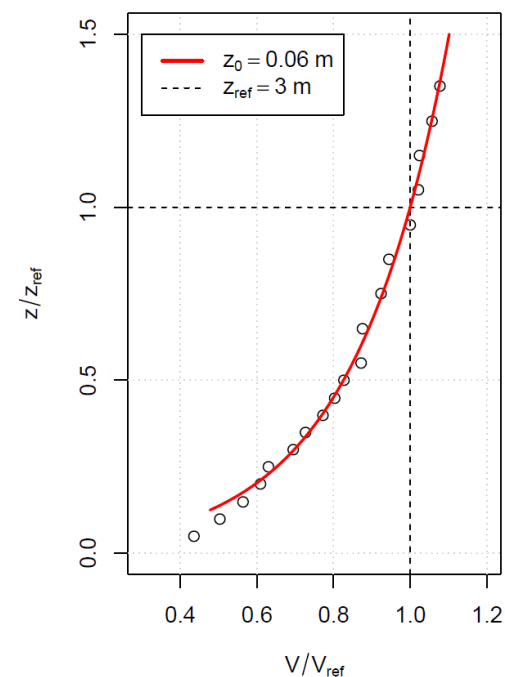
z₀: comprimento da rugosidade

O perfil de velocidades médias (V em m/s) resultante da camada limite proposta foi definido a partir de aferições realizadas com o posicionamento do *tubo de Pitot* a diferentes alturas (z em cm), sendo os dados apresentados na Tabela 21. A altura de referência utilizada posteriormente para a definição dos coeficientes de pressão devido ao vento (C_{ps}) foi determinada no topo de cobertura do modelo reduzido⁵⁹. Baseando-se nestes valores, chegou-se no valor do comprimento da rugosidade (z₀) de 0,06 m para estes ensaios. A Figura 39 ilustra a evolução do perfil de velocidade média obtido a partir de dados experimentais e a curva de ajuste (em vermelho) correspondente à lei logarítmica utilizada.

Tabela 21: Velocidades médias [V em m/s] nas diferentes alturas [z em cm] do perfil de velocidades da CLA proposta nos ensaios no túnel de vento do IPT.

z [cm]	V [m/s]
2	5,16
4	5,96
6	6,68
8	7,22
10	7,46
12	8,22
14	8,61
16	9,14
18	9,51
20	9,79
22	10,32
26	10,36
30	10,94
34	11,18
38	11,84
42	12,09
46	12,13
50	12,51
54	12,75

Figura 39: Curva do perfil de velocidade média (dados experimentais e lei logarítmica).



Fonte: IPT (2018).

⁵⁸ A velocidade de atrito é igual a $\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$, em que τ é a tensão de cisalhamento agindo sobre o piso do túnel de vento e ρ é a massa específica do ar.

⁵⁹ Z_{ref} (mm) = a 400 mm (correspondentes à somatória das alturas do modelo e do degrau sobre o qual o modelo foi ensaiado, 360 mm e 40 mm, respectivamente) e, portanto, 3 m na escala do protótipo.

Posteriormente, utilizou-se a lei de potência expressa pela Equação 21 para determinar o expoente (α), que é função do tipo de terreno, do perfil de velocidade média adotado nos ensaios. Desta forma, aplicando-se a função logarítmica nos dois lados da Equação 21 e plotando os resultados, obteve-se uma reta (Figura 40), cujo o coeficiente angular é o expoente (α), ou seja, 0,29. Logo, a Figura 41 ilustra o perfil resultante da lei de potência para $\alpha = 0,29$ e utilizado nos ensaios no túnel de vento do IPT.

$$U = U_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha$$

Equação 21

Onde:

U: velocidade na altura z [m/s];

U ref : velocidade na altura z ref [m/s];

z: altura correspondente a velocidade U [m];

zref : altura correspondente a velocidade U ref [m];

α : expoente da lei de potência variável em razão do tipo de terreno.

Figura 40: Determinação do expoente α a partir da equação da reta originada do $\log(U/U_{ref})$ por $\log(Z/Z_{ref})$.

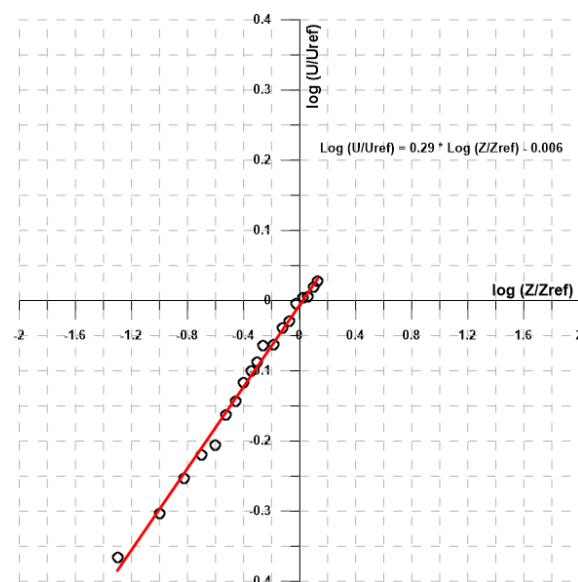
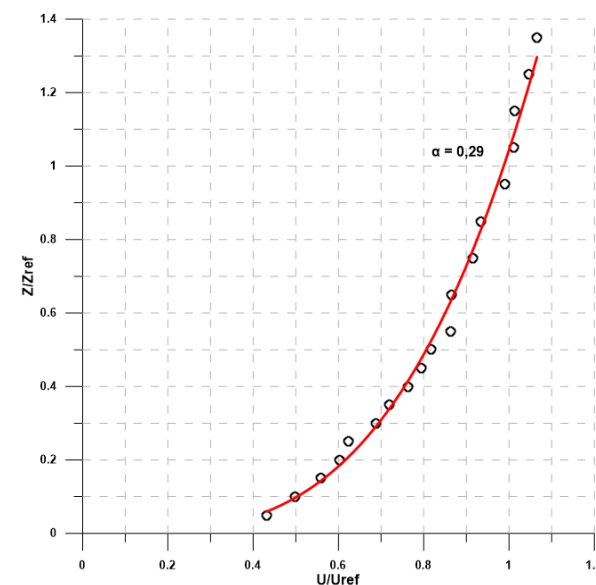


Figura 41: Perfil da lei de potência ($\alpha=0,29$), utilizado nos ensaios no túnel de vento do IPT.



Fonte: A Autora (2018)

4.3 CONFECÇÃO E PREPARAÇÃO DO MODELO FÍSICO REDUZIDO

Após definida a escala do modelo físico reduzido de modo a respeitar às exigências em relação à área de obstrução da seção de ensaio do túnel de vento, o modelo físico reduzido foi confeccionado.

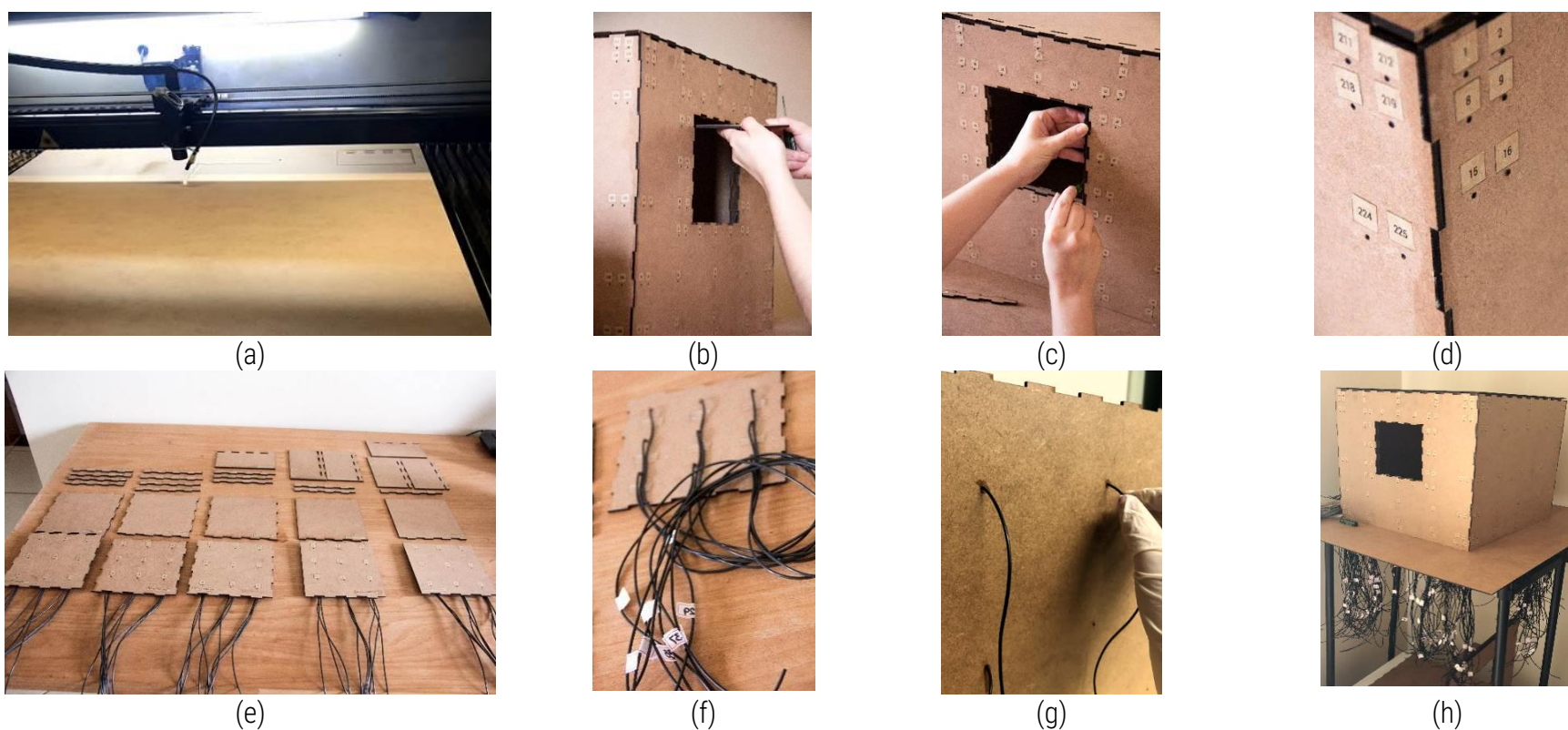
4.3.1 Modelo físico reduzido: confecção

A maquete teve seus componentes planejados no *software AutoCAD*[®]. Posteriormente, tais peças foram cortadas *a laser* em placas de MDF de 3 mm no Laboratório de Modelos e Maquetes do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU-USP) (Figura 42 a).

O modelo físico reduzido foi confeccionado com peças fixas e móveis. Assim, a partir de encaixes e da substituição de algumas peças, foi possível garantir que a mesma maquete conseguisse reproduzir as cinco tipologias ensaiadas. As partes móveis consistiram na cobertura do modelo e nas peças alocadas junto às suas aberturas (elementos de vedação e dos dispositivos de sombreamento) (Figura 42 b, c). A cobertura do modelo foi fabricada para funcionar como uma peça móvel para caso fosse necessário acessar seu interior durante os ensaios para facilitar a troca ou a fixação das peças na abertura a barlavento. As demais partes do modelo eram fixas e durante a sua montagem foram coladas umas às outras e, posteriormente, o conjunto à base.

Durante os cortes *a laser*, as superfícies externas do modelo físico foram perfuradas com orifícios de 1,8 mm para alocar (Figura 42 d), posteriormente, os tubos plásticos que configuraram as tomadas de pressão (Figura 42 e,f). Estes tubos plásticos de bitola de 1 mm (diâmetro interno) e de parede 0,4 mm de espessura foram fixados nas perfurações deixadas nas envoltórias externas do modelo com cola instantânea (Figura 42 g). Ademais, para viabilizar a conexão destes tubos aos canais do *scanner* de pressão para os ensaios, eles foram identificados com etiquetas numeradas de acordo com as tomadas de pressão correspondentes, além de serem previstas sobras de 40 cm em seus comprimentos (Figura 42 h).

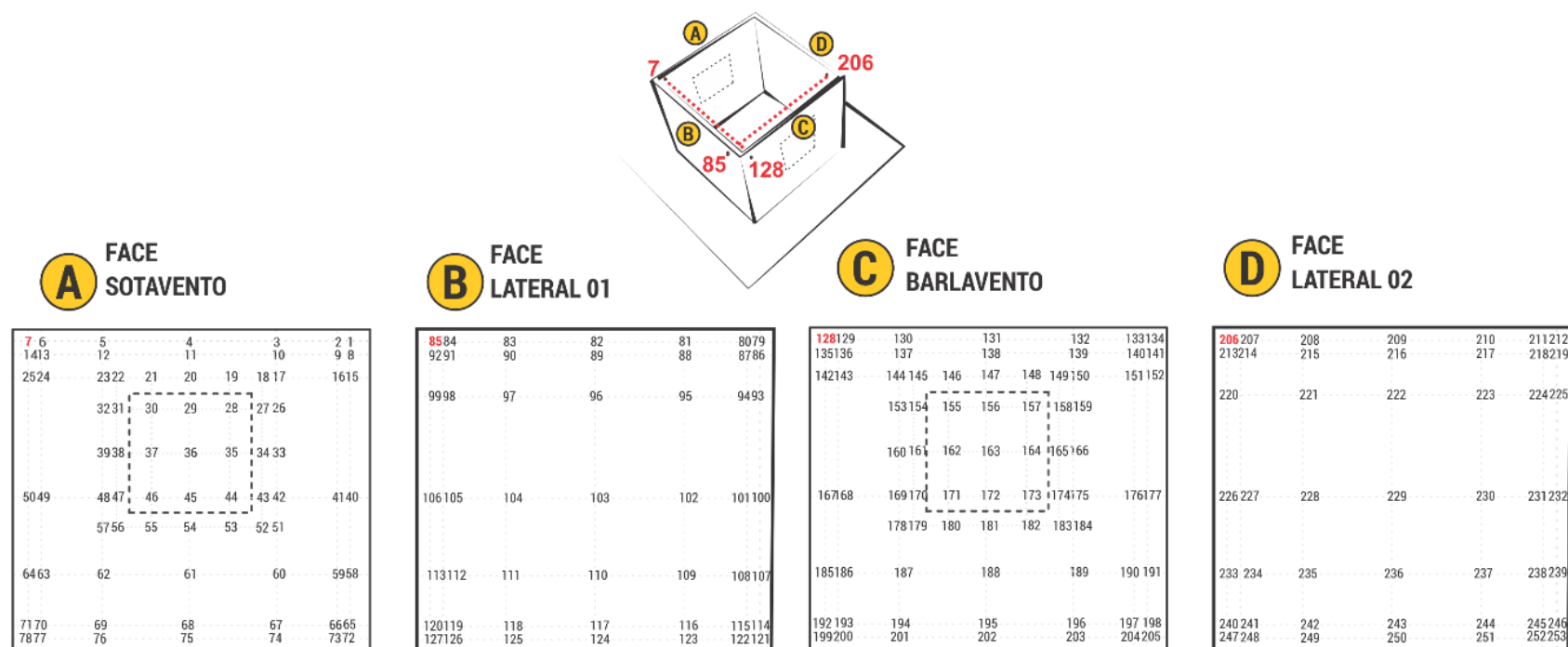
Figura 42: Processo de confecção do modelo físico reduzido: (a) corte *a laser* das peças; (b,c) peças móveis; (d) perfurações para alocar as tomadas de pressão, (e,f) peças a serem alocadas junto às aberturas (elementos de vedação e dos dispositivos de sombreamento); (g) fixação das mangueiras plásticas nas perfurações com cola instantânea e, (h) identificação das tomadas de pressão.



Fonte: A Autora (2018).

A quantidade e a distribuição das tomadas de pressão no modelo físico foram definidas em conjunto com os engenheiros do túnel de vento do IPT, priorizando uma maior discretização nas quinas e no entorno imediato das aberturas em razão do objetivo geral desta tese. No total foram 253 tomadas de pressão externas na Figura 43.

Figura 43: Mapeamento das tomadas de pressão nas faces do modelo genérico (A: face sotavento, B: lateral 01, C: face barlavento e D: face lateral).



*As representações das faces foram elaboradas de modo que a correspondência entre as tomadas de pressão localizadas em faces opostas fosse direta.

Fonte: A Autora (2018).

A fim de facilitar a troca e a fixação dos dispositivos de sombreamento, o modelo físico foi construído com dupla casca, com distanciamento de 1,0 cm entre as mesmas, pela qual foram passados os tubos plásticos conectados às tomadas de pressão. Para garantir o não estrangulamento dos tubos plásticos e, conseqüentemente, interferências na confiabilidade dos dados de pressão, peças de madeira de 7 mm de altura foram coladas em uma das cascas do modelo para servirem como guias durante o encaixe. Utilizou-se de fita adesiva dupla face de elevada aderência para a fixação dos tubos plásticos às cascas do modelo (Figura 44 a, b).

Assim, como já mencionado, a partir da possibilidade de alteração das peças foi possível que uma base comum (modelo genérico) reproduzisse todos os cenários ensaiados no túnel de vento do IPT.

Figura 44: Detalhe da câmara de ar constituída entre as duas cascas do modelo para a passagem dos tubos plásticos conectados às tomadas de pressão e das guias para garantir o encaixe entre as peças.



Fonte: A Autora (2018).

4.3.2 Modelo físico reduzido: preparação para os ensaios

O período de ensaios no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo foi de três dias, sendo o primeiro e a metade do segundo destinados à preparação do modelo físico reduzido e o outro um dia e meio para a execução dos ensaios.

Primeiramente, os tubos plásticos previamente identificados foram conectados aos canais de cinco módulos de transdutores de pressão multicanal da *Pressure System*, com 64 canais (Figura 45 a, b, c) cada, e de modo concomitante a esse processo foi realizada a tabulação das tomadas de pressão correspondentes a cada canal (Tabela 22).

Tabela 22: Exemplo de tabulação das tomadas de pressão correspondentes aos diversos canais pertencentes aos módulos de transdutores de pressão.

LOCALIZAÇÃO	IDENTIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO	Nº DA TOMADA DE PRESSÃO	Nº DO CANAL
Face barlavento	Módulo nº02	128	64
		129	1
	Módulo nº03	131	3
		132	4
		133	5

Em seguida, deu-se início ao processo de fixação do modelo na mesa de ensaio do túnel de vento (Figura 45 d). Como supracitado, devido à grande escala do modelo físico (1:7,5) e à baixa espessura da placa de MDF utilizada em sua confecção, foi necessário utilizar de um sistema complementar de apoio (sarrafos) para garantir maior estabilidade e rigidez ao modelo durante os ensaios (Figura 45 e). A somatória da espessura da base do modelo, do sistema de apoio e da mesa de ensaio incrementou a altura final do modelo em 40 mm. O modelo físico reduzido foi fixado à base de ensaio do túnel de vento de modo que a abertura em que os dispositivos de sombreamento seriam acoplados ficasse direcionada a barlavento na situação de ângulo de incidência do vento de 0°.

Figura 45: Preparação do modelo físico reduzido para os ensaios: (a), (b) e (c) conexão dos tubos plásticos aos canais dos módulos de medição de pressão; (d) e (e) fixação do modelo sobre suporte de apoio e na, posteriormente, o conjunto na mesa de ensaio do túnel de vento do IPT.



(a)



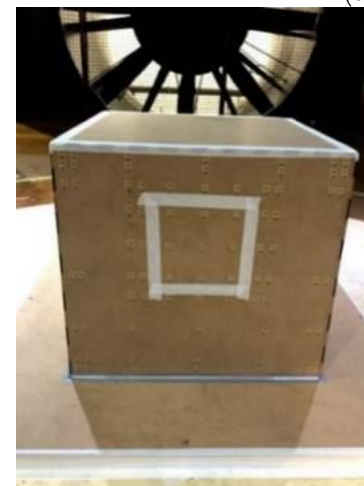
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: A Autora (2018).

4.4 ENSAIOS QUANTITATIVOS: TÚNEL DE VENTO DO IPT

Após a etapa de preparação do modelo reduzido, deu-se início às aferições quantitativas propriamente ditas. Foram ensaiadas as tipologias G1A, G1B, G2A, G2B e G2C para os seguintes ângulos de incidência: 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° e 180° . Estes diferentes cenários foram obtidos a partir da rotação automatizada (em sentido horário) do modelo em relação ao escoamento incidente em intervalos de 15° até a situação de 90° e, depois de 90° para a configuração de 180° .

O tempo de medição para cada ângulo de incidência do vento foi de 60 segundos à frequência de aquisição de 250 Hz. As séries temporais das pressões exercidas nas envoltórias externas do modelo foram viabilizadas a partir da conexão dos transdutores de pressão multicanais com aferição simultânea a uma de aquisição de dados em um computador, possibilitando o conhecimento dos dados de pressão em cada tomada nos diversos cenários analisados.

4.5 PÓS – PROCESSAMENTO DOS DADOS

Após a conclusão dos ensaios, a totalidade dos dados de pressão obtida foi pós- processada e fornecida pelos engenheiros do túnel de vento do IPT em formato de coeficientes de pressão (C_p), calculados de acordo com a Equação 22.

$$\overline{C_p} = \frac{1}{q_{ref}} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (p(t) - P_0) dt$$

Equação 22

Onde:

$\overline{C_p}$ = coeficiente de pressão médio

T = tempo de aquisição de dados

p = pressão instantânea

P_0 = pressão estática de referência

q_{ref} = pressão dinâmica de referência

A pressão dinâmica de referência foi calculada através da Equação 23.

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{ref}^2$$

Equação 23

Onde:

q_{ref} = pressão dinâmica de referência

ρ = massa volúmica do ar

V_{ref} = velocidade correspondente à altura de referência (topo da cobertura do modelo).

Conforme já informado, a altura de referência utilizada para o cálculo dos coeficientes de pressão foi de 0,40 m e 3,00 m no modelo reduzido e no protótipo, respectivamente. Justifica-se o incremento na altura final do modelo em razão da inclusão do sistema de apoio complementar.

Os valores dos coeficientes de pressão correspondentes a cada tomada de pressão nos diversos ângulos de incidência do vento avaliados foram disponibilizados pelo IPT em planilhas individualizadas por tipologia (Tabela 23).

Tabela 23: Exemplo do formato em que os dados de Cps foram disponibilizados para as tipologias ensaiadas.

	A000	A015	A030	A045	A060	A075	A090	A180
1	-0,25	-0,30	-0,37	-0,44	-0,53	-0,63	-0,94	0,48
2	-0,22	-0,28	-0,34	-0,42	-0,51	-0,61	-0,94	0,61
3	-0,25	-0,34	-0,40	-0,47	-0,54	-0,64	-0,97	0,64

Fonte: IPT (2018).

Após a apresentação do processo de preparação e dos ensaios no túnel de vento do IPT, os mesmos itens são descritos para os ensaios realizados no túnel de vento do LNEC.

4.6 TÚNEL DE VENTO DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA DO LNEC

O túnel de vento de circuito aberto do Laboratório Nacional de Engenharia Civil para ensaios do tipo camada limite atmosférica (Figura 46 a) apresenta uma seção transversal de ensaio de 3 m x 2 m x 9 m (largura x altura x comprimento) (Figura 46 b). Seis ventiladores axiais, que podem ser controlados individualmente, garantem velocidades de escoamento de até 18 m/s (Figura 46 c).

O túnel, em operação desde 1995, permite que investigações acerca do comportamento aerodinâmico de estruturas, elementos de fachada, pontes, veículos, além de condições de conforto e segurança sejam avaliadas (LNEC, 2020).

Figura 46: Túnel de camada limite atmosférica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).



Fonte: A Autora (2020).

4.7 CONDIÇÕES DE CONTORNO E MATRIZ DE ENSAIOS

As condições de contorno, assim como nos ensaios no IPT, consistiram na: (1) verificação da escala do modelo reduzido; (2) definição da matriz de ensaios (tipologias e cenários) e; (3) caracterização da camada limite atmosférica e aferição do perfil de velocidades.

4.7.1 Escala do modelo reduzido

A escala do modelo reduzido se manteve a mesma (1:7,5) devido à igualdade da área da seção transversal (6 m^2) dos túneis de vento (do IPT e do LNEC). No entanto, um novo modelo físico foi confeccionado para suprir as necessidades identificadas nos ensaios anteriores. Utilizou-se de um material mais espesso (MDF de 6 mm ao invés de 3 mm) a fim de aumentar a rigidez do modelo e dispensar sistemas de suporte adicionais. Ademais, reduziu-se, seguindo o mesmo mapeamento inicial, a quantidade de tomadas de pressão (TP) de 253 para 88. A materialidade da tampa de cobertura do modelo também foi alterada de MDF para acrílico, viabilizando os ensaios qualitativos de visualização do escoamento interior, inexistentes na avaliação anterior.

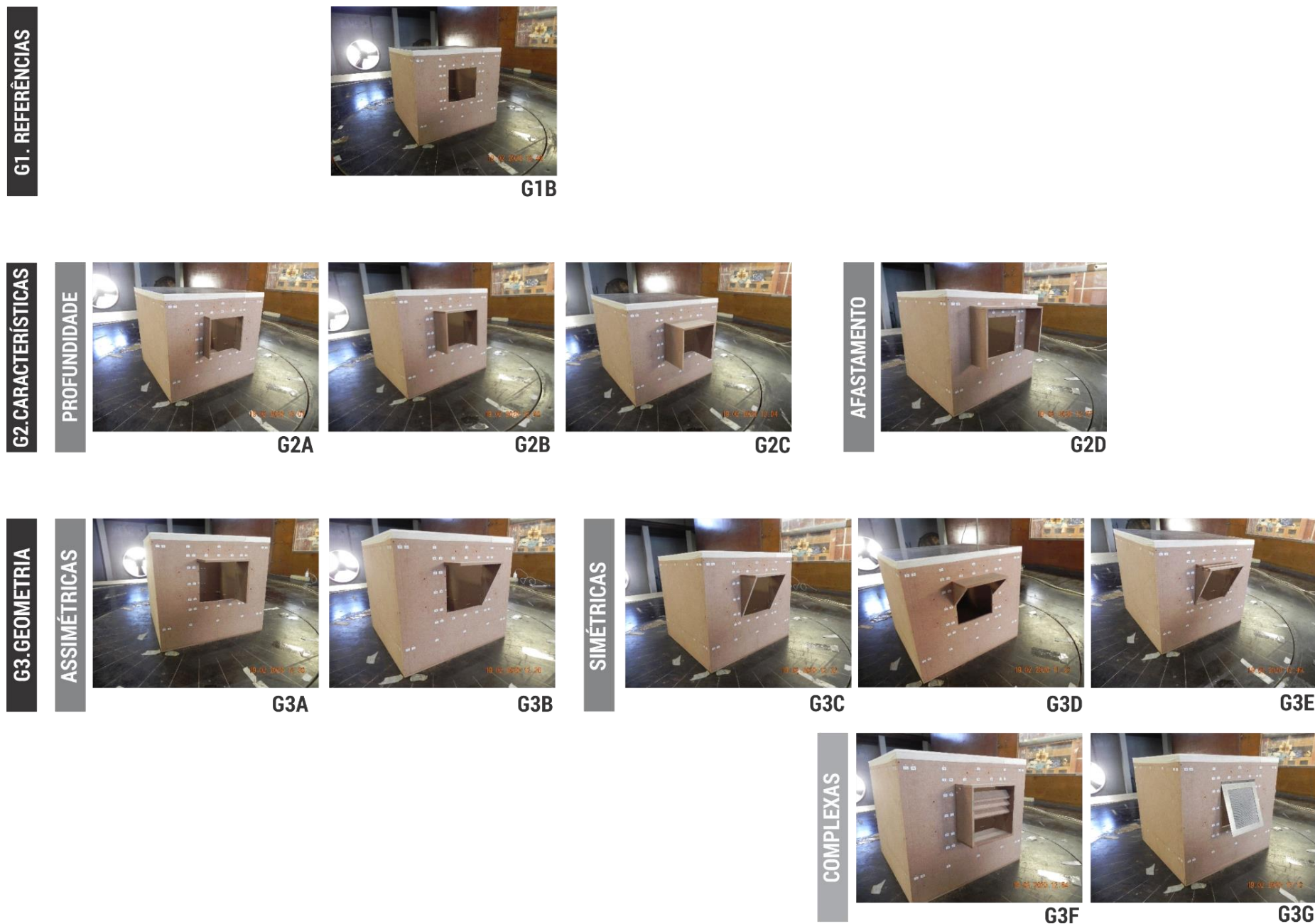
4.7.2 Matriz de ensaios: tipologias e cenários

A partir da tipologia **G2B** – modelo genérico com dispositivos de sombreamento combinados – definiu-se a matriz ensaiada no túnel de vento do LNEC. Em virtude dos aspectos que, após a análise dos ensaios do IPT, se apresentaram como necessários a serem explorados (complexidade e impacto no desempenho da ventilação natural), estabeleceu-se três grupos tipológicos: (1) referências, ou seja, modelos genéricos sem a presença de dispositivos de sombreamento (G1A e G1B); (2) características, correspondendo a tipologias com variações nas dimensões (G2A, G2B, G2C) e no posicionamento dos elementos (G2D) e; (3) geometrias, referente a tipologias com alterações forma dos protetores: assimétricas (G3A e G3B), simétricas (G3C, G3D e G3E) e por fim, complexas (G3F e G3G). Todas as tipologias foram ensaiadas em modelos selado e com aberturas (Figura 47).

4.7.3 Camada limite atmosférica

Como já mencionado, os túneis de vento (do IPT e do LNEC) apresentam a mesma área de seção transversal de ensaio (6 m^2), mas comprimentos distintos (28 m e 9 m, respectivamente), o que resultou em diferenças no processo de caracterização da Camada Limite Atmosférica (CLA) e, consequentemente, do perfil de velocidades.

A conformação geométrica adotada foi obtida após cinco aferições, com o auxílio de um anemômetro de fio quente (*Dantec 550R01*), dos perfis de velocidades e de turbulências. As alterações, durante este processo, foram embasadas nas formulações propostas por Irwin (1981) para o dimensionamento dos elementos de rugosidade para a simulação da CLA em túneis de vento.

Figura 47: Matriz ensaiada no túnel de vento do LNEC⁶⁰.

Fonte: A Autora (2020).

Inicialmente, utilizou-se uma configuração idêntica a dos ensaios anteriores⁶¹ (Figura 48). No entanto, frente aos resultados insatisfatórios, uma sequência de ajustes foi adotada: (a) *spires* menores (170 mm de base e 1250 mm de altura); (b) em maior quantidade (cinco, posicionados de forma equidistante na largura do túnel); (c) inversão da dimensão de fixação dos elementos de rugosidade (de 30 mm para 80 mm), redução do número de elementos por filas

⁶⁰ Todas as tipologias também foram ensaiadas em modelo selado.

⁶¹ Geradores de vórtices [*spires*] a montante do modelo, elementos de rugosidade de 80 mm de largura, 80 mm de altura e 30 mm de espessura e com disposição tipo diamante [distanciamento de 220 mm entre os elementos e 280 mm entre as filas da disposição diamante].

(de 10 para 5, aumentando de 220 para 520 mm o distanciamento entre as peças); e por fim; (d) variação de suas alturas. Assim, as quatro primeiras fileiras a montante do modelo foram compostas por módulos simples, ou seja, com altura de 30 mm; as quatro últimas por triplos (90 mm) e as intermediárias por duplos (60 mm). A CLA resultante (Figura 49) foi caracterizada por 85 elementos de rugosidade, distribuídos em 17 fileiras de 5 módulos (Figura 50).

Figura 48: Configuração inicial da CLA (idêntica a dos ensaios preliminares).

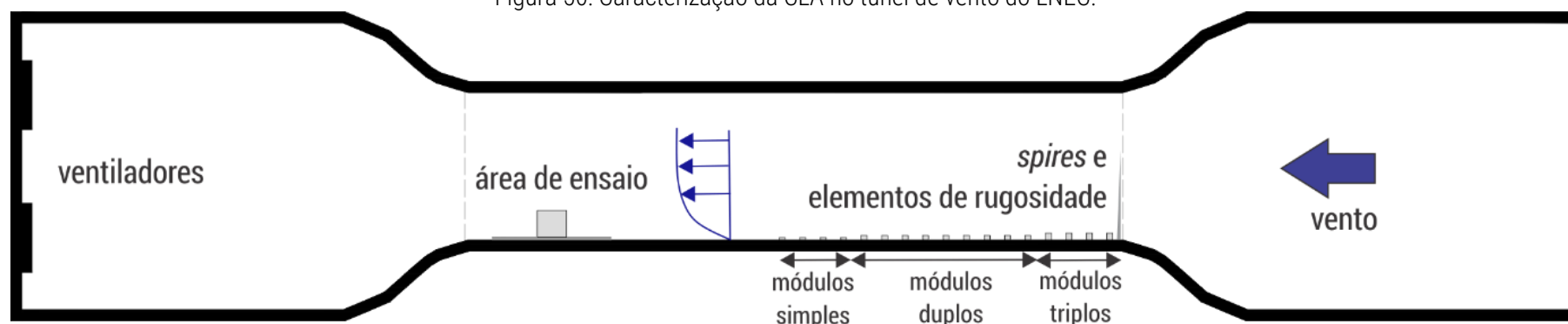


Figura 49: Configuração inicial da CLA adotada nos ensaios do LNEC.



Fonte: A Autora (2020).

Figura 50: Caracterização da CLA no túnel de vento do LNEC.

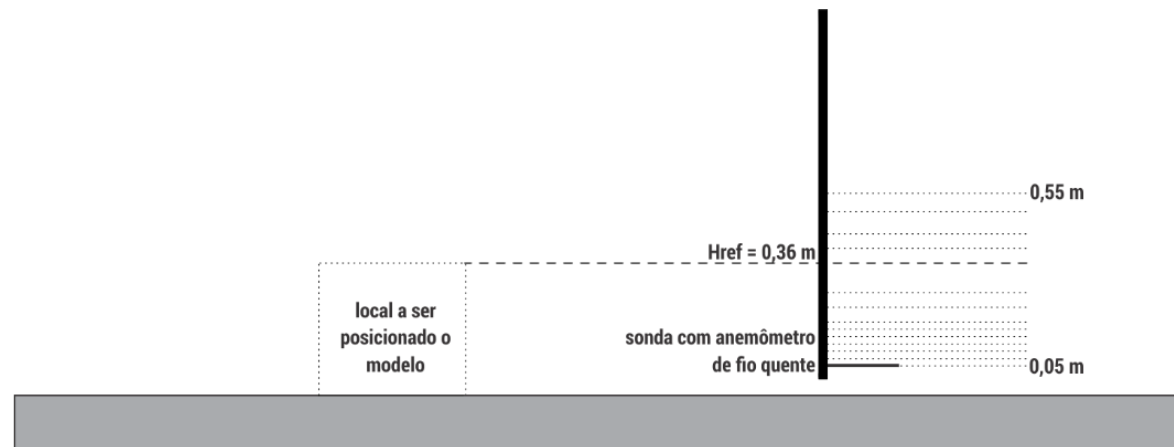


Fonte: A Autora (2020).

Para as aferições, posicionou-se o anemômetro de fio quente (*Dantec 550R01*) a cerca de 0,80 m da mesa de ensaio e no eixo central do túnel de vento. Posteriormente, ligaram-se três ventiladores, resultando em uma velocidade média de aproximadamente 7,5 m/s na altura correspondente ao topo do modelo (0,36 m). A altura do anemômetro de fio quente (Tabela 24 e Figura 51) foi alterada progressivamente e os valores de tensão (em mV)

correspondentes – empregado pelo sistema para a manutenção da sua temperatura constante – computados com o auxílio de um *data logger* (*Multichannel CTA da DANTEC*) conectado a um computador. A partir do *software Streamware*[®], os valores de tensão (em mV) foram automaticamente convertidos em m/s, por meio de uma equação de calibração previamente determinada em sua configuração, e compilados em arquivos digitais (formato Excel[®]). O procedimento de calibração do anemômetro de fio quente está descrito em seção subsequente (4.10 Calibração dos equipamentos). A Figura 52 apresenta o perfil de velocidades resultante e utilizado nos ensaios no túnel de vento do LNEC, caracterizado por um $\alpha=0,18$.

Figura 51: Procedimento de aferição do perfil de velocidades.



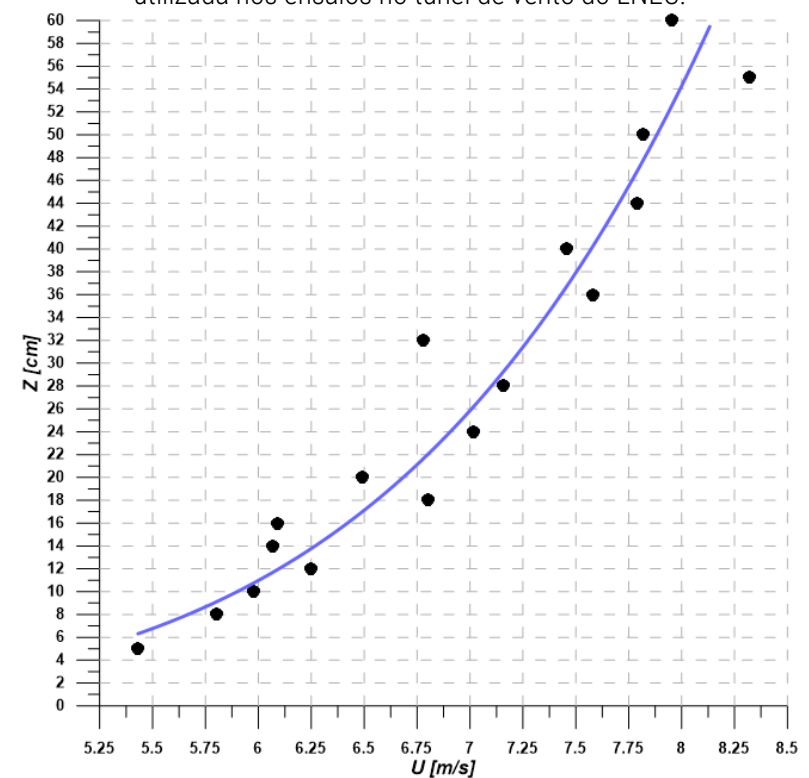
Fonte: A Autora (2020).

Tabela 24: Aferições do perfil de velocidades, com destaque para a aferição na altura de referência.

Z (cm)	U (m/s)
5	5,43
8	5,80
10	5,97
12	6,24
14	6,06
16	6,09
18	6,80
20	6,49
24	7,01
28	7,16
36	7,58
40	7,45
44	7,79
50	7,81
55	8,32

Fonte: A Autora (2020) a partir dos dados aferidos.

Figura 52: Perfil de velocidades resultante da camada limite atmosférica utilizada nos ensaios no túnel de vento do LNEC.



as peças puderam ser facilmente alteradas entre um cenário e outro de análise com auxílio de pequenas porcas (Figura 54 f), uma chave e uma peça pré-fabricada de madeira para garantir o ajuste final. Por fim, a tampa opaca do modelo foi substituída por uma transparente (de acrílico de 3 mm) para viabilizar os ensaios qualitativos (Figura 54 g).

Figura 54: Processo de preparação do modelo físico reduzido.



Fonte: A Autora (2020).

4.9 ENSAIOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS

Ensaio quantitativos e qualitativos foram realizados no túnel de vento do LNEC. Nos ensaios quantitativos, aferiram-se para todas tipologias e cenários em modelo selado e com aberturas, os seguintes dados: (a) as pressões na envoltória externa; (b) e a velocidade na abertura a sotavento (neste caso somente para modelo com aberturas). E, por meio dos ensaios qualitativos, compreendeu-se o padrão de comportamento e distribuição do fluxo, com o auxílio de fios de lã posicionados no interior do modelo e nas suas aberturas em diferentes alturas. Os ensaios quantitativos (nas tipologias em modelo com aberturas) ocorreram simultaneamente, sendo os qualitativos realizados em momento posterior.

4.9.1 Ensaios quantitativos: aferição da pressão na envoltória externa

Inicialmente, fixou-se o modelo ao centro da mesa de ensaio giratória, verificando a partir da face a barlavento a sua perpendicularidade ao escoamento. As indicações referentes às demais incidências de vento na régua abaixo desta mesa também foram conferidas.

Na sequência, conectaram-se as mangueiras, devidamente identificadas, aos canais de dois transdutores de pressão da *Pressure System* (sendo um de 32 e outro de 64 canais) e suas correspondências foram tabuladas. Destinaram-se 88 canais à aferição das pressões estáticas na envoltória do modelo e um à pressão dinâmica na altura de referência ($H_{ref} = 0,36\text{m}$).

Um tubo de *Pitot - Prandtl* foi posicionado⁶⁴ na direção do escoamento (Figura 55 a), a 0,36m (H_{ref}), e conectado ao micro manômetro de precisão tipo *Betz*, com o objetivo de aferir a pressão dinâmica do escoamento, a partir da total e da estática, e posteriormente, utilizá-la para o cálculo dos coeficientes de pressão devido ao vento (C_{ps}), tendo como base essa altura de referência.

Antes dos ensaios, valores de pressão atmosférica e temperatura foram registrados, obtidos a partir de um termômetro e um barômetro localizados no Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (Figura 55 b, c). A temperatura do escoamento foi observada no visor do anemômetro ou do termômetro localizado no interior da seção de ensaio e a pressão dinâmica lida no visor do micro manômetro *Betz* (Figura 55 d, e), após a estabilização do escoamento. Posteriormente, essas informações foram introduzidas em uma tabela de cálculo desenvolvida pelo LNEC, para a determinação da velocidade do escoamento (m/s) na H_{ref} (0,36 m), ou seja, a velocidade de referência (U_{ref}).

Quanto aos ensaios propriamente ditos, inicialmente, realizou-se o registro do “zero” dos vários canais, ou seja, uma captura sem a ação dos ventiladores. Esse valor no pós-processamento foi deduzido dos valores capturados durante os ensaios para os mesmos canais. Na sequência, três ventiladores foram ligados e novas capturas obtidas durante 100 s (após a estabilização do escoamento). A conexão dos transdutores de pressão da *Pressure System* a um sistema de controle e aquisição de dados permitiu o registro simultâneo de todas as tomadas de pressão (TPs). Com o auxílio de um *software* dedicado, estes valores (em Pa) foram compilados em arquivos digitais (formato Excel[®]).

4.9.2 Ensaios quantitativos: velocidade média na abertura a sotavento

Um anemômetro do tipo hélice (*Airflow AV6*) (Figura 55 f) foi posicionado no ponto médio da abertura a sotavento, garantindo capturas de tensão (em mV) proporcionais à velocidade média (m/s) do escoamento neste ponto. Essas aferições, foram simultâneas às de pressão (Figura 55 g), e viabilizadas através da conexão do equipamento a um *data logger* e, este a um computador, sendo os valores de tensão (em mV) registrados em arquivos digitais (formato Excel[®]).

⁶⁴ O instrumento foi posicionado de modo a garantir o distanciamento necessário da geometria para a captura do escoamento livre e sem perturbações.

Figura 55: Preparação para os ensaios quantitativos no túnel de vento do LNEC.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Fonte: A Autora (2020).

Anotações manuais das velocidades (em m/s, registradas no visor do anemômetro) foram realizadas a fim de verificar e monitorar a coerência dos resultados durante os ensaios e também após a conversão dos dados. O processo de calibração do anemômetro assim como a equação de conversão dos dados de tensão em velocidade está detalhado na seção “4.10 Calibração dos equipamentos”.

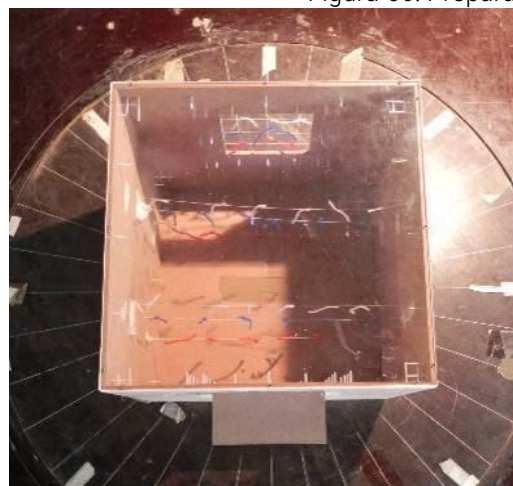
4.9.3 Ensaios qualitativos: comportamento e distribuição do fluxo de ar interno

De acordo com Aynsley; Melbourne; Vickery (1977) a conjuntura de ensaios quantitativos e de visualizações do fluxo interno (qualitativos) trazem respostas ainda mais significativas. Deste modo utilizaram-se fios de lã (nas aberturas e no interior do modelo) para identificar áreas de maiores e menores velocidades e possíveis recirculações internas.

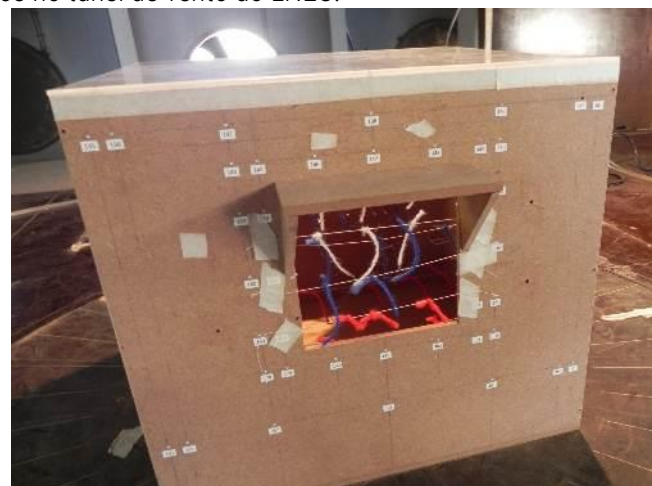
Eixos com sete segmentos de lã (de aproximadamente 5 cm), igualmente espaçados e distribuídos em três alturas, foram locados a 1/3 e 2/3 do comprimento do modelo (Figura 56 a). De modo análogo particionou-se a altura das aberturas em três e cada nível recebeu uma linha com três fios de lã (Figura 56 b). Diferentes cores (vermelho, azul e branco) distinguiram as variadas alturas (baixa, intermediária e alta).

Com o auxílio de uma câmera filmadora posicionada em um tripé no interior do túnel, capturas de no mínimo 30s foram feitas para todas as tipologias⁶⁵ e incidências de vento. Em suma, objetivou-se, a partir destes ensaios, subsidiar um melhor entendimento dos dados quantitativos e enriquecer a compreensão acerca do comportamento e da distribuição do fluxo com as visualizações.

Figura 56: Preparação para os ensaios qualitativos no túnel de vento do LNEC.



(a)



(b)

Fonte: A Autora (2020).

4.10 CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

A calibração dos anemômetros de fio quente e de hélice ocorreram em momentos distintos. O primeiro foi calibrado antes da aferição do perfil de velocidades, no qual foi utilizado. Já o segundo, utilizado para aferição da velocidade média do escoamento na abertura a sotavento, passou por este processo em momento posterior aos ensaios. Ambos os anemômetros foram calibrados no túnel de vento de circuito fechado do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, cuja seção de ensaio é de 1,0 m x 1,2 m x 3,0 m (

Figura 57).

⁶⁵ Em modelo com aberturas.

Figura 57: Túnel de vento do circuito fechado do LNEC utilizado para a calibração dos equipamentos.



Fonte: Marques da Silva (2020).

4.10.1 Calibração: anemômetro de fio quente

O anemômetro de fio quente é um equipamento caracterizado por um micro filamento ($5\ \mu\text{m}$ de diâmetro) aquecido e conectado a um circuito elétrico. Quanto exposto ao escoamento, arrefece-se e sua corrente elétrica varia a fim de reestabelecer a temperatura inicial, sendo esta variação computada em volts (mV). Deste modo, a curva de calibração é necessária para indicar a velocidade média do escoamento correspondente à tensão registrada.

Assim, o anemômetro de fio quente (Dantec 550R01) foi posicionado no interior da seção de ensaios e sucessivas aferições de velocidade e tensão foram realizadas simultaneamente. As capturas de velocidade ocorreram por meio dos valores de pressão (em Pa) registrados no visor do micro manômetro e convertidos para m/s a partir de uma tabela de cálculo desenvolvida pelo LNEC. Já as medições de tensão ocorreram com o auxílio de um *data logger* acoplado a um computador, sendo os dados compilados em arquivos digitais a partir do *software Streamwire*[®], o mesmo utilizado durante as aferições do perfil de velocidades.

A Figura 58 apresenta a curva de calibração que correlaciona os valores de tensão (V em mV) com velocidades médias correspondentes (U em m/s), assim como a equação inserida na configuração do *software Streamwire*[®] para aferição do perfil de velocidades decorrente da caracterização proposta para a CLA. O coeficiente de determinação (R^2) desta curva foi de 0,99.

4.10.2 Calibração: anemômetro de hélice

O anemômetro de hélice (*Airflow AV6*) correlaciona a velocidade de rotação da hélice com a do escoamento em que está exposto, gerando uma tensão elétrica (em mV) como dado de saída. Essa tensão, por meio de uma equação de calibração, é convertida em velocidade (em m/s) e apresentada no visor do equipamento.

Desta forma, o anemômetro *Airflow AV6* passou pelo mesmo processo de calibração em que medidas simultâneas de tensão e de velocidade foram capturadas. De forma análoga ao anemômetro de fio quente, as voltagens correspondentes foram registradas com o auxílio de um *data logger* conectado a um computador e os dados compilados em arquivos digitais com o auxílio do *software Delogger*[®]. As capturas de velocidade foram feitas por meio dos

registros de pressão no micro manômetro. A equação de conversão de tensão (mV) em velocidade (m/s) apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,99 (Figura 59).

Figura 58: Curva de calibração do anemômetro de fio quente correlacionando velocidades médias em m/s com tensão em V.

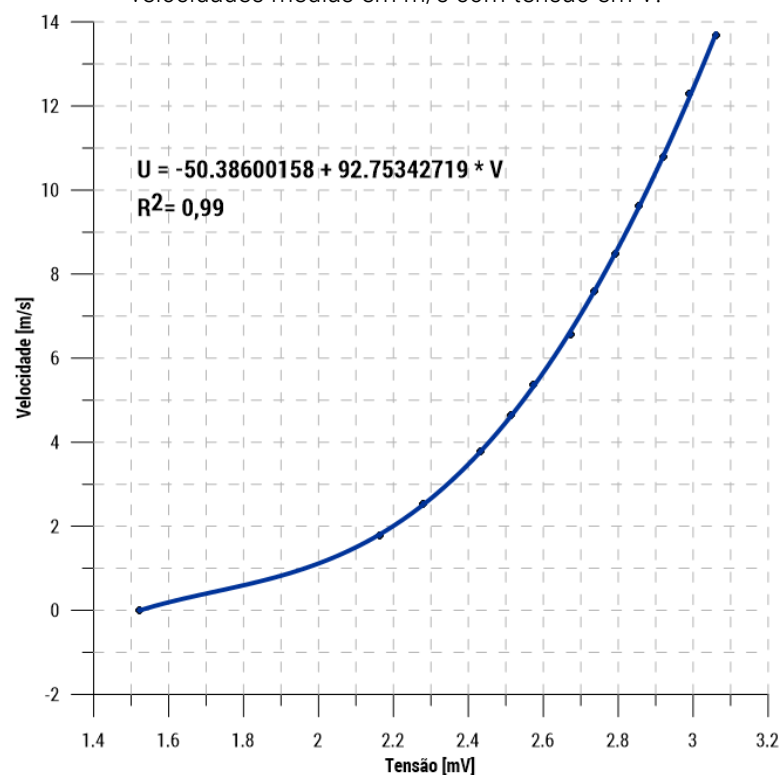
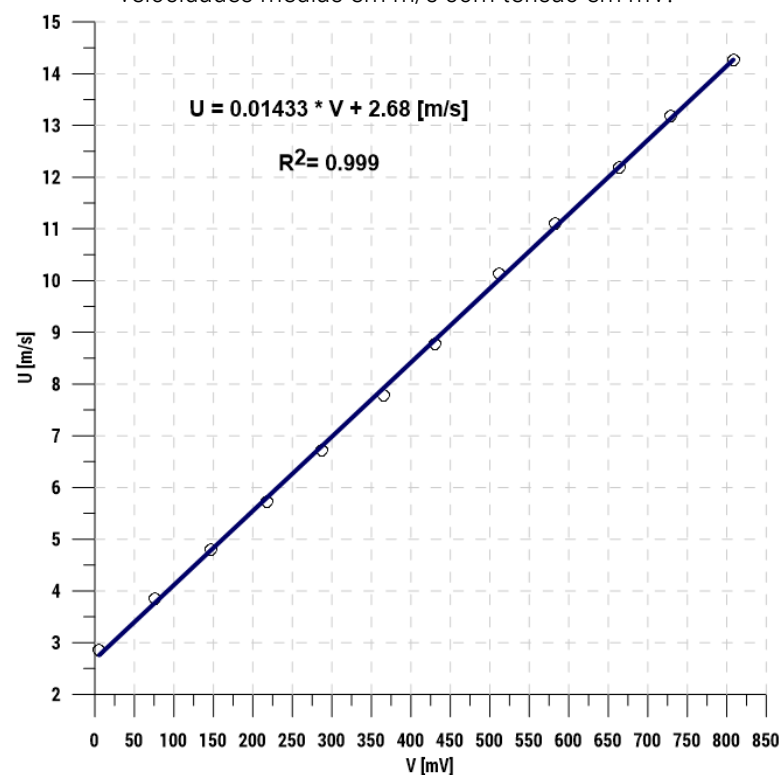


Figura 59: Curva de calibração do anemômetro de hélice correlacionando velocidades médias em m/s com tensão em mV.



Fonte: A Autora (2020) a partir dos dados aferidos.

4.11 PÓS-PROCESSAMENTO DE DADOS

Restringiu-se o processo de pós-processamento aos dados oriundos dos ensaios quantitativos de pressão⁶⁶ e de velocidade⁶⁷. Os primeiros, resultaram na determinação dos coeficientes de pressão devido ao vento (C_{ps}) na envoltória externa do modelo. Os segundos, na designação dos valores de velocidade média relativa do escoamento na abertura a sotavento em relação à aferida na altura de cobertura (U_{jan}/U_{ref}).

Como já mencionado, os ensaios qualitativos serviram de suporte à análise dos quantitativos, logo seus dados não passaram por um processo de pós-processamento, sendo apenas averiguados (os próprios vídeos) quando necessário.

⁶⁶ Modelo genérico selado e com aberturas.

⁶⁷ Modelo genérico com aberturas.

4.11.1 Pós- processamento: dados de pressão (em Cps)

Os coeficientes de pressão devido ao vento (C_p) é um dado adimensional que relaciona pressões estática em um determinado ponto e dinâmica do escoamento. Desta forma, a partir da Equação 24, determinou-se o C_p para cada tomada de pressão (TP) nos diversos cenários, ou seja, tipologias e incidências de vento ensaiados. Assim, o C_p para uma dada TP foi o valor resultante da relação entre a diferença das pressões estáticas (na superfície do modelo e de referência, aferida em fluxo de ar não perturbado) em Pa, das aferições da pressão dinâmica nas mesmas condições em Pa.

$$C_{p_{TPi}} = \frac{\bar{P}_{TPi} - \bar{P}_0}{\bar{P}_d} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

$C_{p_{TPi}}$: Coeficiente de pressão na tomada TP, em que i é o número da tomada (adimensional);

P_{TPi} : pressão estática aferida em na TP, em que i é o número da tomada [Pa];

P_0 – pressão estática de referência, do fluxo de ar não perturbado [Pa]

P_d – pressão dinâmica do fluxo não perturbado [Pa].

4.11.2 Pós- processamento: dados de velocidade (em Ujan/Uref)

O adimensional U_{jan}/U_{ref} , que correlaciona a velocidade aferida no ponto médio da abertura sotavento à de referência ($H_{ref} = 0,36$ m), foi obtido a partir de dois processos sucessivos. Primeiramente, aplicou-se a equação de calibração (ver item 4.10 Calibração dos equipamentos) às médias das capturas de voltagem para cada incidência de vento. Na sequência, o valor resultante foi dividido pela velocidade de referência (U_{ref}) calculada para cada ensaio⁶⁸ (Tabela 25).

Tabela 25: Exemplar do procedimento do pós-processamento para a obtenção do adimensional U/U_{ref} .

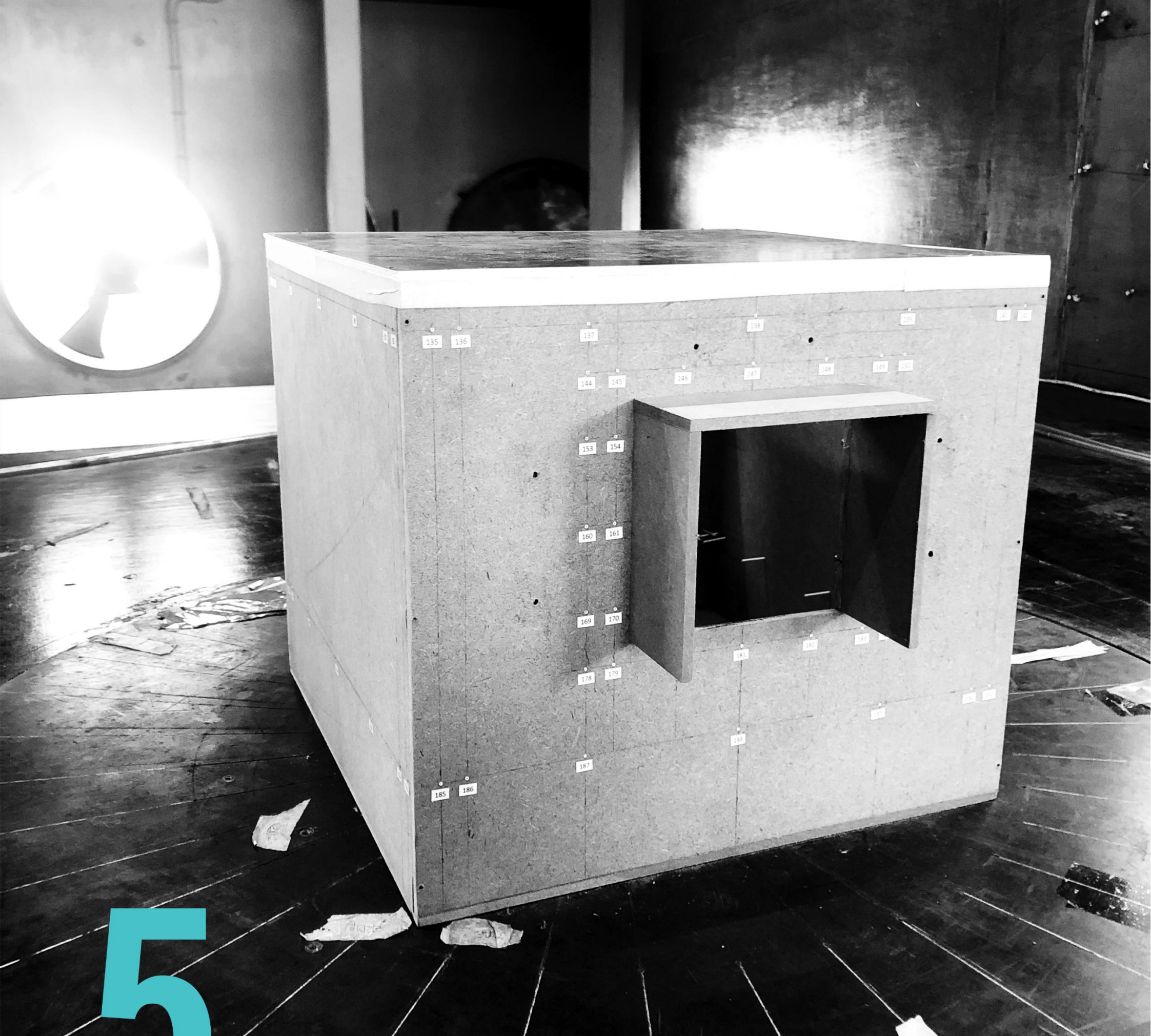
0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	TIPOLOGIA G1A
120,72	146,81	153,25	120,83	26,37	-106,72	-186,48	Média das aferições [mV]
4,41	4,78	4,88	4,41	3,06	1,15	0,01	Calibração [m/s]
0,56	0,61	0,62	0,56	0,39	0,15	0,00	U/ Uref

Fonte: A Autora (2020).

⁶⁸ Como supracitado, a velocidade de referência (U_{ref}), ou seja, velocidade do escoamento na altura do topo do modelo foi calculada, para cada ensaio com base nos valores de pressão e velocidade (externos e internos ao túnel), a partir de uma tabela de cálculo desenvolvida pelo LNEC.

4.12 SÍNTESE DO ITEM

Essa seção apresentou, em detalhe, os processos de preparação e execução dos ensaios quantitativos (IPT e LNEC) e qualitativos (LNEC) para a aferição e observação do impacto de dispositivos de sombreamento em parâmetros aerodinâmicos (pressão e velocidade) e, conseqüentemente, no potencial de desempenho da ventilação natural no modelo genérico. A seção seguinte, 5 Análise dos Resultados, apresenta a discussão dos dados aferidos.



5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

The ventilation conditions inside a building are among the primary factors determining human health, comfort and well-being. They have a direct effect on the human body through the physiological effect of air purity and motion, and an indirect effect through their influence on the temperature and humidity on the indoor air and surfaces.

(GIVONI, 1976, p. 259)

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios desenvolvidos nos túneis de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Obedecendo uma ordem cronológica e uma hierarquia metodológica, primeiramente são apresentados os resultados provenientes do túnel de vento do IPT, os quais fundamentaram a proposição de uma nova matriz ensaiada no túnel de vento do LNEC e, portanto, discutidos na sequência.

Alinhadas com o objetivo geral desta tese, as análises – do impacto na ventilação natural em um modelo genérico ocasionado pela adoção de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento – foram realizadas a partir de vários produtos gráficos e estruturadas em etapas específicas para cada túnel de vento. Desta forma, antes do procedimento destas análises, itens introdutórios são apresentados e descrevem os métodos utilizados e os produtos resultantes.

Para ambos os resultados (do IPT e do LNEC), algumas ressalvas são importantes para garantir o correto entendimento das análises: (a) rotações horárias e anti-horárias da geometria em relação ao escoamento são indicadas por ângulos de incidência positivos e negativos, respectivamente; (b) as nomenclaturas barlavento e sotavento remetem à situação da geometria exposta ao escoamento a 0°, que a abertura de entrada, em que os dispositivos de sombreamento são utilizados, encontra-se a barlavento e, a abertura oposta, a sotavento. Nas demais incidências, estas nomenclaturas são mantidas, mas indicam a rotação desta primeira situação, ou seja, a 15° significa que a face (inicialmente) a barlavento, encontra-se a 15° (no sentido horário) em relação ao escoamento.

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS: ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO DO IPT

Nesta subseção são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados no túnel de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Os métodos de análise destes dados foram estruturados em duas etapas subsequentes, são elas (Figura 60):

Etapa 01: Análise do impacto na **distribuição de pressão** através dos **coeficientes de pressão (Cps)** devido ao vento na envoltória do modelo genérico nos cenários avaliados;

Etapa 02: Análise do impacto no **diferencial médio de pressão** das faces com aberturas ($\Delta C_{pm} = C_{pm} \text{ barlavento} - C_{pm} \text{ sotavento}$) do modelo genérico para os diferentes cenários. E, na sequência, da **discrepância do diferencial de pressão local** entre o modelo avaliado com sombreamento e o modelo genérico selado ($Dif = \Delta C_p \text{ local com sombreamento} - \Delta C_p \text{ local referência}$).

Figura 60: Estrutura da análise de resultados do IPT.



Fonte: A Autora (2020).

5.1.1 Etapa 01: Análise do impacto na distribuição de pressão

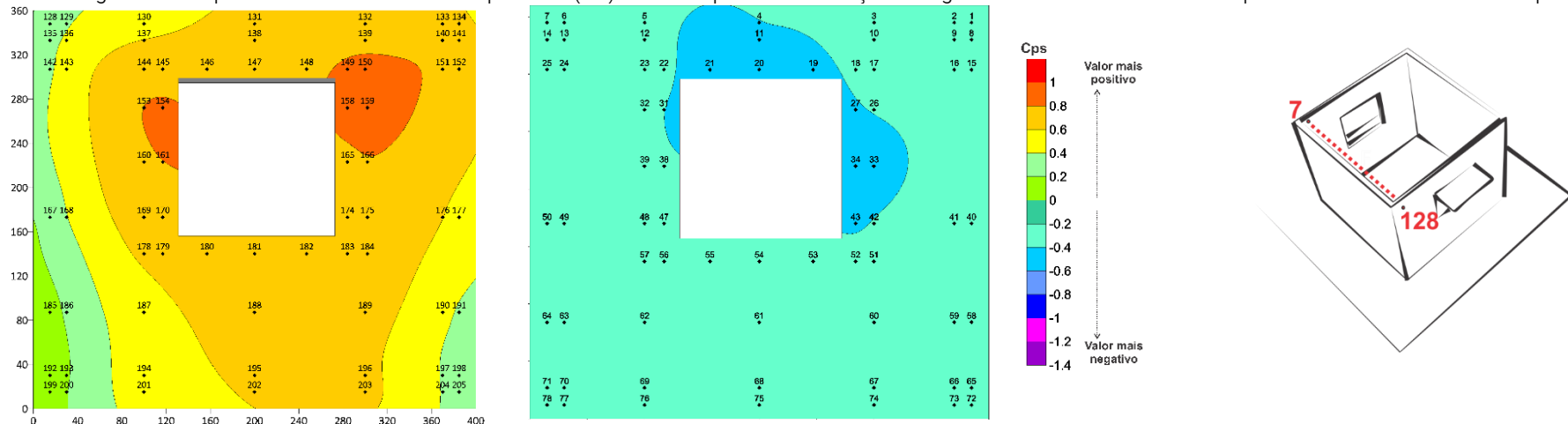
A avaliação do impacto dos dispositivos de sombreamento nos coeficientes de pressão (Cps) devido ao vento aferidos nas superfícies externas do modelo genérico foi realizada por meio de gráficos de contorno e de linhas. Os gráficos de contorno, elaborados a partir da associação das coordenadas (x, y) das tomadas de pressão (TP) aos seus respectivos valores, foram criados para as faces com aberturas (barlavento e sotavento). Os valores de Cp foram distribuídos em uma escala de -1,4 a 1,0, com intervalo de 0,2, sendo as cores mais próximas ao vermelho indicativas dos maiores valores desta variável (Cps mais positivos) e ao roxo, dos menores (Cps mais negativos) (Figura 61).

Os gráficos de linhas correlacionaram os valores de Cps ao longo de dois perímetros (L) nas faces do modelo genérico para os diversos cenários avaliados. No perímetro superior, localizado a aproximadamente 92% da altura da geometria, os valores de Cps foram plotados em linhas sólidas. Já no inferior, a 24% desta mesma altura, em linhas tracejadas. Esses perímetros percorrem as faces do modelo no sentido anti-horário, ou seja, os primeiros valores apresentados no gráfico fazem referência à face barlavento, seguido dos dados correspondentes a lateral 02, sotavento e lateral 01 (Figura 62).

A distribuição das pressões na envoltória de uma geometria é sensível à sua forma, a existência ou não de anteparos em seu entorno imediato e/ou de suas aberturas e a direção do vento incidente. Dentre estes aspectos, apenas a geometria dos dispositivos de sombreamento e a incidência do vento foram variados. Desta forma, priorizou-se uma análise comparativa das diferentes tipologias ensaiadas (**G1A**, modelo genérico selado; **G1B**, modelo genérico com aberturas; **G2A**, com dispositivo horizontal; **G2B**, sombreamentos combinados e, **G2C**, com dispositivos verticais) por ângulo de incidência de vento. Foram ensaiadas oito incidências de vento com rotação da geometria no sentido horário (0° a 90° com intervalos de 15° e 180°).

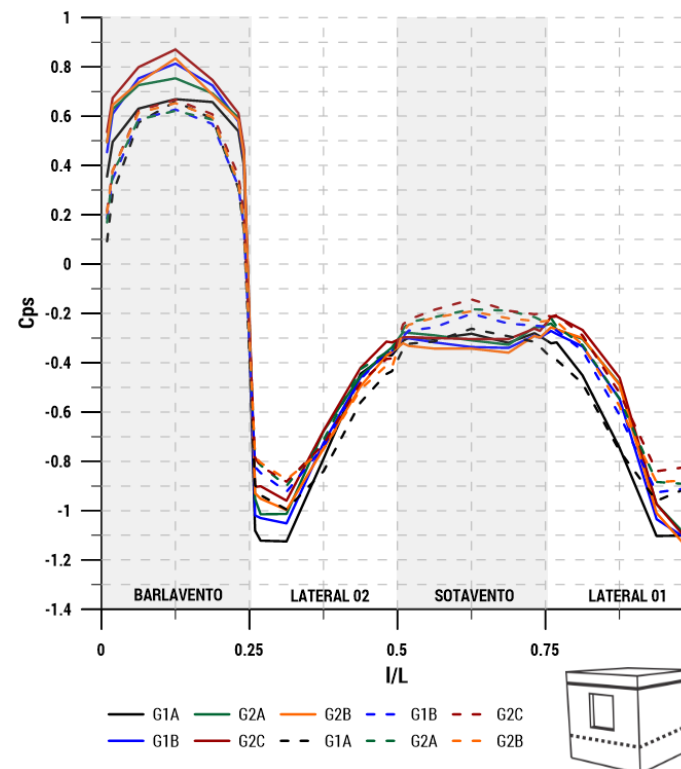
A Tabela 26 e a Tabela 27 reúnem os gráficos de contorno e de linhas da distribuição de pressão para todas as tipologias e incidências de vento. Inicialmente, discutiu-se detalhadamente os impactos para a incidência do vento de 0° . Posteriormente, as análises foram expandidas para as demais rotações (de 15° a 90°) e as conclusões sintetizadas na Tabela 28.

Figura 61: Mapeamento das tomadas de pressão (TP) utilizado para a elaboração dos gráficos de contorno e escala para a leitura dos dados de Cps.



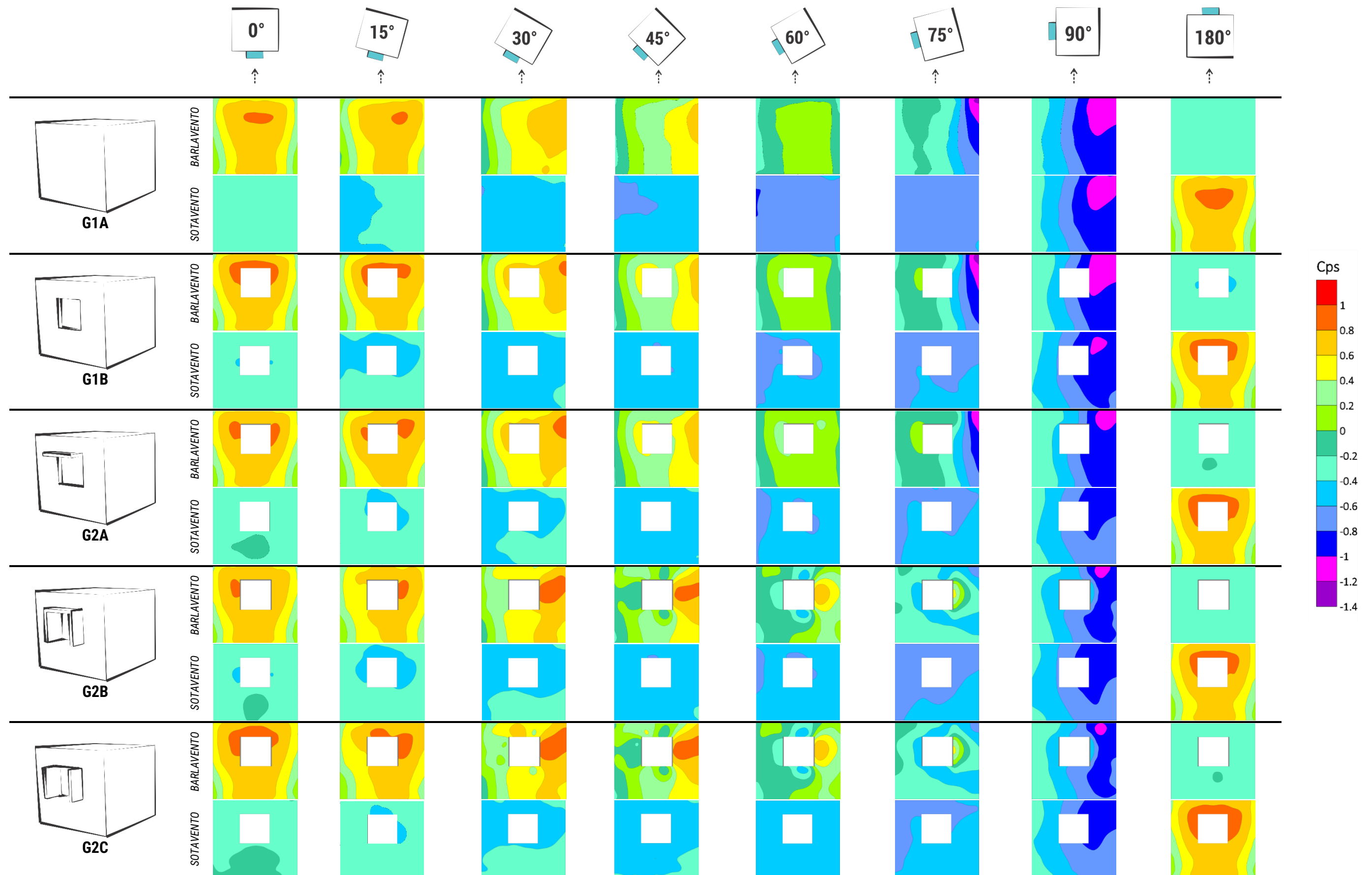
Fonte: A Autora (2020).

Figura 62: Exemplo do gráfico de linhas utilizado para a análise dos Cps ao longo de dois perímetros (superior, linha sólida e, inferior, tracejada) nas faces do modelo genérico para os diversos cenários avaliados.



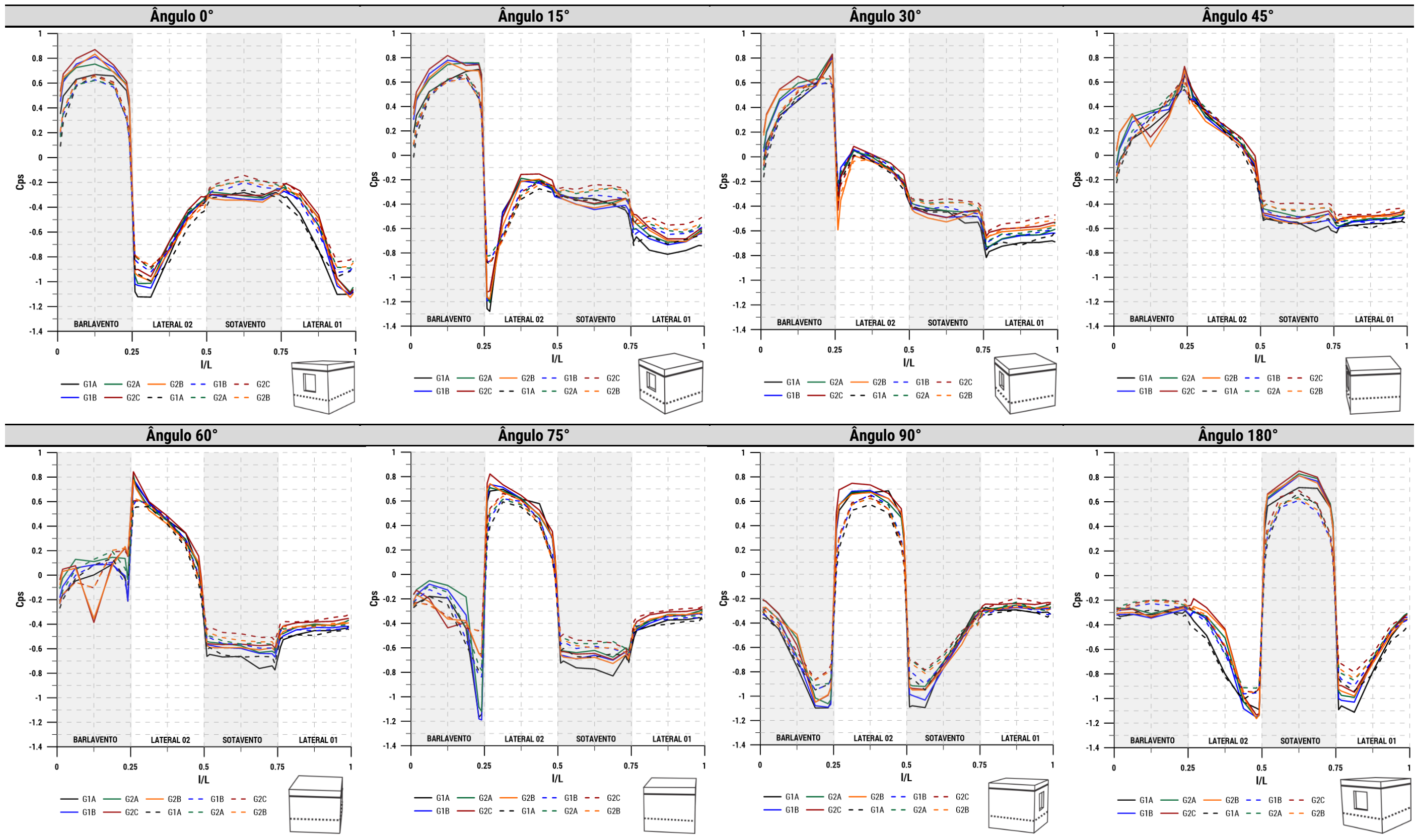
Fonte: A Autora (2020).

Tabela 26: Gráficos de contorno ilustrando a distribuição de Cps nas faces com aberturas (barlavento e sotavento) nas diferentes tipologias (G1A, G1B, G2A, G2B, G2C) para cada ângulo de incidência de vento (0° a 90° e 180°).



Fonte: A Autora (2020).

Tabela 27: Distribuição de Cps ao longo de dois perímetros (superior – linha sólida e inferior – linha tracejada) nas diferentes tipologias (G1A, G1B, G2A, G2B e G2C) para cada ângulo de incidência de vento (0° a 90° e 180°).

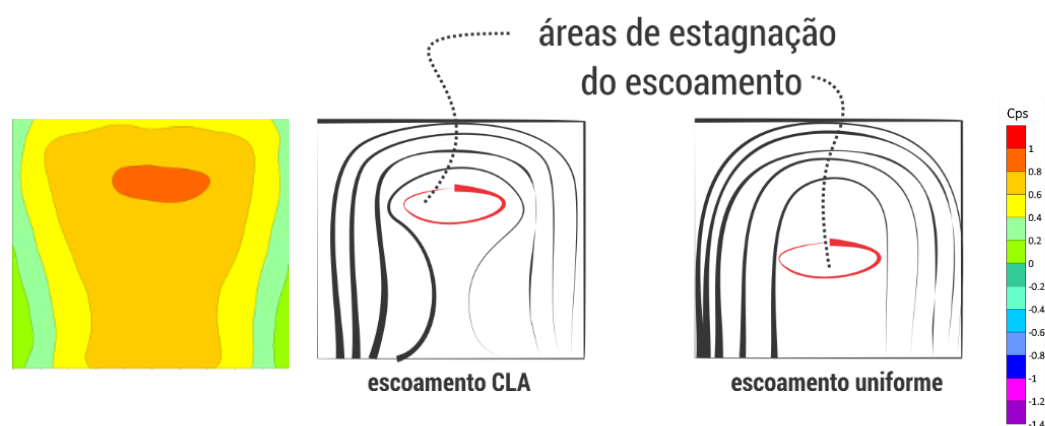


Fonte: A Autora (2020).

5.1.1.1 Ângulo de incidência = 0°

A tipologia **G1A**, modelo genérico selado, apresenta uma distribuição de pressão coerente à literatura científica para geometrias semelhantes (LIDDAMENT,1996; AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977; MELARAGNO,1966). Em um escoamento com Camada Limite Atmosférica (CLA), em que a velocidade do vento varia em função da altura, a distribuição de pressão na face a barlavento também varia pelo mesmo motivo. Desta forma, a área de estagnação, caracterizada por Cps máximos em decorrência de velocidades nulas, localiza-se a uma altura de aproximadamente 80% do total da altura da face da geometria (AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977). Em situações de escoamento uniforme, devido à constância da velocidade de vento independente do incremento da altura, esta área seria deslocada ao ponto médio da face a barlavento (Figura 63).

Figura 63: Localizações típicas da área de estagnação em escoamento uniforme e com CLA.



Fonte: A Autora (2021).

Na área de estagnação ocorre a repartição do fluxo que migra em direção às quinas da geometria, ganhando velocidade (tangencial à superfície) durante este percurso e, conseqüentemente, imprimindo menores valores de pressão em suas superfícies. Nas quinas ocorrem as zonas de separação do escoamento e a força centrífuga resultante promove a redução da pressão e dos valores de Cps nesta região (a jusante da quina). Em suma, tem-se na face a barlavento da tipologia **G1A**, valores maiores de Cps (de 0,6 a 1,0) situados na região central e menores nas proximidades das quinas (de 0,4 a 0). A área de estagnação e, portanto de Cps mais positivos (próximos ou igual a 1,0), localiza-se a uma altura de aproximadamente 80% do total da face.

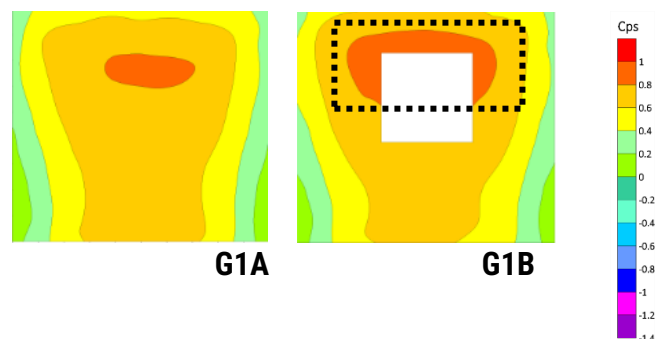
A inserção de aberturas idênticas (de área equivalente a 1,0 m² no protótipo e 0,018 m² no modelo reduzido) e centralizadas nas larguras das faces a barlavento e a sotavento, representa uma porcentagem de 12% de área de abertura em cada fachada correspondente e caracteriza a tipologia **G1B**.

Esta tipologia configura um exemplar clássico de ventilação cruzada em edificações e vastamente investigado pela literatura científica. A disposição das aberturas de entrada e saída nas zonas de maior e menor pressão, respectivamente, configura uma situação de máximo diferencial de pressão e, conseqüentemente, de máxima eficiência na circulação de ar entre elas (MELARAGNO, 1966).

Na situação de incidência de vento a 0°, uma expansão da área de estagnação é verificada na face a barlavento da tipologia **G1B** (Figura 64). A maior abrangência desta área, em relação à tipologia **G1A**, acima e nas laterais da abertura ocorre devido à repartição do fluxo, que uma parte migra em direção às quinas da geometria e outra é redirecionada ao seu interior. Valores de Cps menos positivos (de 0,4 a 0) continuam a existir nas proximidades das quinas, no entanto ocupam uma menor área, principalmente na altura da abertura em decorrência da expansão da área de estagnação. Nota-se pouca

discrepância entre as distribuições de pressão nas faces a barlavento das tipologias **G1A** e **G1B**, sendo as maiores diferenças restritas ao entorno imediato da abertura. Segundo Aynsley, Melbourne e Vickery (1977), a utilização de valores de coeficientes de pressão de um modelo selado é válida para o mesmo com abertura quando esta ocupar até 20% da área da fachada em que está locada.

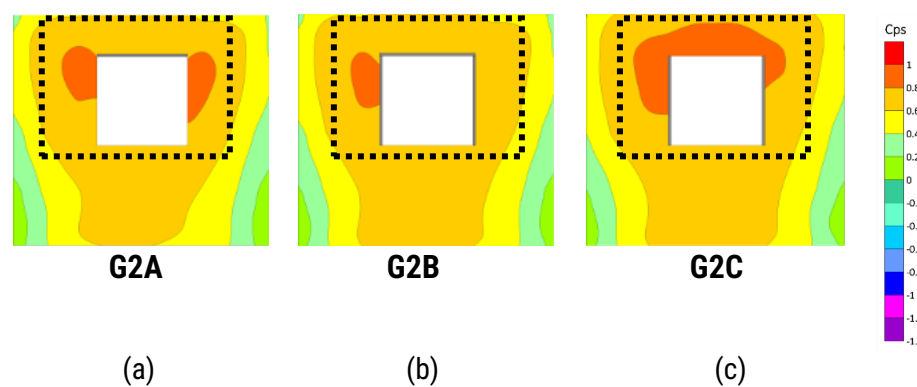
Figura 64: Expansão da área de estagnação (demarcada na figura) na geometria G1B decorrente da inserção das aberturas no modelo genérico.



Fonte: A Autora (2020).

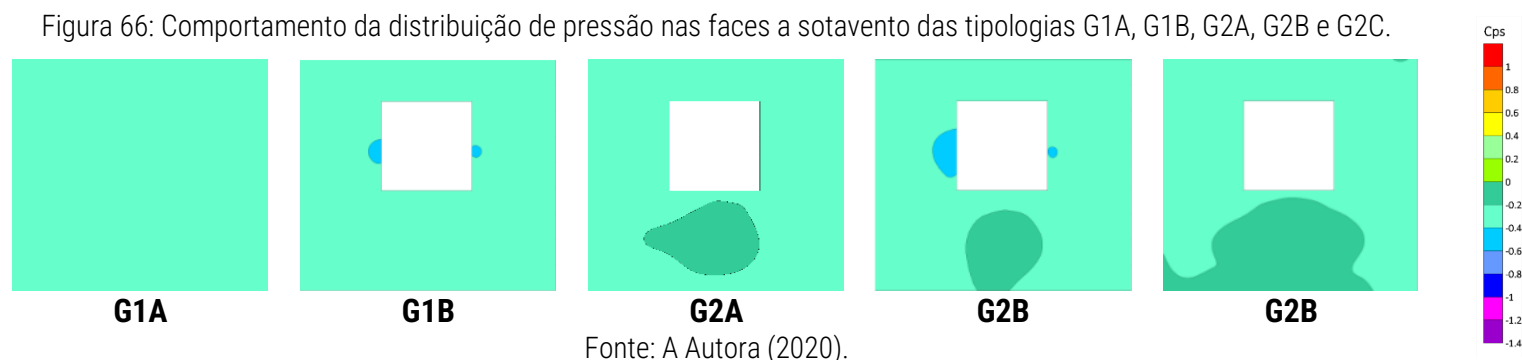
A inclusão de um dispositivo de sombreamento horizontal à abertura a barlavento do modelo genérico, de profundidade equivalente a 0,5 m no protótipo, caracteriza a tipologia **G2A**. A adição deste elemento impacta diretamente na conformação da área de estagnação. O dispositivo direciona o jato de entrada, além de criar uma zona de separação do escoamento e, assim reduzir os valores de Cps na região logo acima da abertura (transpondo-os da faixa de 0,8 a 1,0 para o intervalo anterior, de 0,6 a 0,8) (Figura 65 a). A tipologia **G2B** conjuga os dispositivos de sombreamento horizontal e os verticais e resulta em uma redução significativa da área de estagnação (área com Cps de 0,8 a 1,0) em razão das zonas de separação originadas pelos próprios dispositivos de sombreamento (Figura 65 b). A tipologia **G2C** apresenta dispositivos de sombreamento verticais localizados em ambos os lados da abertura a barlavento. Para a situação de 0° , o comportamento das distribuições de pressão se aproxima do verificado na tipologia **G1B** para a mesma situação. Há um ligeiro aumento das áreas correspondentes a valores de Cps mais positivos (de 0,6 a 1,0) que é consequência da expansão da área de estagnação. Esta expansão é justificada pelo redirecionamento do fluxo para o interior da geometria, aumentando esta área na porção acima da abertura (Figura 65 c).

Figura 65: Reduções nas áreas de estagnação (demarcadas nas imagens) nas tipologias com sombreamentos (G2A, G2B e G2C) devido à ação das zonas de separação.



Fonte: A Autora (2020).

O comportamento das distribuições de pressão nas faces a sotavento se manteve praticamente constante para todas as tipologias avaliadas, com Cps na ordem de -0,2 a -0,4. O aparecimento de zonas caracterizadas pela redução dos valores negativos (intervalo de 0 a -0,2) nas proximidades da abertura ocorre devido à zona de separação imposta pelas próprias arestas da abertura ao jato de saída e pelo retorno de parte deste jato que sai da abertura (recirculações).



A partir da Tabela 27, o comportamento das distribuições de pressão nas demais faces do modelo genérico (laterais 01 e 02) para a incidência de 0° foram averiguados por meio dos valores de Cps ao longo de dois perímetros (superior e inferior) para as diferentes tipologias ensaiadas. Poucas divergências nestes valores, correspondentes às tomadas de pressão situadas nas faces laterais, são verificadas nesta situação. Nestas fachadas, os Cps reduzem no sentido de barlavento a sotavento, sendo próximos ou superiores a -1,0 nas quinas junto à face barlavento e, a -0,2, na situação oposta. Em síntese, na face a barlavento, os dispositivos de sombreamento incrementam os valores dos Cps situados no perímetro superior, devido à expansão da zona de estagnação, sendo o maior aumento verificado na tipologia **G2C**. Poucas variações são observadas no perímetro inferior, com exceção da face a sotavento, que devido à ação das zonas de separação promovidas pelas arestas da abertura ao jato de saída e das recirculações, têm seus valores alterados.

5.1.1.2 Demais ângulos de incidência do vento

A Tabela 28 sintetiza os padrões observados para as faces com aberturas (barlavento e sotavento) nas diferentes tipologias (G1A, G1B, G2A, G2B e G2C) para os demais ângulos de incidência de vento (15° a 90° e 180°), conforme ilustrado na Tabela 26.

Quanto às faces laterais, observadas a partir da Tabela 27, pouca diferença pode ser observada dentre as tipologias ensaiadas para cada ângulo de incidência do vento. Em geral, de modo comparativo, maiores perturbações são notadas nas tomadas localizadas nos perímetros inferiores, principalmente em incidências mais oblíquas. Esse padrão é decorrente da ação da camada limite e das diferentes configurações das zonas de separação e das esteiras de vento ocasionadas pelas próprias arestas do modelo ao facear o escoamento. Nos ângulos de incidência de 15° e 30° , variações nos perímetros correspondentes a lateral 01 (face a jusante do escoamento), são justificadas pela ação conjugada, na conformação da esteira, da inclinação da geometria em relação ao escoamento somada à adoção dos dispositivos.

Nos ângulos de 60° e 75°, observa-se uma maior discrepância entre o padrão das tipologias com aberturas (G1B, G2A, G2B e G2C), em relação à selada G1A. Em síntese, o impacto da inclusão dos dispositivos de sombreamento, independente da referência analisada (modelo genérico com aberturas ou selado) é mais expressivo nas faces a barlavento e a sotavento em todos os cenários avaliados.

Tabela 28: Tabela-resumo do comportamento de distribuição de pressão nas faces com aberturas (barlavento e sotavento) para as diferentes tipologias (G1A, G1B, G2A, G2B e G2C) para os demais ângulos de incidência do vento (15° a 90° e 180°) (continua)


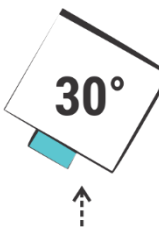
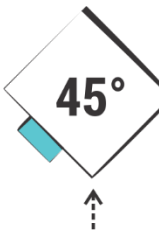
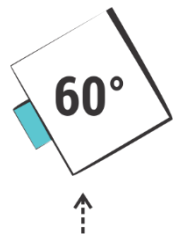
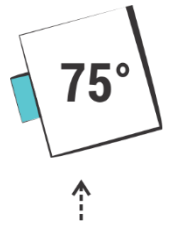
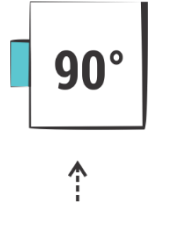

	G1A	G1B	G2A	G2B	G2C
	Barlavento Inclinação dos contornos, perda de simetria e redução da área de estagnação devido à angulação da geometria em relação ao escoamento.	Aumento da área de estagnação, principalmente na região superior a montante da abertura em razão da repartição do escoamento que parte migra em direção às quinas e parte é direcionado para o interior da geometria.	Redução da área de estagnação. O protetor horizontal promove a separação do escoamento e a diminuição dos valores de pressão na parte superior da abertura.	Restrição da área de estagnação à região a montante da abertura e do primeiro protetor vertical. Valores mais negativos a jusantes são resultantes da ação combinada do protetor horizontal e do segundo dispositivo vertical frente ao escoamento.	Concentração da área de estagnação na região superior do vão e a montante do dispositivo. Redução dos valores de Cps na região posterior do protetor a jusante da abertura devido à zona de separação promovida pela sua presença.
	Sotavento Cps entre -0,2 a -0,6. Devido à inclinação da geometria em relação ao escoamento, as zonas de separação têm os seus formatos também alterados e, conseqüentemente, variações nos valores de velocidade e pressões	Cps entre -0,2 a -0,6, sendo os valores mais negativos concentrados no entorno imediato do vão, decorrentes da ação da zona de separação ocasionada pelas			
	Barlavento Valores de Cps variando entre 0,6 a 0,8 nas proximidades da aresta a montante e de 0 a -0,2 na aresta oposta.	Expansão dos contornos correspondentes aos valores mais positivos. Área de estagnação restrita à aresta superior a montante.	Expansão da área de estagnação.	Devido aos protetores verticais, concentração dos valores mais positivos na região a montante da abertura e dos dispositivos em razão do confinamento do escoamento nesta região e de valores menos positivos ou negativos na região a jusante da abertura e dos sombreamentos em razão à zona de separação originada pela presença dos mesmos.	
	Sotavento Quase a totalidade da face apresenta Cps entre -0,4 a -0,6.	Cps mais negativos (valores entre -0,4 a -0,6) no entorno imediato da abertura em razão da inclinação do jato de saída.			
	Barlavento O posicionamento oblíquo da geometria em relação ao escoamento resulta em uma grande variação de pressão ao longo da largura da face barlavento (Cps variando de 0,6 a -0,4)	Áreas correspondentes aos Cps mais positivos na região a montante da abertura e a jusante da abertura (entorno imediato).	Aumento da área de estagnação e concentração das correspondentes aos valores de Cps mais positivos na região anterior à abertura e aos protetores. Expansão da área de Cps intermediários na região central da face.		Valores de Cps mais positivos localizados na região a montante do primeiro protetor, devido ao confinamento do escoamento nesta região. Valores intermediários ao centro e menos positivos ou negativos na região posterior ao segundo protetor (a jusante da abertura).
	Sotavento Valores de Cps variando, majoritariamente, no intervalo de -0,4 a -0,6.				

Tabela 28: Tabela-resumo do comportamento de distribuição de pressão nas faces com aberturas (barlavento e sotavento) para as diferentes tipologias (G1A, G1B, G2A, G2B e G2C) para os demais ângulos de incidência do vento (15° a 90° e 180°) (conclusão).

	Barlavento	Devido à angulação do modelo em relação ao escoamento, a sua aresta promove uma zona de separação e a face tende a ficar com distribuição de pressão mais similar entre as tipologias, por estar localizada na sombra de vento. Valores de Cps entre 0 a 0,4 são verificados na região central da geometria e valores menos positivos ou negativos próximos às arestas da geometria.			Valores mais positivos verificados na região a montante da abertura e mais negativos a jusante e na parte superior do vão em razão das zonas de separação ocasionadas pela presença dos dispositivos de sombreamento.
	Sotavento	Cps entre -0,6 a -0,8.	Valores de Cps variando, majoritariamente, no intervalo de -0,4 a -0,6, com áreas mais negativas nas proximidades do vão ou da aresta decorrentes da influência do jato de saída ou da assimetria da sombra de vento, respectivamente.		
	Barlavento	Face praticamente na sombra de vento com Cps variando de -1,4 na extremidade superior a montante a -0,2 na aresta oposta da geometria.	Aumento da área correspondente aos Cps entre 0 a -0,2 na região central da geometria e o surgimento de uma região positiva (Cps entre 0 a 0,2) no entorno a jusante da abertura.	A presença de elementos verticais resulta no aparecimento de áreas com Cps mais positivos na região a montante da abertura e dos dispositivos e de Cps mais negativo na região posterior.	
	Sotavento	Cps entre -0,6 a -0,8.	Valores de Cps entre -0,4 a -0,8.		
	Barlavento	Face localizada na zona de separação com valores de Cps variando de -1,2 a -0,2.	Aumento da área correspondente a Cps mais negativos na quina superior a montante.	Redução da área mais negativa na quina superior a montante e expansão da área correspondente aos Cps menos negativos nas proximidades da aresta a jusante.	Redução da área mais negativa na quina a montante e surgimento de uma área caracterizada por Cps menos negativos a montante do primeiro dispositivo.
	Sotavento	Face localizada na zona de separação do escoamento e com grande diferencial de pressão ao longo de sua largura (Cps variando de -1,2 na quina com a face a barlavento a -0,2 na aresta oposta).			
	Barlavento	Cps entre -0,2 a -0,4.			
	Sotavento	Contornos simétricos de distribuição de pressão e área de estagnação localizada à aproximadamente 80% da altura da face.	Expansão da área de estagnação e consequentemente dos demais contornos em decorrência da inclusão da abertura.	Aumento da área de estagnação no entorno imediato da abertura.	Configuração de pressão semelhante ao caso base com aberturas.

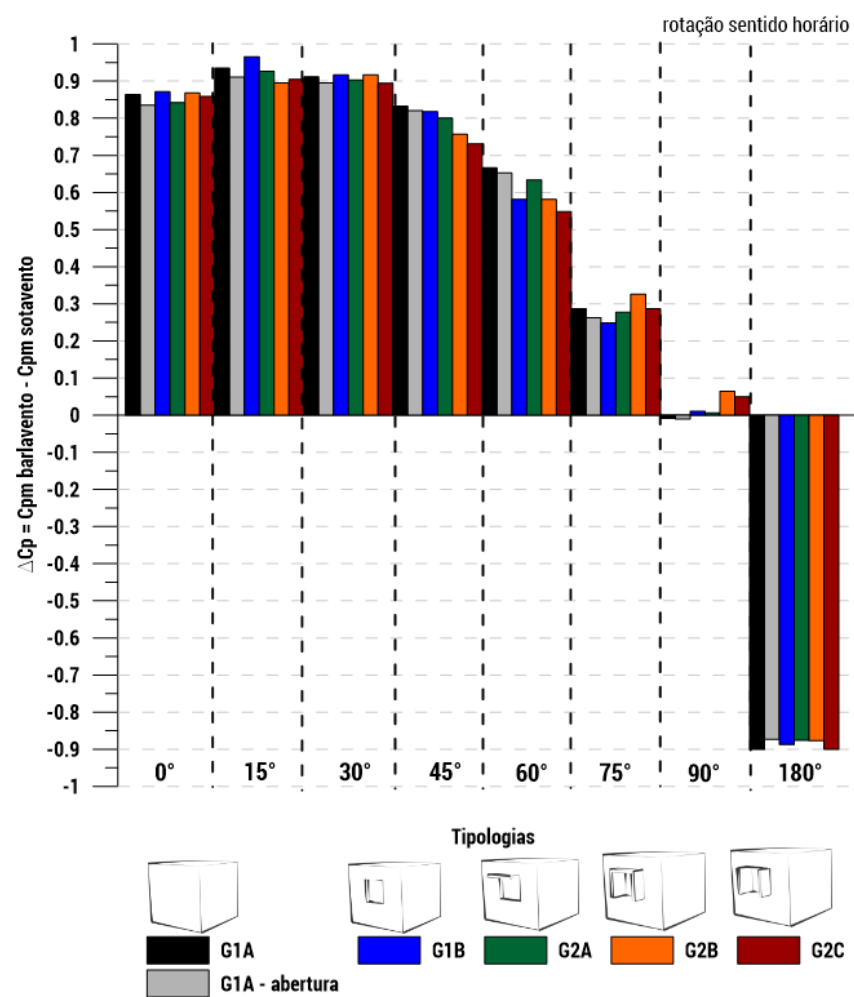
Fonte: A Autora (2020).

5.1.2 Etapa 02: Análise do impacto no diferencial de pressão (ΔC_{pm})

Após a verificação do comportamento da distribuição de pressão (por meio dos C_{ps}) nas envoltórias das tipologias ensaiadas, calculou-se o coeficiente médio de pressão para as respectivas faces barlavento (C_{pm} barlavento) e sotavento (C_{pm} sotavento) e, na sequência, o diferencial entre elas ($\Delta C_{pm} = C_{pm}$ barlavento – C_{pm} sotavento). Os valores correspondentes aos C_{pm} barlavento, C_{pm} sotavento e ΔC_{pm} para os diferentes cenários são apresentados no Apêndice D.

A Figura 67 apresenta os valores de ΔC_{pm} calculado para as tipologias de referência (G1A e G1B) e para as com dispositivos de sombreamento (G2A, G2B e G2C). Para a G1A, modelo genérico selado, em particular, duas possibilidades de obtenção deste parâmetro foram verificadas: (a) média da face considerando as tomadas de pressão (TP) localizadas nas áreas destinadas às aberturas (barras em preto) e; (b) média da face desconsiderando estas TP (barras em cinza), e desta forma, igualando-se ao número de tomadas de pressão das demais tipologias. Poucas divergências são observadas entre as duas referidas opções, independente do ângulo de incidência de vento.

Figura 67: Diferencias médios de pressão ($\Delta C_{pm} = C_{pm}$ barlavento – C_{pm} sotavento) calculados para as tipologias G1A (com e sem as tomadas de pressão localizadas nas aberturas), G1B, G2A, G2B e G2C para as diferentes incidências de vento (0° a 90° e 180°).



Fonte: A Autora (2021).

De forma análoga à análise anterior (Cps), procede-se a investigação acerca do impacto dos dispositivos de sombreamento no ΔC_{pm} por ângulo de incidência de vento. Embora, as divergências entre os modelos de referência (G1A e G1B) sejam reduzidas, optou-se por investigar a influência da adoção dos sombreamentos em relação às duas alternativas⁶⁹.

5.1.2.1 Impacto no diferencial de pressão médio (ΔC_{pm}): ângulos de incidência de vento

A Tabela 29 apresenta para todos os cenários ensaiados, com exceção do ângulo de incidência de 90°, o percentual de impacto no diferencial de pressão médio (ΔC_{pm}) calculado em relação às duas referências: (a) o modelo genérico selado (G1A) e; (2) modelo genérico com aberturas (G1B), ambos sem dispositivos de sombreamento, já que o objetivo é mensurar a influência da inclusão dos protetores neste parâmetro (ΔC_{pm}). Os resultados referentes ao ângulo de 90° estão reunidos em uma seção particular devido à singularidade do padrão de impacto verificado. É válida a ressalva de que as tipologias com sombreamentos foram ensaiadas em modelo aberto, logo os seus respectivos ΔC_{pm} não contemplam as tomadas de pressão localizadas nas aberturas e, conseqüentemente, espera-se maiores discrepâncias dos seus dados aos da G1A e, menores em relação à G1B.

As cores verde e vermelho são utilizadas para mapear situações de impacto positivo (sem alteração ou incremento do ΔC_{pm}) e negativo (redução do ΔC_{pm}), respectivamente.

Tabela 29: Percentual de impacto nos diferenciais médios de pressão ($\Delta C_{pm} = C_{pm} \text{ barlavento} - C_{pm} \text{ sotavento}$) decorrente da adoção dos dispositivos de sombreamento em relação aos modelos de referência (G1A e G1B).

	Referência: G1A (modelo genérico selado)							Referência: G1B (modelo genérico com aberturas)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	180°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	180°
G2A	-3%	-1%	-1%	-4%	-5%	-3%	-3%	-3%	-4%	-1%	-2%	9%	11%	-1%
G2B	0%	-4%	1%	-9%	-13%	13%	-3%	0%	-7%	0%	-8%	0%	31%	-1%
G2C	-1%	-3%	-2%	-12%	-18%	0%	0%	-1%	-6%	-2%	-11%	-6%	15%	1%

Fonte: A Autora (2021).

Em relação à referência G1A, quase a totalidade dos cenários avaliados (com sombreamentos) é caracterizada por impacto negativo no diferencial médio de pressão, com exceção da tipologia G2B (0°, 30° e 75°) e G2C (75° e 180°). Já, **quando a referência é a G1B**, impacto positivo é observado, além das situações anteriormente citadas, na tipologia G2A (60° e 75°) e G2B (60°).

⁶⁹ Nesta análise o valor de ΔC_{pm} calculado para a tipologia G1A considerou os valores correspondentes às tomadas de pressão localizadas nas regiões destinadas às aberturas.

Para o ângulo de incidência de 0° , o diferencial médio de pressão entre as faces (ΔC_{pm}) é certamente positivo. Os valores de C_{ps} a barlavento são consideravelmente maiores aos pontos equivalentes a sotavento, que se mantêm praticamente constantes (C_{ps} entre 0 a -0,4) para todas as tipologias. A inclusão das aberturas à tipologia G1A, caracteriza a G1B. Como discutido em item prévio (ver item 5.1.1), há um aumento da área de estagnação e, conseqüentemente, um maior diferencial de pressão na parte superior da abertura, sendo este incremento de 1%.

A adição de um dispositivo de sombreamento horizontal (G2A) cria uma zona de separação que influencia os valores das tomadas de pressão (TP) acima da abertura. Nesta tipologia, o ΔC_{pm} apresenta uma redução de -3% independente da referência adotada. Na G2C, o decréscimo percentual de -1% ocorre tanto em relação à G1A quanto à G1B. A G2B, caracterizada por protetores verticais e horizontal combinados, não apresenta discrepâncias quando comparado às referências. Em síntese, nota-se pouca influência dos dispositivos de sombreamento no ΔC_{pm} para a situação 0° , independente da referência de análise adotada.

Os resultados para os ângulos de incidência de vento de 15° e 30° são discutidos em conjunto, devido à semelhança verificada nos seus padrões de impacto no diferencial médio de pressão dentre as tipologias analisadas. Aos 15° , decréscimos de -1% a -4% e de -4% a -7% são observados em relação às referências G1A e G1B, respectivamente. Aos 30° , impacto negativo de mesma magnitude é observado, independente da referência, para as tipologias G2A (-1%) e G2C (-2%) e impacto positivo para G2B.

Na situação de vento incidindo a 45° , maiores reduções são atribuídas às tipologias com componentes verticais, G2B e G2C, sendo de -9% e -12%, respectivamente, quando a referência é a tipologia G1A e de -8% e -11% para a G1B. Esses decréscimos mais expressivos, independente da referência de análise utilizada, são decorrentes do diferencial de pressão promovido pelos elementos verticais ao longo do comprimento da face, concentrando zonas mais positivas na região a montante do primeiro elemento e áreas pouco positivas ou negativas a jusante do segundo elemento. A utilização de um dispositivo de sombreamento horizontal impacta, em menor grau, o ΔC_{pm} independente da referência adotada.

Aos 60° e 75° , uma maior discrepância entre os ΔC_{pm} calculados para os modelos selado e com aberturas é notada (0,67 e 0,58 para 60° e 0,29 e 0,25, para 75° , respectivamente). Essa diferença repercute nos percentuais e indica impacto positivo para quase todas as tipologias, exceto a G2C (60°), ou seja, incremento do ΔC_{pm} quando comparada à G1B e negativo, redução do ΔC_{pm} , para algumas destas situações, quando verificadas em relação à G1A (G2A e G2B a 60° e G2A a 75°).

Na configuração de vento incidindo a 180° as tipologias apresentam pequenas discrepâncias em relação às referências, indicando pouca influência dos dispositivos de sombreamento.

Em suma, conclui-se que independente da referência de análise adotada (G1A ou G1B), a inclusão de dispositivos de sombreamento na face a barlavento não impacta significativamente o ΔC_{pm} na faixa de incidência de vento de 0° a 30° . Impactos mais relevantes neste parâmetro são averiguados pela primeira vez na situação de 45° , principalmente nas tipologias G2B e G2C. Essa redução é ainda mais acentuada na situação de 60° . Para situações de vento incidindo a 75° independente da referência adotada, a inclusão de dispositivos reflete um impacto positivo no ΔC_{pm} , exceto para a tipologia G2A quando a referência é G1A. Por fim, a 180° , os dispositivos de sombreamento pouco impactam o diferencial de pressão médio.

5.1.2.2 Impacto no diferencial de pressão: incidência a 90°

O impacto dos dispositivos de sombreamento no ΔC_{pm} para a situação de vento incidindo a 90°, devido ao seu padrão singular de resultados, é analisada nesta seção particular.

Nesta situação, o escoamento faceia uma superfície opaca e ambas as aberturas do modelo estão situadas nas zonas de separação, paralelas ao escoamento e, em condições de pressão muito semelhantes. Desta forma, o diferencial de pressão entre estas faces opostas independentemente da situação de referência adotada (G1A ou G1B) é praticamente nulo (-0,01 e 0,01, respectivamente).

A inclusão de dispositivos de sombreamento (G2A, G2B e G2C) na face a barlavento resulta em pequenos incrementos no ΔC_{pm} (variando de 0,01 a 0,06 em valor absoluto). No entanto, quando se analisa o percentual deste incremento, têm-se valores exorbitantes – na faixa de -175% a -887% quando a referência é a tipologia G1A e na faixa de -43% a 494% quando a referência é a G1B – justamente em razão dos valores extremamente baixos atribuídos às referências. Em síntese, a adoção de dispositivos de sombreamento incrementa minimamente o ΔC_{pm} na situação de 90°, sendo a tipologia G2B a que apresenta o melhor desempenho independente da referência de análise adotada.

5.1.2.3 Impacto no diferencial de pressão local

Após a verificação da influência da adoção dos dispositivos de sombreamento no diferencial médio de pressão (ΔC_{pm}) entre as faces destinadas às aberturas, calculou-se o diferencial de pressão local para cada cenário, isto é, a diferença entre os valores das TP a barlavento pela sua correspondente a sotavento ($\Delta C_p \text{ local} = C_p \text{ barlavento} - C_p \text{ sotavento}$). Na sequência, gráficos de contorno mapearam as discrepâncias entre os diferenciais de pressão locais das tipologias com sombreamentos ($\Delta C_p \text{ local com sombreamento}$), G2A, G2B e G2C e, o determinado para a tipologia de referência ($\Delta C_p \text{ local referência}$), neste caso, modelo genérico selado (G1A).

A Tabela 30 reúne os gráficos de contorno desta diferença ($Dif = \Delta C_p \text{ local com sombreamento} - \Delta C_p \text{ local referência}$) para os diversos cenários avaliados. Em virtude das tipologias com sombreamento serem avaliadas em modelo genérico com aberturas, as TP localizadas nas regiões destinadas às aberturas da G1A, foram desconsideradas nesta comparação. No entanto, o impacto desta simplificação já foi averiguado (Figura 67) e, por não apresentar variações significativas, foi empregado.

A escala da diferença varia de 1,0 a -1,0, sendo a gradação de tons avermelhados indicativos de uma diferença positiva e, para a variação das tonalidades de azul, o contrário é verdadeiro.

Em concordância com as análises anteriores (C_p s e ΔC_{pm}) poucas variações são observadas nas incidências de vento de 0° a 30° e 180°, independente da tipologia de sombreamento adotada. Nestas situações o intervalo da diferença se mantém entre 0,2 a -0,2, sendo, majoritariamente, classificado entre 0 e -0,2. Esse padrão é decorrente dos valores superiores de C_p encontrados na tipologia selada para as mesmas situações. A G1A, por não apresentar aberturas, não tem a sua distribuição de pressão influenciada pela ação do escoamento na abertura de entrada ou de saída, como observado nas demais. Algumas regiões pontuais, caracterizadas por diferenças mais positivas ou negativas, são notadas nas tipologias com elementos verticais devido à inclinação do escoamento em relação ao modelo nas rotações de 15° e 30°.

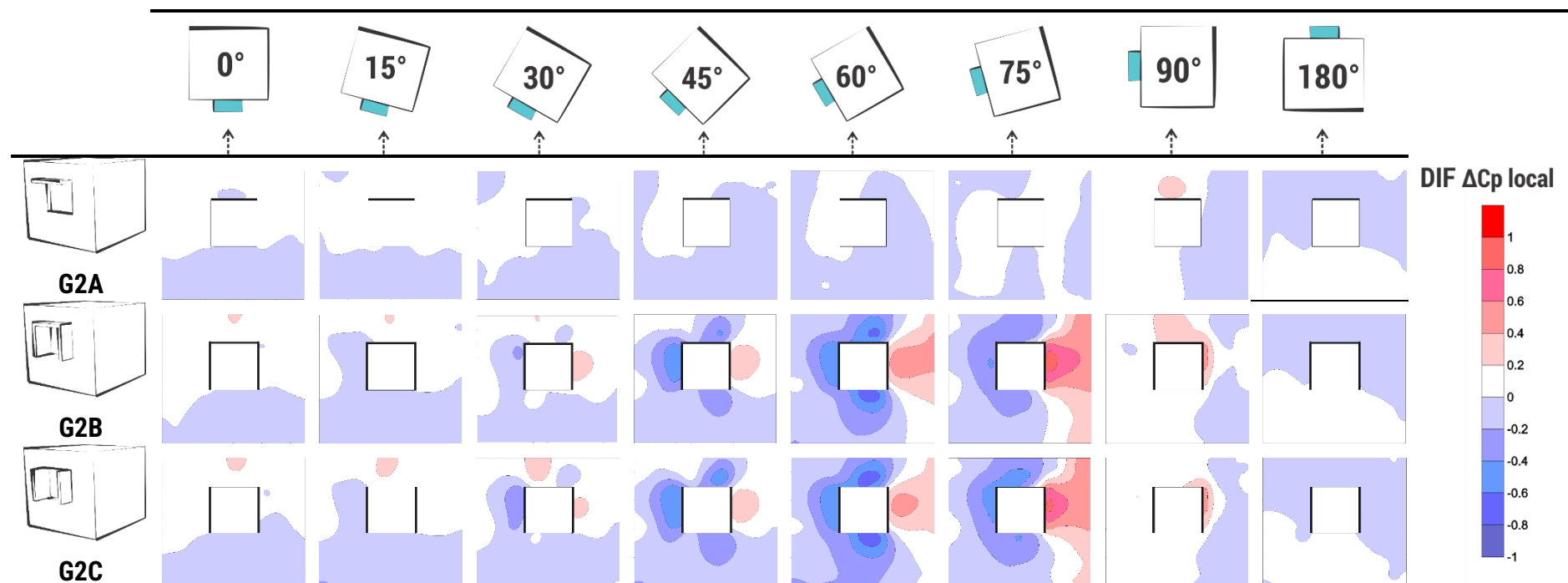
Esse padrão se intensifica nas incidências de 45° a 75° para as tipologias G2B e G2C, pelo mesmo motivo, indicando a concentração do escoamento a montante do primeiro elemento vertical (diferenças variando de 0,2 a 1,0) e o seu descolamento a jusante do segundo elemento (valores entre -0,2 a -0,8).

A 90°, todas as tipologias, apresentam em maior ou menor grau, diferenças positivas no entorno imediato da abertura, que justifica os incrementos dos ΔC_{pm} em relação ao modelo de referência, conforme já discutidos anteriormente.

Essa investigação concorda e reforça os padrões de impacto na distribuição de pressão previamente identificados: (a) menores influências dos dispositivos são verificadas no intervalo de 0° a 30° e a 180°, independente da tipologia; (b) a G1A (com dispositivo horizontal) apresenta impacto reduzido quando comparada às tipologias G2B e G2C, (b) maiores influências ocorrem a partir dos 45°, principalmente, nas tipologias com elementos verticais e, (d) a 90°, a inclusão dos dispositivos incrementa o diferencial entre as faces opostas.

Essas conclusões foram essenciais para a definição da matriz de ensaios do LNEC, conforme explicitado no item seguinte.

Tabela 30: Gráficos de contorno da diferença entre o diferencial de pressão local da tipologia com sombreamento em relação ao modelo genérico selado ($Dif = \Delta C_{p \text{ local com sombreamento}} - \Delta C_{p \text{ local referência}}$).



Fonte: A Autora (2021).

5.1.3 Conclusões e diretrizes para o delineamento da matriz de ensaios do LNEC

A estimativa da vazão e, conseqüentemente, do valor de renovação de ar por hora, como detalhado no item “2 Revisão Bibliográfica”, a partir do diferencial de pressão se configura em método analítico clássico de avaliação da ventilação natural, que de acordo com Aynsley, Melbourne e Vickery (1977), apresenta potencialidades e limitações. Segundo os autores, a restrição consiste na validade dos resultados apenas para geometrias, cujas aberturas

ocupem até 20% das áreas totais das fachadas correspondentes. Já, a principal vantagem pontuada, é a aplicabilidade deste método nas fases iniciais do processo de projeto, guiando às tomadas de decisões, para geometrias semelhantes, a partir de cálculos (por meio de dados de C_{ps} e C_{ds} conhecidos e disponibilizados) sem a necessidade de ensaios em túnel de vento.

A partir das conclusões alcançadas, com os dados oriundos dos ensaios no túnel de vento do IPT, estabeleceu-se a ordem de grandeza da inclusão, dos dispositivos de sombreamento externos ensaiados, nas variáveis de ventilação natural: C_{ps} e ΔC_p . Esse tipo de informação fornece ao projetista uma maior liberdade e consciência das suas decisões, principalmente durante as etapas iniciais, acerca da adoção conjunta de estratégias de sombreamento e ventilação natural. Ademais, essas conclusões foram essenciais para a identificação das potencialidades que foram exploradas a partir dos ensaios realizados no túnel de vento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Diante das conclusões, em razão do baixo impacto na distribuição de pressão, optou-se por desconsiderar a tipologia de G2A (com elemento horizontal) e o ângulo de incidência de 180° . Dentre as tipologias com elementos verticais em sua composição (G2B e G2C), selecionou-se a tipologia **G2B**, por congregar conclusões satisfatórias tanto sob o aspecto de ventilação quanto de sombreamento, para embasar a matriz de ensaios no túnel de vento do LNEC. Ademais, a complexidade desta geometria (por unir elementos horizontais e verticais) reforçou a decisão, ao passo que valorizou ainda mais a utilização de uma ferramenta robusta e de primeira ordem para sua investigação, e permitiu maiores explorações acerca das variações das características dos elementos de sombreamento (dimensões e posicionamento dos elementos de sombreamento em relação à abertura), assim como de sua geometria (outras possibilidades, mas que resultem em máscaras de sombra semelhantes) foram propostas.

Outra inclusão, na matriz de ensaios do LNEC, foi o ensaio das tipologias de sombreamento propostas em modelo genérico selado e com aberturas para que o impacto destes dispositivos na região destinada às aberturas também pudesse ser capturado. O mapeamento da diferença entre os diferenciais de pressão local das tipologias com e sem sombreamento também indicou a concentração das maiores discrepâncias no entorno imediato das aberturas. Essa constatação, pode indicar, que o diferencial de pressão médio, utilizado nas estimativas do potencial de ventilação natural no ambiente, para casos com sombreamento não, necessariamente, seja o valor médio da face. Variações acerca das áreas para a determinação deste diferencial de pressão efetivo também foram propostas nos ensaios no túnel de vento do LNEC.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS: TÚNEL DE VENTO DO LNEC

Esta subseção reúne a discussão dos resultados dos ensaios realizados no Túnel de Vento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Lisboa, Portugal, sob a supervisão do Engenheiro Dr. Fernando Marques da Silva.

O impacto quantitativo dos dispositivos de sombreamento nas variáveis aferidas – pressão externa, no formato de coeficientes de pressão (C_{ps}) devido ao vento, e velocidade média, a partir da relação entre as velocidades aferidas no centroide da abertura a sotavento e na altura de referência⁷⁰ (U_{jan}/U_{ref}) – foi analisado através de duas etapas sucessivas e progressivas, conforme ilustradas na Figura 68 e detalhadas na sequência:

⁷⁰ Velocidade média do escoamento na altura de referência (cobertura do modelo genérico – $H_{ref} = 0,36m$).

Figura 68: Estrutura da análise de resultados do LNEC.



Fonte: A Autora (2020).

Etapa 01: Primeiramente, investigou-se o impacto dos dispositivos de sombreamento nos adimensionais pós-processados (C_p e U_{jan}/U_{ref}) de modo individualizado para os diversos grupos e subgrupos tipológicos (G1: Referências; G2: Características -

Profundidade; G2: Características – Afastamento; G3: Geometria – Assimétricas; G3: Geometria – Simétricas e G3: Geometria – Complexas) em avaliações em modelo selado e com aberturas. A influência dos sombreamentos nos C_p s foi explorada por ângulo de incidência do vento, assim como nos ensaios do IPT, a partir de gráficos de contorno das faces destinadas às aberturas (barlavento e sotavento). Já, na velocidade média relativa (U_{jan}/U_{ref}), gráficos de linhas relacionaram seus valores aos diferentes ângulos de incidência do vento.

Etapa 02: a análise individual dos dados de C_p e U_{jan}/U_{ref} evidenciou a necessidade de investigação acerca de dois pontos primordiais: (1) das áreas das faces do modelo⁷¹ consideradas na determinação do diferencial de pressão efetivo (ΔC_p) e; (2) de possíveis ajustes no valor do coeficiente de descarga (C_d), principalmente nas incidências mais oblíquas do vento, diferindo-se do intervalo usualmente indicado pela literatura especializada (0,60 - 0,65) para representar a perda de carga do escoamento em aberturas retangulares.

A vazão do ar (em m^3/s) em uma dada abertura pode ser obtida pela Equação 25, conforme explicitado no item “2 Revisão Bibliográfica”. No entanto, este mesmo dado pode ser determinado, a partir da multiplicação da área da abertura (A em m^2) pela velocidade do escoamento que a atravessa (U_{jan} em m/s) como indicado na Equação 26.

$$G = C_d \cdot A \cdot U_{ref} \cdot \sqrt{\Delta C_p} \quad \text{Equação 25}$$

$$G = A \cdot U_{jan} \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

G: vazão de ar (m^3/s)

C_d : coeficiente de descarga (adimensional)

A: área da abertura (m^2)

U_{ref} : velocidade média na altura de referência (m/s)

⁷¹ Faces destinadas às aberturas, ou seja, barlavento e sotavento.

U_{jan} : velocidade média na abertura⁷² (m/s)

$\sqrt{\Delta C_p}$: raiz do diferencial de pressão observado na abertura analisada (adimensional).

Logo, em uma situação em que a área de abertura e o diferencial de pressão são os mesmos, pode-se concluir que é verdadeira a igualdade entre a velocidade média relativa (U_{jan}/U_{ref}) e, a multiplicação da raiz quadrada do diferencial de pressão ($\sqrt{\Delta C_p}$) pelo coeficiente de descarga (C_d) (Equação 27):

$$U_{jan} = C_d \cdot U_{ref} \cdot \sqrt{\Delta C_p}$$

$$\frac{U_{jan}}{U_{ref}} = C_d \cdot \sqrt{\Delta C_p}$$

Equação 27

Tendo isso considerado, buscou-se, com o auxílio da Equação 27, o melhor ajuste da curva de velocidade relativa (U_{jan}/U_{ref}) às possibilidades de valores do parâmetro $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ consideradas. Quatro opções de áreas para a determinação do ΔC_p , duas para cada modelo genérico (selado e com aberturas) foram propostas, baseadas nas conclusões obtidas nos ensaios do IPT e do LNEC. Variações nos valores de C_d foram realizadas em concordância com a literatura científica para situações semelhantes. Assim, o melhor ajuste entre as curvas (U_{jan}/U_{ref} e $C_d \sqrt{\Delta C_p}$) indicou para cada cenário avaliado os valores de C_d e ΔC_p que melhor descreviam a relação de velocidades. Detalhamentos acerca deste processo são apresentados no subitem 5.2.4.

5.2.1 Impacto dos dispositivos de sombreamento na pressão (C_p) e na velocidade relativa (U_{jan}/U_{ref})

Esse item reúne as descrições acerca da influência dos dispositivos de sombreamento tanto na distribuição de pressão na envoltória externa (C_{ps}) quanto nas velocidades médias relativas (U_{jan}/U_{ref}). Este impacto é avaliado a partir da comparação da tipologia em questão com o modelo de referência correspondente, ou seja, os resultados são discutidos em relação à G1A, para as tipologias seladas e, à G1B, para com aberturas. Os dados de U_{jan}/U_{ref} , independente do subgrupo avaliado, restringem-se às avaliações em modelo genérico com aberturas.

As descrições e os gráficos de contorno do primeiro grupo tipológico (G1: Referências), caracterizado pelos modelos genérico selado, G1A e com aberturas, G1B, sem dispositivos de sombreamento, e portanto, referenciais adotados para a mensuração do impacto dos sombreamentos nas variáveis observadas, são apresentadas no Apêndice E. A reprodução dos ensaios destas referências serviu para garantir a concordância aos dados obtidos no IPT. Os padrões de distribuição de pressão nas faces (barlavento e sotavento) se mantiveram e as discrepâncias, quando identificadas, foram justificadas

⁷² Na presente Tese, este dado (adimensional) corresponde a relação entre as velocidades médias do ar aferidas no centroide da janela sotavento e na altura de referência (em m/s).

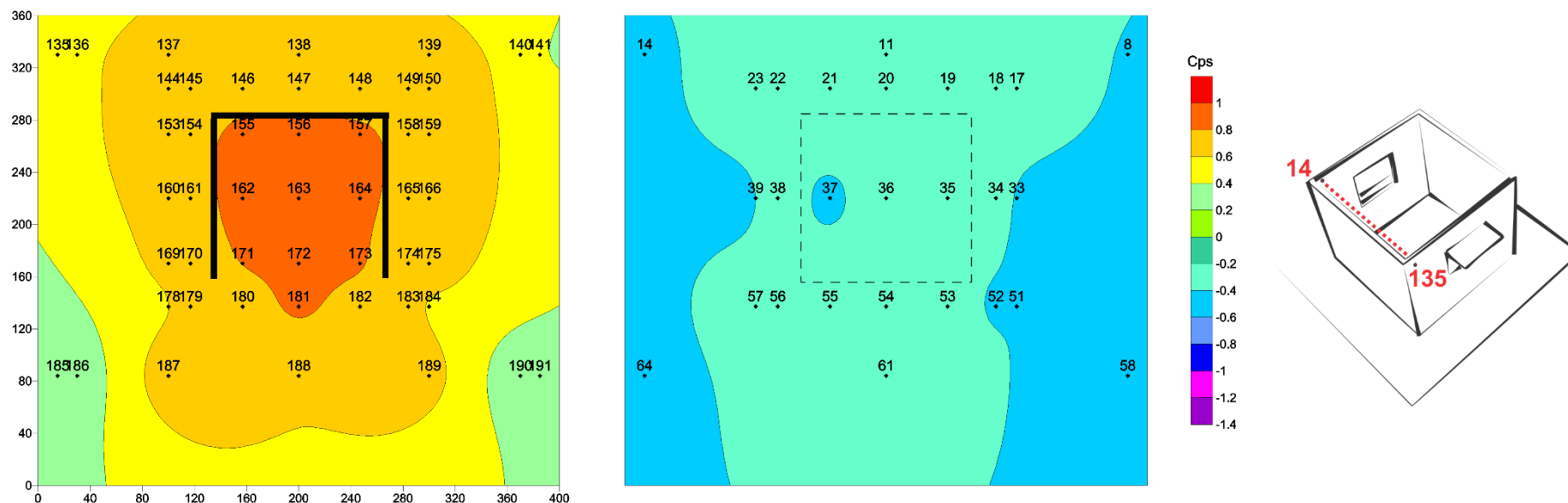
por variações: na altura de referência utilizada para o cálculo dos Cps; na quantidade de tomadas de pressão; em detalhes acerca da confecção do modelo físico e no perfil de camada limite adotado⁷³.

A partir do segundo grupo tipológico, G2: Características⁷⁴, investiga-se a influência que os dispositivos de sombreamento ocasiona nas mesmas variáveis (Cps e Ujan/Uref) para cada ângulo de incidência do vento. São consideradas variações na profundidade dos elementos de sombreamento (G2A; G2B e G2C), no seu posicionamento em relação à abertura (G2B e G2D) ou na sua forma, conforme as tipologias pertencentes ao G3: Geometrias, sendo este subdividido em: assimétricas (G3A e G3B), simétricas (G3C, G2D e G3E) e complexas (G3F e G3G).

5.2.1.1 Grupos característica e geometrias: Impacto na pressão (Cp)

A seguir são apresentados os impactos, por ângulo de incidência de vento, decorrentes das adições dos dispositivos de sombreamento pertencentes aos grupos G2:Características e G3:Geometrias. Figuras que exemplifiquem os comportamentos identificados são apresentadas ao longo da discussão e seguem o mapeamento das tomadas de pressão (para as faces barlavento e sotavento) e a escala de variação de Cps ilustrados na Figura 69.

Figura 69: Mapeamento das tomadas de pressão nas faces barlavento e sotavento e escala de variação dos Cps utilizadas nas análises dos resultados do LNEC.



Fonte: A Autora (2020).

⁷³ Nos ensaios do IPT, a altura de referência para o cálculo dos Cps foi de 0,40 m ao invés de 0,36 m (como no LNEC), uma vez que nos primeiros ensaios, o modelo foi disposto sobre um sistema de apoio, incrementando esse valor. Outro ponto de discrepância consiste na variação da quantidade de tomadas de pressão nas faces barlavento e sotavento. No LNEC, essa quantidade foi reduzida em ambas as faces, justificando as diferenças nos gráficos de contorno. Alterações no modo de confecção do modelo, principalmente quanto às arestas, alteraram os valores de tomadas posicionadas nas zonas de separação do escoamento entre os dois ensaios. Por fim, as discrepâncias quanto aos perfis de camada limite utilizados ($\alpha=0,29$ no IPT e $\alpha=0,18$ no LNEC) também influenciaram nos valores de pressões.

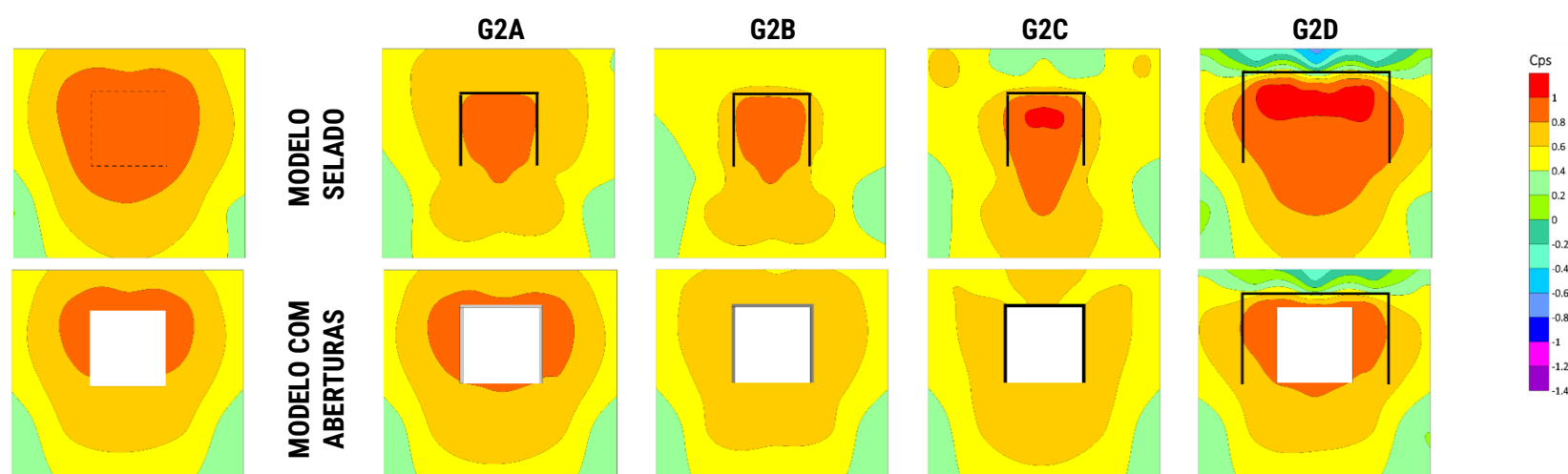
⁷⁴ O G2: Característica apresenta dois subgrupos: profundidade e afastamento. O primeiro compreende as tipologias G2A, G2B e G2C, com profundidades dos elementos de sombreamento equivalentes à 0,25 m; 0,50 m e 0,75 m, respectivamente. O segundo faz referência às tipologias G2B e G2D, cujos elementos (com profundidades equivalentes a 0,50 m) foram posicionados sem e com afastamentos, respectivamente, da abertura de entrada.

A completude dos gráficos de contorno correspondentes às distribuições de pressão nas faces a barlavento e a sotavento de todas as tipologias avaliadas em modelo genérico selado e com aberturas são apresentados no Apêndice F.

5.2.1.2 Ângulo de incidência de 0°

A inclusão de dispositivos de sombreamento de diferentes profundidades resulta na concentração da zona de estagnação (C_{ps} entre 0,8 a 1,0) na área destinada à abertura em todas as tipologias analisadas (G2A, G2B e G2C) em modelo genérico selado (Figura 70). Na G2C, devido a maior dimensão dos seus elementos, C_{ps} maiores que 1,0 são registrados na porção superior desta mesma área. Em comparação à G1B, a área de estagnação é mais abrangente na G2A e inexistente nas demais tipologias. Independente do referencial adotado (G1A ou G1B), o aumento progressivo da profundidade dos elementos também promove a perda de simetria dos contornos e a expansão das áreas com valores menos positivos (C_{ps} entre 0,2 a 0,6) em razão das zonas de separação impostas pelos próprios elementos ao facearem o escoamento, principalmente no entorno imediato do elemento horizontal na G2C (Figura 70).

Figura 70: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G2: Característica (G2A, G2B, G2C e G2D) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas.



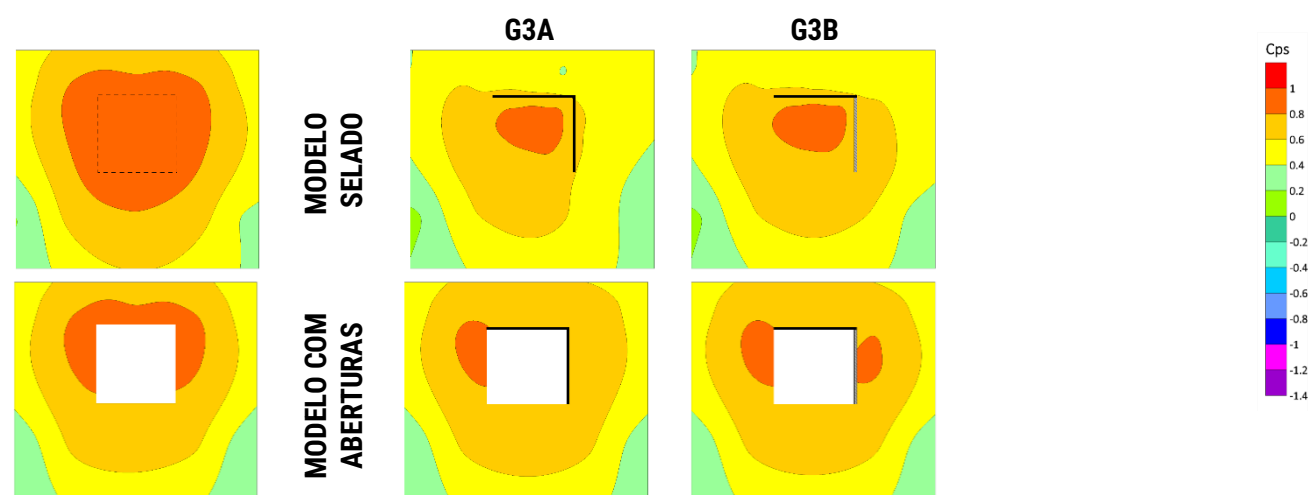
Fonte: A Autora (2020).

Para a G2B e a G2D, quando o referencial é o modelo genérico selado, ambas as tipologias apresentam concentração da zona de estagnação na região configurada entre os dispositivos (Figura 70). Na G2B há a redução das áreas de abrangência dos contornos correspondentes aos intervalos de 0,6 a 0,8 e 0,8 a 1,0 e, conseqüentemente, a expansão da área caracterizada por valores entre 0,4 a 0,6. Na G2D, há o “achatamento” dos contornos existentes, além do surgimento de uma área mais negativa na parte superior do elemento horizontal devido à zona de separação promovida pela interação do mesmo com o escoamento. Quando a G1B é a referência da análise, os padrões são semelhantes aos já descritos para a G1A, exceto pela extinção da área de estagnação na tipologia G2B (Figura 70).

Poucas são as discrepâncias observadas no padrão de distribuição de pressão nas faces a barlavento das tipologias G3A e G3B, independente do referencial adotado (Figura 71). Em relação à G1A, são notadas reduções das áreas de estagnação (C_{ps} de 0,8 a 1,0) e da correspondente ao contorno

de 0,6 a 0,8, sendo a primeira restrita à região destinada à abertura. Em consequência, valores de Cps entre 0,4 a 0,6 são mais recorrentes nas tipologias avaliadas do que na de referência. Em comparação à G1B, a configuração da área de estagnação é a discrepância mais relevante, sendo esta locada à em apenas um lado da abertura na G3A e em ambos os lados na G3B.

Figura 71: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G3: Geometria: Assimétricas (G3A e G3B) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas.

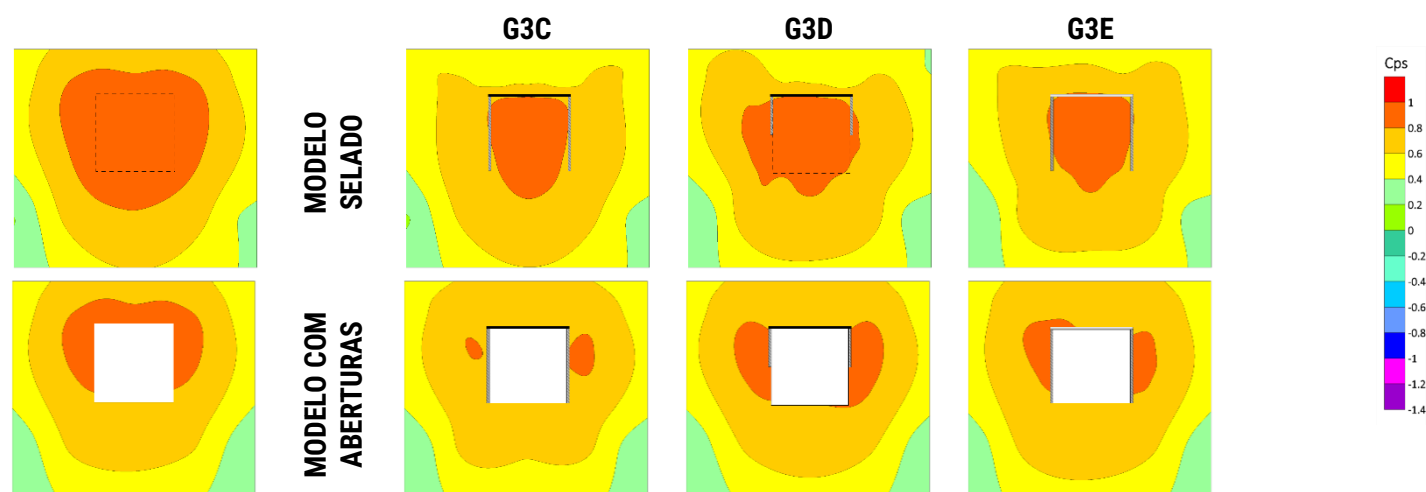


Fonte: A Autora (2020).

Em todas as tipologias do subgrupo G3: Geometria – Simétricas (G3C; G3D; G3F) os Cps variam no intervalo de 0,2 a 1,0 nas faces a barlavento. As áreas destinadas aos valores mais positivos (0,6 a 1,0) ocupam às regiões destinadas à abertura e ao seu entorno imediato, sendo as demais características das proximidades das quinas superiores e inferiores. Em relação às referências, ocorre a redução da área de estagnação, ficando esta mais restrita à área configurada entre os dispositivos (geometrias seladas) ou ao entorno imediato da abertura e dos dispositivos nas geometrias com aberturas (Figura 72).

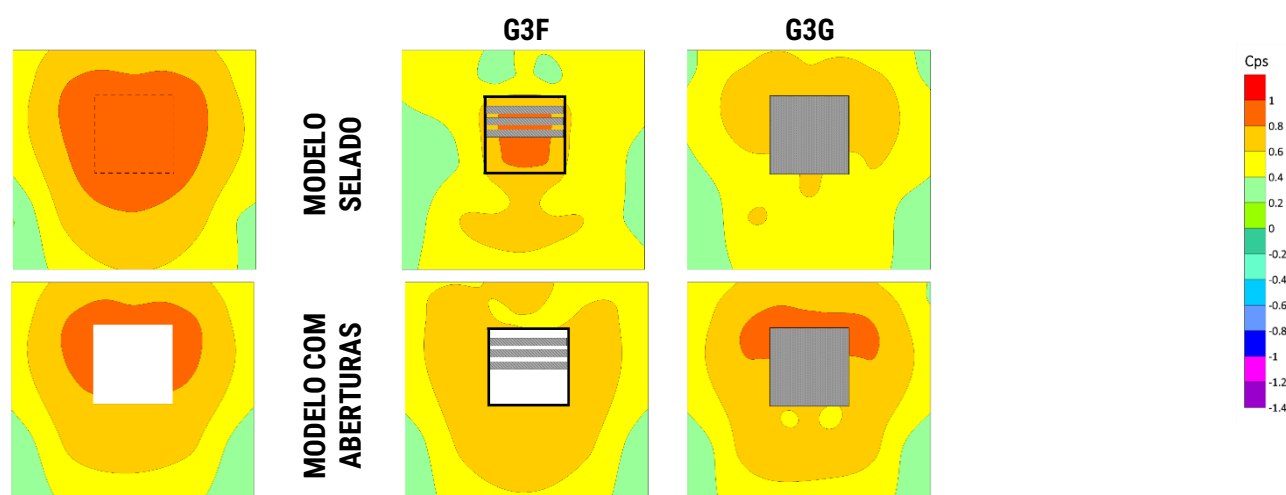
As tipologias Complexas (G3: Geometria), quando avaliadas em modelo selado, apresentam Cps variando nos intervalos de 0,2 a 1,0 na G3F e 0,2 a 0,8 na G3G. Em relação à G1A, menores discrepâncias são observadas na G3G, consistindo na eliminação da área de estagnação, redução da área de abrangência do contorno correspondente ao intervalo de 0,6 a 0,8 e, conseqüentemente, expansão da faixa anterior (Cps entre 0,4 a 0,6). Já, na G3F, valores menos positivos são encontrados em uma maior área nas proximidades com as quinas e na parte superior do dispositivo horizontal, além disso o contorno equivalente a 0,4 a 0,6 perde a simetria, e os superiores apresentam redução significativa em suas áreas. Quando o referencial é a G1B, poucas diferenças são observadas em ambas as tipologias. Na G3F, ocorre o desaparecimento da área de estagnação e, a perda de simetria no contorno correspondente aos valores de 0,6 a 0,8 e na G3G, apenas uma redução na área de estagnação é notada (Figura 73).

Figura 72: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G3: Geometria: Simétricas (G3C, G3D e G3E) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas.



Fonte: A Autora (2020).

Figura 73: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G3: Geometria: Complexas (G3F e G3G) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas.



Fonte: A Autora (2020).

5.2.1.3 Ângulos 15° e 30°

A angulação da geometria em relação ao escoamento incidente resulta, conseqüentemente, na inclinação, na perda de simetria e no deslocamento dos contornos já existentes, ocasionando uma maior variação de pressão ao longo da largura da face a barlavento, independente do referencial de análise adotado. Quanto maior o ângulo de incidência e/ou a profundidade dos elementos de sombreamento (G2A; G2B; G2C), maior é a concentração de Cps com valores mais positivos na região anterior ao protetor a montante e a de valores menos positivos ou negativos na região a jusante à localização da abertura e dos protetores. Em relação à G1A, nas tipologias G2B e G2C, por exemplo, valores de Cps entre 0 e -0,4 são identificados a jusante, principalmente na situação de 30°. Já a região configurada entre estes dispositivos fica sujeita à estagnação do escoamento para quanto maior for a profundidade dos dispositivos na situação de 15°. Em relação à G1B, menores áreas de estagnação são notadas nas tipologias avaliadas devido à inclusão

da abertura para o ângulo de 15°. Em contraponto, na situação de 30° ocorre o reaparecimento desta área de estagnação, inexistente na configuração de referência.

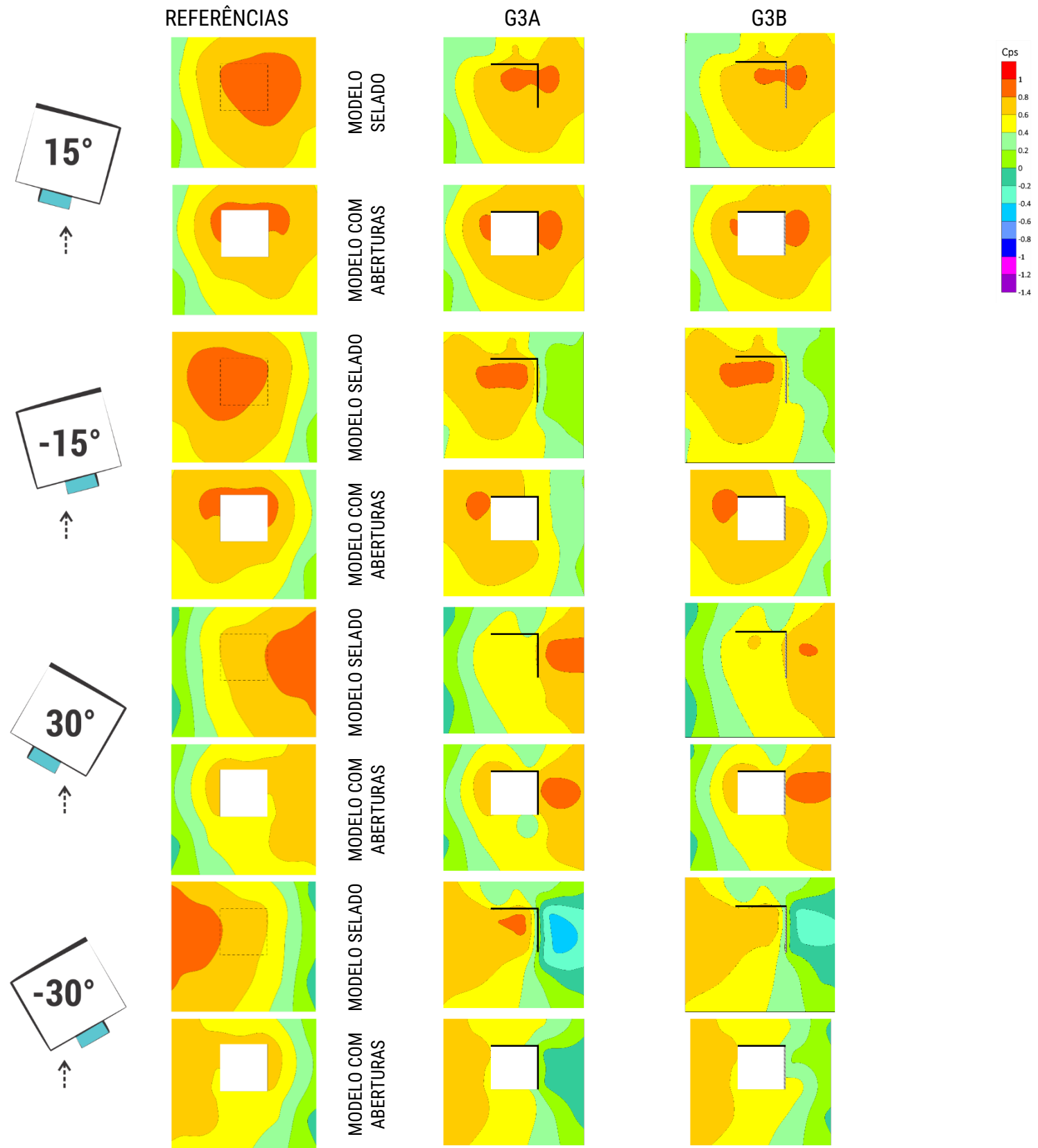
Para ambas as tipologias de referência (G1A e G1B), a inclusão de dispositivos nos limites da área destinada à abertura (G2B) ocasiona uma clara setorização dos valores de Cps. Estes valores são mais positivos (variando de 0,4 a 1,0) nas regiões intermediária e a montante da abertura e dos protetores (abrangendo aproximadamente 2/3 da largura total) enquanto valores entre 0,4 a -0,4 caracterizam a área restante, nas avaliações seladas e, entre 0,4 a -0,2, na geometria com aberturas. Na G2D, Cps entre 0,4 a 1,0 caracterizam quase a totalidade da face e valores negativos são registrados apenas nas proximidades com a aresta e a quina superior a jusante, ou seja, locais sob ação da zona de separação promovida pelos próprios elementos.

Dentre as tipologias Assimétricas (G3: Geometria) (Figura 74), a G3A, nas rotações horárias (15° e 30°), apresenta maiores áreas de estagnação na porção anterior ao protetor a montante em razão da obstrução causada pela sua própria geometria. Em relação à tipologia de referência G1A, aos 15°, as áreas correspondentes aos Cps entre 0,6 a 1,0 são reduzidas, enquanto que as entre 0,2 a 0,6, expandidas. Em relação à G1B, ocorre o deslocamento da área de estagnação para as laterais na G3A e G3B. Aos 30°, os Cps entre 0,8 a 1,0 são observados nas imediações do protetor a montante e valores menos positivos no entorno superior e inferior da abertura, regiões sob a ação das zonas de separação originadas pelos dispositivos. Nas angulações simétricas e opostas (-15° e -30°), quando o referencial é o G1A, ocorre a concentração de Cps mais positivos (0,6 a 1,0) na região a montante, com áreas de estagnação na região configurada entre os protetores, sendo esta maior na angulação de 15° e menor na de 30°. Cps menos positivos (0 a 0,4) ou negativos (0 a -0,6) caracterizam a área posterior à localização dos dispositivos de sombreamento. Em relação à tipologia G1B, há o deslocamento dos contornos mais positivos (0,6 a 1,0) abrangendo a parte a montante e intermediária da face em ambas as tipologias assimétricas a -15°. A -30° este padrão é intensificado, e Cps variando de 0,4 a -0,2 caracterizam a jusante da face, sendo o intervalo de 0 a -0,2 mais abrangente na tipologia G3A, em razão da geometria do seu protetor a montante imprimir uma maior resistência ao escoamento.

Nas tipologias Simétricas (G3: Geometria), Cps mais positivos (0,6 a 1,0) ocupam às regiões anteriores às destinadas às aberturas e dispositivos das faces a barlavento e, os menos positivos (-0,2 a 0,4), às posteriores. Quanto maior a angulação e a obstrução causada pela geometria do protetor a montante, maior é área de estagnação anterior a ele ou na zona configurada entre eles. Em relação à geometria de referência ocorre o deslocamento e perda de simetria dos contornos já existentes em razão da sua angulação em relação ao escoamento, e a expansão das áreas mais negativas em detrimento da diminuição e/ou concentração das mais positivas.

Nas avaliações das tipologias Complexas (G3: Geometria), em modelo selado ou com aberturas, o intervalo de variação de pressão é semelhante aos das respectivas referências. O que difere as tipologias avaliadas das referências consistem no deslocamento destes contornos, ao longo da largura das faces a barlavento das tipologias avaliadas, após a inclusão dos dispositivos de sombreamento. Valores entre 0,4 a 1,0 caracterizam as partes a montante e intermediárias das faces, enquanto que 0,4 a -0,4 descrevem às proximidades da aresta a jusante da tipologia G3F em ambas as incidências. Na G3G, o intervalo mais positivo varia de 0,4 a 0,8 enquanto o menos, de 0 a 0,4.

Figura 74: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G3: Geometria Assimétricas (G3A e G3B) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para os ângulos de incidência de 15°, -15°, 30° e -30°.



Fonte: A Autora (2020).

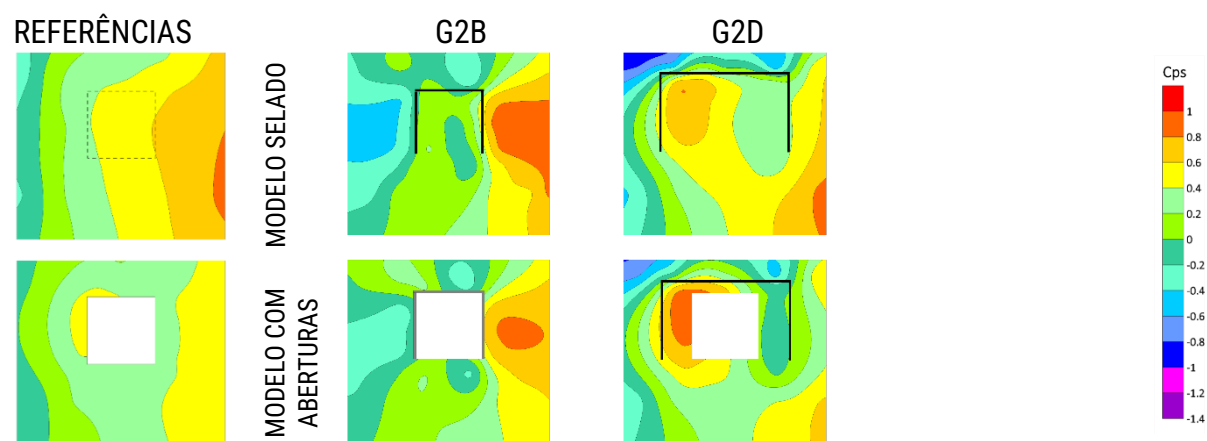
5.2.1.4 Ângulo 45°

Na incidência oblíqua (vento a 45°), independente da referência de análise adotada (G1A ou G1B) ou da tipologia de sombreamento avaliada, grande variação na distribuição de pressão ao longo da largura da face a barlavento é verificada.

Em síntese, nas tipologias pertencentes ao G2: Característica – Profundidade (G2A, G2B e G2C), Cps mais positivos são localizados na porção anterior ao dispositivo a montante (variando de 0 a 1,0); valores medianos nas regiões intermediárias (Cps entre 0,2 a -0,6 nas tipologias seladas e, 0,2 a -0,4, nas abertas); e negativos (entre 0 a -0,6 para seladas e, de 0 a -0,4, nas abertas) na parte posterior à área destinada à abertura e aos sombreamentos. Ademais, quanto maior a profundidade do sombreamento, menores são os valores de Cps na região configurada entre os mesmos e maiores são as zonas de separação, e conseqüentemente, de variação da configuração de pressão no entorno imediato dos elementos. Em relação à G1A, ocorre a expansão da área de estagnação a montante e o surgimento de valores de Cps entre -0,2 a -0,6 na região a jusante ou no entorno da área destinada à abertura e aos dispositivos nas tipologias G2B e G2C. Em comparação à G1B, a área de estagnação e Cps entre -0,2 a -0,4, caracterizam as discrepâncias das tipologias G2B e G2C em relação à referência.

Quanto às tipologias do subgrupo G2: Característica – Afastamento (G2B e G2D) (Figura 75), quando a referência é G1A, a G2B continua a reproduzir o padrão evidenciado nas incidências anteriores (15° e 30°), isto é, valores mais positivos (entre 0,4 a 1,0) na região anterior ao protetor a montante, intermediários (0 a 0,4) na área destinada à abertura e aos sombreamentos; e negativos (0 a -0,6) na zona posterior aos mesmos. Estes últimos intervalos, que variam entre -0,2 a -0,6, são inexistentes na tipologia de referência. Na G2D, valores mais positivos (0,4 a 0,8) são notados não só a montante da face, mas também na proximidade do protetor a jusante. Embora, o primeiro dispositivo promova uma zona de separação que atinge parte da área destinada à abertura, no entorno imediato do segundo dispositivo o escoamento já foi retomado e, portanto, pressões positivas são registradas nesta região. Em relação à G1B, os mesmos padrões verificados no referencial selado são constatados, exceto pela ocorrência particular nesta referência de uma área de Cps mais positivos (de 0,4 a 0,6) no entorno superior a jusante da abertura, por sua vez extinta na tipologia (G2B) e intensificada na G2D, apresentando valores entre 0,8 a 1,0.

Figura 75: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G2: Características: Afastamento (G2B e G2D) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para o ângulo de incidência de 45°



Fonte: A Autora (2020).

Para as tipologias Assimétricas (G3: Geometria), G3A e G3B, a variação da distribuição de pressão nas suas faces a barlavento é significativa para incidências de vento oblíquas (45° ou -45°), independente do referencial considerado (G1A ou G1B). Na situação de -45° os contornos correspondentes aos valores de Cps mais positivos ficam concentrados na parte anterior aos dispositivos e, valores negativos, caracterizam a região posterior dos mesmos. Na situação de 45° , o contrário é verdadeiro. Novamente, valores mais extremos são notados na tipologia G3A em razão da sua geometria resultar em uma maior resistência ao escoamento.

Nas tipologias Simétricas (G3: Geometria), G3C, G3D e G3E, nota-se um grande diferencial de pressão nas faces a barlavento e três regiões são identificadas: a primeira anterior à área destinada à abertura e aos protetores com Cps variando de 0,4 a 1,0; uma segunda, intermediária, com Cps entre -0,2 a 0,4 e outra, posterior, com valores de 0 a -0,4. De modo similar às angulações anteriores, em relação à G1A, há a realocação dos contornos existentes, com expansão das áreas de abrangência dos menos positivos e negativos e, a redução e a concentração, dos correspondentes aos valores mais elevados. Em relação à G1B, há o aparecimento de contornos correspondentes ao intervalo de 0,6 a 1,0 e valores negativos no entorno imediato (superior) da abertura decorrente da zona de separação causada pelos próprios protetores.

Por fim, para as tipologias G3F e G3G (G3: Geometrias – Complexas), Cps variando de 0,4 a 1,0 caracterizam a parte a montante da área da abertura e, o intervalo entre 0,4 a -0,4, as áreas restantes. Na tipologia G3G, Cps entre 0,4 a 0,8 são registrados a montante e valores entre -0,2 a 0,4 a jusante e na região intermediária da fachada do modelo. Novos posicionamentos dos contornos já existentes caracterizam as divergências em relação às tipologias G1A (para a G3F e a G3G) e G1B (para G3F), sendo que os contornos mais positivos ficam restritos à região a montante da face, enquanto que os menos positivos ou negativos, as áreas restantes. Para a G3G, além destes deslocamentos dos contornos existentes, quando a referência é o G1B, ocorre o desaparecimento de uma região caracterizada entre 0,4 a 0,6 no entorno superior a jusante da abertura a barlavento.

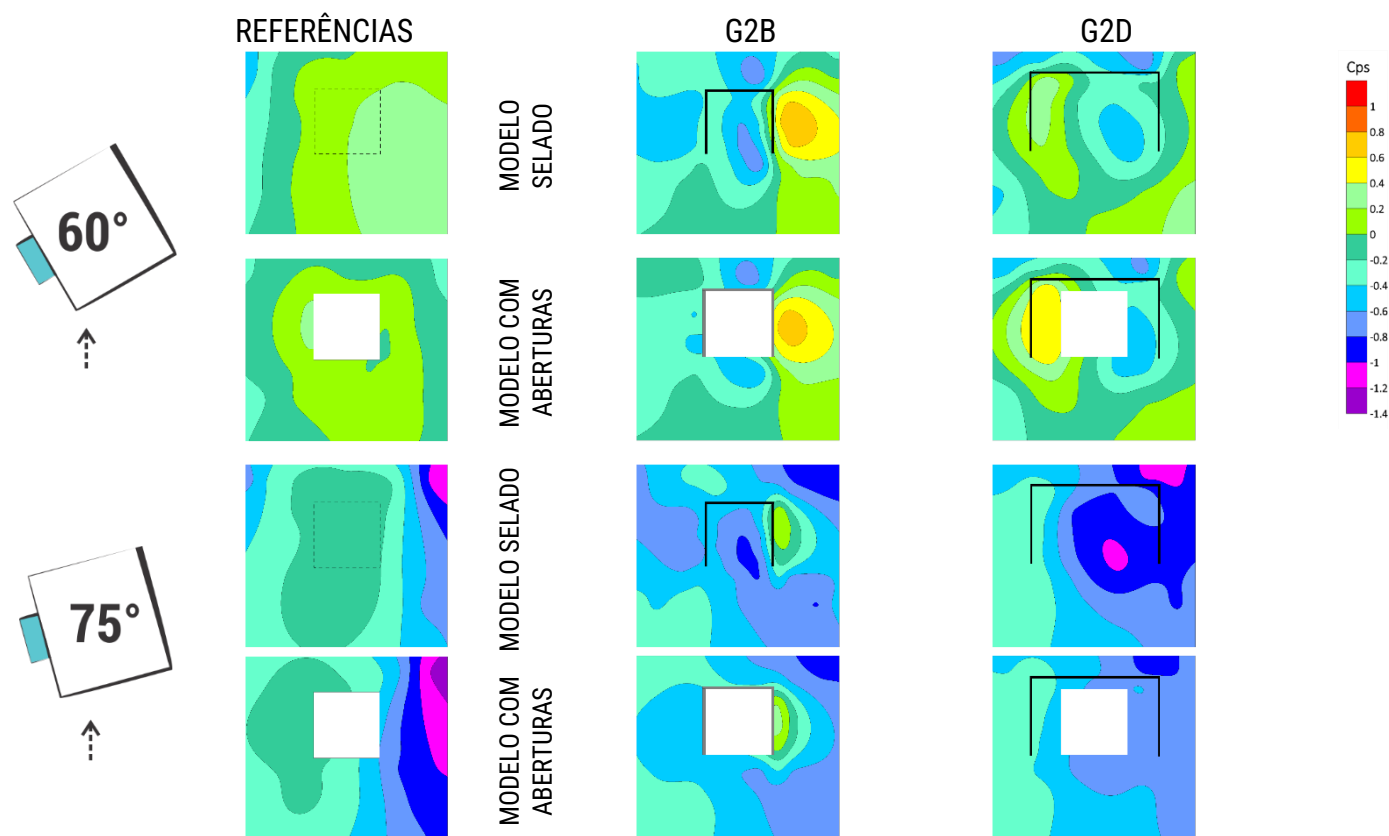
5.2.1.5 Ângulos 60° e 75°

Quase a totalidade das faces a barlavento (seja das tipologias avaliadas em modelo selado ou aberto) pertencentes ao G2: Característica – Profundidade (G2A, G2B e G2C) são caracterizadas por Cps pouco positivos e negativos em razão das zonas de separação originadas a partir das interações das quinas da geometria e/ou dos dispositivos com o escoamento. Em síntese, dois principais padrões de distribuição de pressão são notados com o incremento progressivo da profundidade dos dispositivos: (a) maior concentração de Cps positivos a montante dos dispositivos e abertura e; (b) valores negativos mais expressivos registrados na região configurada entre os dispositivos (avaliações em modelo selado) e nas áreas posteriores e nos entornos imediatos das aberturas (em modelo aberto). Em relação à G1A, para a situação de 60° , contornos correspondentes aos intervalos de Cps entre 0,4 a 0,8 (nas tipologias G2A e G2B) e de 0,4 a 1,0 (G2C) caracterizam o primeiro padrão. Já o segundo é verificado pelos intervalos de Cps de -0,4 a -0,6 (G2A), a -0,8 (G2B) e a -1,0 (G2C) nas demais áreas. No ângulo de 75° , as principais discrepâncias em relação ao referencial consistem nos Cps de 0,2 a -0,2 (G2B) e 0,6 a -0,2 (G2C) nas proximidades ao protetor a montante da abertura. Quando a comparação é com o G1B, na situação de 60° , os padrões são facilmente identificados com os intervalos de Cps variando entre -0,2 a 0,8 na parte a montante da abertura e dos dispositivos e até -0,8 nas demais. Aos 75° , maiores alterações são observadas nas tipologias G2B e G2C, tais como a ocorrência de Cps entre 0 a 0,6 no entorno do protetor a montante da abertura.

Nas tipologias do subgrupo G2: Características – Afastamento (G2B e G2D) (Figura 76), as principais discrepâncias em relação à referência selada (G1A), consistem: na G2B, na ocorrência de Cps mais positivos a montante dos dispositivos e, de mais negativos, a jusante. E, na G2D, na indicação de valores mais negativos a jusante do primeiro protetor e de valores positivos (60°) ou menos negativos (75°) nas proximidades do segundo dispositivo. Quando a referência é a G1B, os comportamentos evidenciados no modelo selado continuam sendo válidos.

Nas, tipologias Assimétricas (G3A e G3B), as situações de 60° e -60° , reproduzem os padrões observados nas incidências de 45° e -45° , para ambos as possibilidades de referência. Para os ângulos de 75° e -75° , grande parte da área da face a barlavento já se encontra na zona de separação do escoamento apresentando valores, majoritariamente, negativos. Cps menos negativos ou positivos são observados na região anterior ao protetor a montante da abertura (75°) e na região configurada entre os protetores (-75°), sendo os valores mais expressivos atribuídos a tipologia G3A em razão da geometria do seu dispositivo vertical.

Figura 76: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G2: Características: Afastamento (G2B e G2D) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para os ângulos de incidência de 60° , -60° , 75° e -75° .



Fonte: A Autora (2020).

Nas tipologias Simétricas (G3C, G3D e G3E), quanto maiores os ângulos de incidência do vento, maior é a influência que a face a barlavento sofre da zona de separação promovida pela interação da quina da geometria com o escoamento. Desta forma, na situação de 60° , Cps entre 0 a 0,8 são registrados na porção a montante dos dispositivos, enquanto que valores de 0 a -0,6 são computados nas demais regiões. Em relação à G1A ocorre o reposicionamento na face dos contornos já existentes e o reaparecimento de valores de Cps entre 0,4 a 0,8 na parte a montante dos dispositivos. Em relação à G1B, soma-se às alterações anteriormente citadas, o surgimento de valores entre -0,4 a -0,6. Na situação de 75° , ocorre a realocação dos

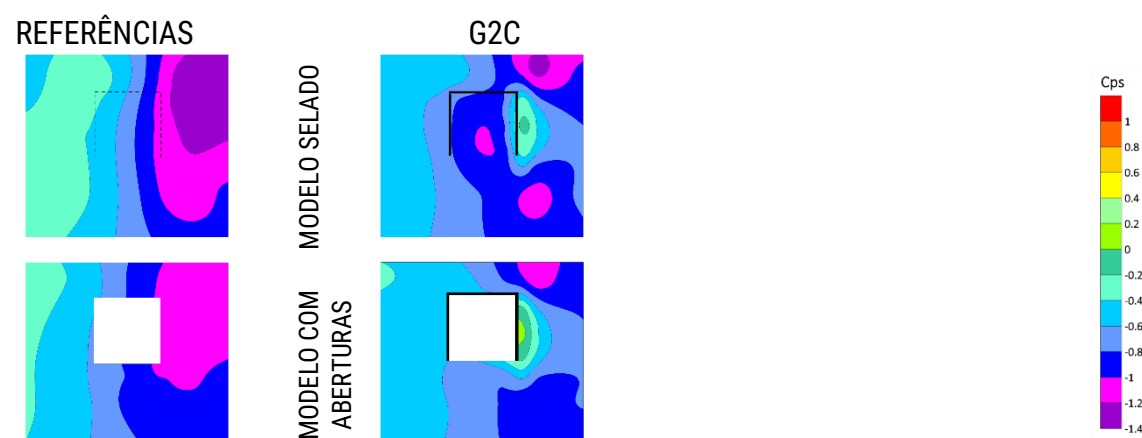
contornos já verificados nos modelos de referência, ou seja, Cps variando de 0 a -1,4, sendo as TP com Cps mais positivos registradas, independente da tipologia de sombreamento avaliada, na quina superior a montante do primeiro dispositivo.

Nas tipologias Complexas maiores semelhanças entre a configuração de pressão da face a barlavento verificada nos modelos de referência (G1A e G1B) são observadas para a tipologia G3G. As alterações consistem apenas na redução ou na expansão, principalmente no entorno imediato da área de abertura, das áreas de abrangência correspondentes aos contornos já existentes. Já na G3F, maiores diferenças são notadas, tais como, aos 60°, o aparecimento de valores mais positivos na região a montante e mais negativos na área posterior ou no entorno imediato da abertura e dos protetores. Na situação de 75°, a região mais negativa (Cps -1,0 a -1,2) tem sua abrangência reduzida na G3F e ampliada na G3G.

5.2.1.6 Ângulo 90°

Nas tipologias G2A, G2B e G2C, as faces a barlavento a 90° das tipologias avaliadas são caracterizadas por valores negativos (variando de 0 a -1,4), uma vez que se encontram nas zonas de separação do escoamento. De modo divergente aos modelos de referência (G1A e G1B), neste contexto, as faces a barlavento e a sotavento apresentam diferenciações no padrão de distribuição de pressão decorrentes da presença dos dispositivos de sombreamento. Valores de Cps menos negativos (de 0 a -0,4) são observados a montante dos protetores e abertura na G2C (Figura 77), independente do referencial adotado.

Figura 77: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces barlavento das tipologias pertencentes ao G2: Características: Profundidade (G2C) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para o ângulo de incidência de 90°



Fonte: A Autora (2020).

As faces a barlavento das tipologias G2B e G2D, em relação à G1A, são caracterizadas pelo desaparecimento dos contornos correspondentes aos valores entre -0,2 a -0,4, pela expansão dos intervalos entre -0,4 a -1,0 e pela concentração de valores entre -1,0 a -1,2 a montante dos protetores na G2B e de -1,0 a -1,4 nas regiões da abertura e quina superior esquerda na G2D. Na relação à G1B, os padrões de distribuição de pressão são semelhantes aos verificados nas tipologias seladas, exceto pela ocorrência de Cps entre -0,2 a -0,4 nas proximidades com a aresta a jusante na G2B e na G2D, por intervalos menos extremos de valores caracterizarem as regiões a montante ou a destinada à abertura e aos dispositivos.

As faces a barlavento das tipologias Assimétricas (G3A e G3B), totalmente na zona de separação do escoamento com valores de Cps negativos variando de -0,2 a -1,2 para ambas as tipologias (G3A e G3B) nas avaliações seladas e abertas. Quando comparadas às faces a barlavento às situações equivalentes nas tipologias de referência (G1A e G1B), poucas variações são observadas a 90°. Maiores discrepâncias em relação às referências são verificadas aos -90°.

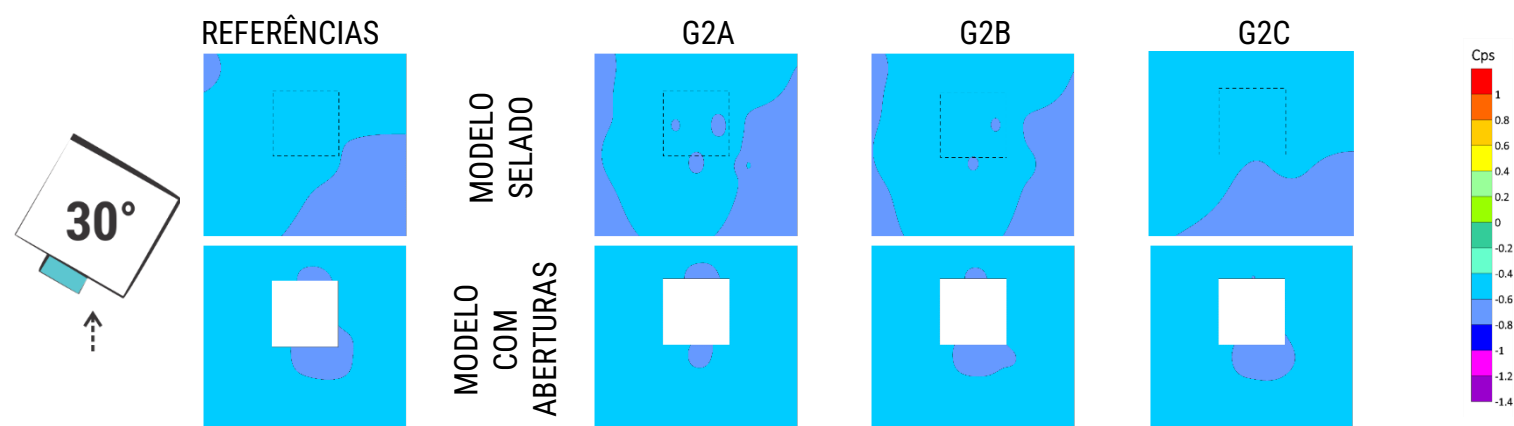
As faces a barlavento das tipologias Simétricas (G3C, G3D, G3E) são caracterizadas por Cps negativos variando de -0,2 a -1,4. Em relação à G1A, há uma leve redução nas áreas de abrangência dos contornos correspondentes aos intervalos de -1,0 a -1,4 e -0,2 a -0,4 e, expansão das outras relacionadas às demais faixas de valores. Em relação à G1B, há uma leve redução nas áreas de abrangência dos contornos correspondentes ao intervalo de -1,0 a -1,2 e expansão das outras relacionadas às demais faixas de valores.

Nas tipologias Complexas (G3F e G3G), a variação da distribuição de pressão é caracterizada entre -0,2 a -1,2. Em ambas as tipologias, independente do referencial adotado, as principais diferenças consistem nas reduções das áreas de abrangência correspondente aos valores entre -0,2 a -0,4, nas proximidades com a aresta a jusante, e entre -1,2 a -1,4, a montante.

5.2.1.7 Faces a sotavento

As faces a sotavento das tipologias G2A, G2B e G2C diferem pouco das suas situações correspondentes nos modelos de referência (G1A e G1B), indicando interferências mínimas ou inexistentes (nestas faces) da inserção dos elementos de sombreamento. Em relação à G1A, a tipologia G2C é uma exceção a essa regra. Nela, a face a sotavento além de estar sob a influência da esteira, sofre também a ação da zona de separação ocasionada por um dispositivo de maior profundidade, alterando assim o padrão. Em relação à G1B, as discrepâncias, quando ocorrem, restringem-se ao entorno imediato da abertura de saída ou são decorrentes das ações das zonas de separação geradas, principalmente, pelos dispositivos de sombreamento de maiores profundidades (G2C) (Figura 78).

Figura 78: Mapeamento da distribuição de pressão nas faces sotavento das tipologias pertencentes ao G2: Características: Profundidade (G2A, G2B e G2C) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para o ângulo de incidência de 30°



Fonte: A Autora (2020).

Poucas variações são registradas na distribuição de pressão das faces a sotavento entre as tipologias G2B e G2D e as de referência (G1A e G1B) quando avaliadas nas mesmas situações. Em modelos abertos, notam-se variações no entorno imediato da abertura de saída. Já alterações nas proximidades das arestas (para as diferentes incidências de vento) ou na distribuição de Cps (na situação de 90°) caracterizam as tipologias (G2B e G2D) seladas e abertas, independente do referencial adotado (G1A e G1B).

O comportamento de distribuição de pressão nas faces a sotavento das tipologias Assimétricas (G3A e G3B) é muito semelhante entre si. Em relação às referências (G1A e G1B), as discrepâncias, quando ocorrem, são da ordem de um intervalo (inferior ou superior), ou seja, uma variação de 0,2 (em valor absoluto). Comparativamente, maiores diferenças são observadas em relação à G1B decorrentes da ação das zonas de separação impostas pelas arestas da geometria ao escoamento ou da abertura ao jato de saída.

Nas tipologias Simétricas (G3C, G3D e G3E) e Complexas (G3F e G3G), o comportamento de distribuição de pressão nas suas faces sotavento são semelhantes às mesmas situações na tipologia de referência G1B. Quando o modelo genérico selado (G1A) é o referencial, algumas divergências são notadas, principalmente, nos ângulos de incidência do vento de 15°, 60°, 75° e 90°.

5.2.2 Impacto na Ujan/Uref

Na Figura 79 e na

Tabela 31 os valores do adimensional Ujan/Uref são apresentados para o modelo de referência (modelo genérico com aberturas e sem sombreamentos, o G1B) e para as tipologias com sombreamentos (G2A a G3G) para o intervalo de ângulos de incidência de vento de -90° a 90°. O Apêndice G compila os valores (em m/s) das velocidades médias do ar aferidas no centroide da janela sotavento (Ujan), na altura de referência (Uref), assim como a relação entre elas (Ujan/Uref) para os cenários avaliados.













O impacto da adoção de diferentes dispositivos de sombreamento na relação Ujan/Uref, como supracitado, é determinado a partir da análise comparativa deste dado obtido em uma tipologia com sombreamento e no modelo de referência (G1B).

Deste modo, percentuais⁷⁵ positivos ou negativos indicam, por sua vez, incrementos ou reduções no adimensional Ujan/Uref verificado nos modelos com sombreamentos em relação ao G1B (Tabela 32). Na sequência, apresentam-se as conclusões acerca do Ujan/Uref para a referência G1B. Posteriormente, discute-se os valores percentuais encontrados nas tipologias com sombreamento em relação à referência, agrupando-os por intervalos de ângulos de incidência de vento (0°, 15° e 30°; 45°; 60° e 75° e, por fim, 90°), de acordo com as semelhanças verificadas nos padrões de impacto. Para as tipologias assimétricas (G3A e G3B), as análises contemplam também as rotações anti-horárias (-15° a -90°).

⁷⁵ O impacto percentual na Ujan/Uref foi calculado da seguinte forma: $\left(\frac{U_{jan}/U_{ref} \text{ tipologia}}{U_{jan}/U_{ref} \text{ referência}} - 1\right) * 100$.

Tabela 31: Valores de Ujan/Uref para as diferentes tipologias avaliadas.












TIPOLOGIAS	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
G1B	0,00	0,15	0,39	0,56	0,62	0,61	0,56	0,61	0,62	0,56	0,39	0,15	0,00
G2A							0,68	0,71	0,63	0,47	0,26	0,14	0,06
G2B							0,70	0,76	0,66	0,46	0,16	0,00	0,01
G2C							0,78	0,85	0,76	0,55	0,20	0,07	0,13
G2D							0,72	0,74	0,75	0,71	0,38	0,03	0,09
G3A	0,01	0,11	0,34	0,45	0,58	0,71	0,68	0,74	0,63	0,34	0,12	0,02	0,08
G3B	0,01	0,15	0,28	0,38	0,55	0,71	0,67	0,73	0,63	0,36	0,15	0,08	0,09
G3C							0,71	0,76	0,71	0,49	0,27	0,12	0,09
G3D							0,62	0,70	0,69	0,51	0,32	0,11	0,05
G3E							0,65	0,71	0,65	0,45	0,21	0,06	0,06
G3F							0,49	0,58	0,59	0,38	0,19	0,05	0,13
G3G							0,45	0,58	0,54	0,37	0,30	0,14	0,11

TIPOLOGIAS												
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G

Fonte: A Autora (2020).

Tabela 32: Impacto percentual [%] na Ujan/Uref das tipologias de dispositivos de sombreamento em relação à G1B⁷⁶.

TIPOLOGIAS	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
G2A						21%	16%	2%	-17%	-32%	-4%
G2B						25%	24%	6%	-18%	-58%	-101%
G2C						38%	40%	23%	-2%	-49%	-54%
G2D						28%	21%	21%	26%	-3%	-80%
G3A	-23%	-14%	-20%	-6%	17%	20%	21%	2%	-40%	-68%	-83%
G3B	0%	-29%	-33%	-11%	16%	19%	19%	1%	-35%	-61%	-46%
G3C						25%	25%	13%	-13%	-31%	-17%
G3D						10%	15%	11%	-10%	-18%	-28%
G3E						16%	17%	4%	-20%	-46%	-60%
G3F						-12%	-5%	-5%	-32%	-52%	-69%
G3G						-20%	-6%	-13%	-33%	-22%	-1%

TIPOLOGIAS											
	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G

Fonte: A Autora (2020).

⁷⁶ Os valores percentuais correspondentes aos ângulos de incidência de -90° e 90° foram omitidos. Divisões com denominadores pequenos resultam em valores elevados, logo para evitar conclusões errôneas, tais valores foram suprimidos da Tabela 24.

5.2.2.1 Grupo de referência: impacto na velocidade (U_{jan}/U_{ref})

Para a situação inicial (vento incidindo perpendicular à face a barlavento, 0°), tem-se a relação de U_{jan}/U_{ref} igual a 0,56, ou seja, a velocidade média do ar aferida na abertura a sotavento representa 56% da registrada na cobertura do modelo. Para as direções de vento iguais a 15° (0,61) e 30° (0,62), pequenos incrementos nesta relação são caracterizados. A 45° , o valor deste adimensional se equipara à situação inicial. A partir de 60° , nota-se um significativo decréscimo na U_{jan}/U_{ref} , sendo igual a 0,39 a 60° ; 0,15 a 75° e nula a 90° . Em rotações mais oblíquas, a interação do escoamento com a aresta do modelo gera bolhas de separação maiores ou menores, dependendo do ângulo de incidência do vento e, conseqüentemente, a abertura é posicionada em maior ou menor grau em regiões de sombras de vento, o que resulta em um impacto negativo no potencial de ventilação no ambiente. Já a 90° , o escoamento é tangente às faces com aberturas (barlavento e sotavento) e logo, configura distribuições de pressão semelhantes nestas superfícies.

5.2.2.2 Ângulos de incidência 0° , 15° e 30°

A presença de protetores com diferentes profundidades (G2A; G2B e G2C) incrementa progressivamente a U_{jan}/U_{ref} para os ângulos 0° (21% a 38%), 15° (16 a 40%) e 30° (2% a 23%). A inclusão destes dispositivos de sombreamento intensifica a ocorrência do *Efeito Venturi* na abertura a barlavento, ou seja, prolonga a região de estrangulamento do escoamento e com isso ocorre a elevação da velocidade do jato de entrada e, conseqüentemente, do de saída.

Quando os elementos de sombreamento estão dispostos sem (G2B) ou com (G2D) afastamento da abertura, os aumentos são maiores para a G2D nos ângulos de 0° (28%) e 30° (21%) e para G2B aos 15° (24%). Nesta incidência (15°), possivelmente, o escoamento separado no elemento de proteção a montante recole, ainda na região da abertura, e auxiliado pela existência do elemento a jusante potencialize o seu redirecionamento para o interior do modelo.

Para configurações de protetores assimétricos (G3A e G3B), a relação U_{jan}/U_{ref} sofre acréscimos de 20%, na G3A e ,19% G3B, na situação de vento incidindo a 0° . Para os ângulos de 15° e 30° , as taxas de incremento são praticamente as mesmas para o primeiro ângulo de incidência e para o segundo, apresentam valores iguais a 2% (G3A) e 1% (G3B). Enquanto que para -15° e -30° são iguais, respectivamente, a 17% e -6% para a tipologia G3A e 16% e -11% para G3B.

Para tipologias simétricas (G3C, G3D e G3E), o impacto da inclusão dos dispositivos de sombreamento é positivo para os ângulos de incidência de 0° , 15° e 30° , independente da tipologia avaliada. Os maiores incrementos são apresentados pela G3C, sendo de 25%, 25% e 13%, respectivamente. Percentuais de, respectivamente, 16%, 17% e 4% são registrados na G3E. Já, a G3D, reporta valores de 10%, 15% e 11%, para as mesmas situações.

As tipologias G3F e G3G, pertencentes ao subgrupo G3: Complexas, em razão de suas geometrias mais obstrutivas, apresentam maior resistência ao escoamento incidente. A U_{jan}/U_{ref} nos ângulos de incidência de vento iguais a 0° , 15° e 30° apresenta, respectivamente, decréscimos de -12%; -5% e -5%, para a G3F e para a G3G, as porcentagens são de -20%; -6% e -13%, nas mesmas situações.

5.2.2.3 Ângulo de 45°

Aos 45°, nota-se pela primeira vez para todas as tipologias com variações na profundidade dos elementos de sombreamento, ou seja, G2A, G2B e G2C, um decréscimo na U_{jan}/U_{ref} , sendo maior na G2B (-18%), seguido da G2A (-17%) e menos expressivo na G2C (-2%). Os protetores de menores profundidades quando expostos a esta situação de incidência oblíqua do escoamento geram zonas de separação que influenciam em parte da área da abertura, reduzindo desta forma significativamente a sua área efetiva de ventilação e a velocidade do fluxo de ar interno nestas situações.

Para variações em relação ao posicionamento dos elementos, a G2B apresenta um decréscimo de 18%, enquanto que a G2D continua a apresentar um incremento de 26%. Na primeira situação, o dispositivo a montante do vão exposto ao escoamento incidindo de forma oblíqua resulta em uma zona de separação que ocupa grande parte da área da abertura de entrada, diminuindo, conseqüentemente, a sua área efetiva de ventilação e impactando o fluxo de ar interno. Em contraponto, com o afastamento dos dispositivos dos limites da abertura, as zonas de separação continuam a existir, mas influenciam menos na sua área efetiva e, portanto, apresentam um impacto ainda positivo. Variações na forma dos protetores, resultam em reduções de -40% na G3A e -35% na G3B. E na situação oposta (-45°), os valores de -20% e -33% são encontrados para as mesmas tipologias. Para geometrias simétricas, as discrepâncias são da ordem de -13% (G3C); -10% (G3D) e -20% (G3E) e nas complexas (G3F e G3G) de -33% em ambas as tipologias.

5.2.2.4 Ângulos de 60° e 75°

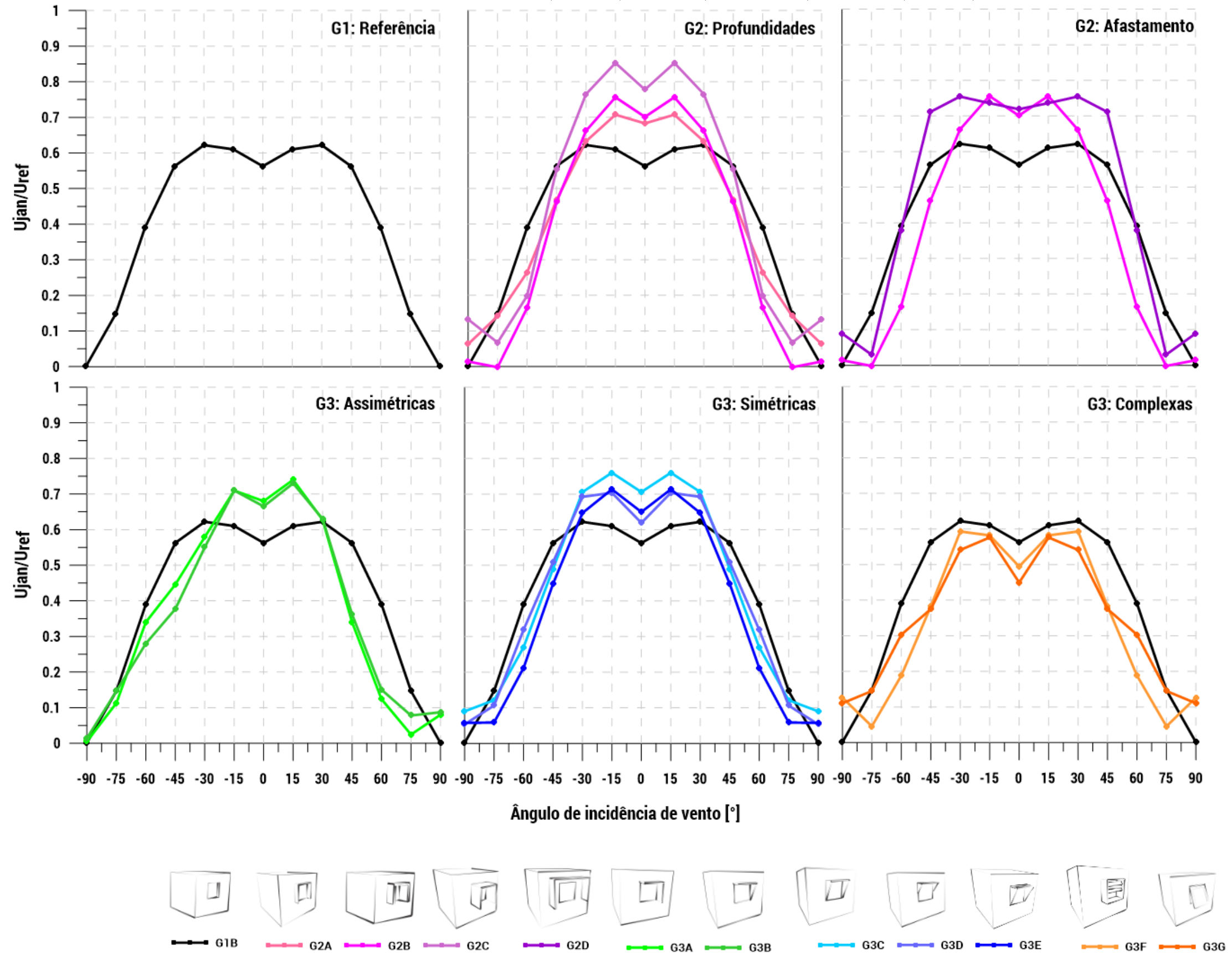
Ângulos de incidência de vento maiores (60° e 75°) caracterizam decréscimos na relação U_{jan}/U_{ref} , independente da tipologia de sombreamento avaliada. No grupo G2: Característica – Profundidade, o maior decréscimo continua sendo na G2B (-58%) e o menor impacto é na G2A (-32%). Aos 75°, a relação U_{jan}/U_{ref} é de -54% para a G2C, nula para a tipologia G2B e praticamente igual ao caso de referência (G1B) quando os dispositivos apresentam dimensões equivalentes a 0,25 m (-4%). Para o G2: Característica – Afastamento, os decréscimos são sempre mais significativos para a tipologia G2B pela mesma razão verificada na incidência oblíqua (45°).

No subgrupo tipológico das Assimétricas, as ações dos dispositivos funcionando como captadores ou bloqueadores são mais visíveis. Deste modo, a G3A apresenta um decréscimo de -68% a 60° e -14% a -60° e a G3B, -61% e -29%, respectivamente. Já a 75°, as taxas são de -83% (G3A) e -46% (G3B) e a -75°, de -23% e 0%, respectivamente. Nas Simétricas, decréscimos são reportados em todas as tipologias observadas, sendo maior a 60° na G3E (-46%) e a 75° nas tipologias G3D (-28%) e G3E (-60%). Por fim, nas Complexas, a tipologia G3F apresenta maiores reduções na relação de velocidades, sendo de -52% e -69%, aos 60° e 75°, respectivamente; enquanto na G3G, estes valores são de -22% e -1%.

5.2.2.5 Ângulo de 90°

Nesta situação de escoamento, as aberturas estão situadas em zonas de separação e sob condições de pressão muito semelhantes. A presença dos dispositivos na abertura a barlavento altera minimamente a pressão nesta face e, conseqüentemente, o diferencial de pressão entre as faces, o que resultada em um fluxo de ar, por vezes, inverso e de baixa velocidade. Embora os dispositivos de sombreamento auxiliem a ocorrência de uma circulação interna, esta ainda é caracterizada por valores reduzidos.

Figura 79: Variação da relação U_{jan}/U_{ref} (em m/s) de acordo com o ângulo de incidência de vento [°] para as tipologias do G2: Características – Profundidade (G2A, G2B E G2C) e Afastamento (G2B E G2D) e para o G3: Geometrias: Assimétricas (G3A e G3B), Simétricas (G3C, G3D e G3E) e Complexas (G3F e G3G).



Fonte: A Autora (2020).













5.2.3. Impacto dos dispositivos de sombreamento no diferencial de pressão (ΔC_p) e na velocidade (U_{jan}/U_{ref})

Após a análise do comportamento das variáveis C_p e U_{jan}/U_{ref} de modo isolado, calculou-se o diferencial de pressão médio ($\Delta C_{p\text{médio}} = C_{p\text{médio}} \text{ barlavento} - C_{p\text{médio}} \text{ sotavento}$) para todas as tipologias avaliadas em modelo genérico selado (Tabela 33) e com aberturas (Tabela 34).

As discrepâncias entre os diferenciais de pressão das avaliações em modelo selado e aberto reforçaram a constatação já identificada na análise dos resultados do IPT acerca da influência que a área exerce na designação do $\Delta C_{p\text{médio}}$ efetivo, principalmente nas situações avaliadas com dispositivos de sombreamento.

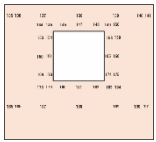












As ações dos dispositivos de sombreamento fazem com que as TP localizadas nas regiões das aberturas ou do seu entorno imediato assumam valores muito positivos ou negativos, dependendo do ângulo de incidência do vento. Nas avaliações em modelo genérico com aberturas, as TP nas aberturas são inexistentes e, portanto, não compõem a média do $\Delta C_{p\text{médio}}$. Desta forma, a exclusão destas TP (nove a barlavento e três a sotavento) faz com que, comparativamente, os $\Delta C_{p\text{médio}}$ resultantes de avaliações para as mesmas situações em modelos com aberturas e selados apresentem divergências conforme apresentadas nas Tabela 33 e Tabela 34.

Tabela 33: Valores do diferencial de pressão médio ($\Delta C_{p\text{médio}} = C_{p\text{médio}} \text{ barlavento} - C_{p\text{médio}} \text{ sotavento}$) calculado para as tipologias avaliadas em modelo genérico selado.

	ΔC_p FF													
	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
G1A	-0,01	0,56	0,89	1,07	1,19	1,20	1,13	1,20	1,19	1,07	0,89	0,56	-0,01	
G2A							1,03	1,07	1,04	0,82	0,59	0,26	0,06	
G2B							0,96	1,02	0,94	0,73	0,50	0,25	0,05	
G2C							0,95	1,02	0,97	0,75	0,41	0,22	0,18	
G2D							1,09	1,08	1,11	0,94	0,53	0,05	0,02	
G3A	0,01	0,23	0,52	0,67	0,82	0,90	0,88	1,01	0,95	0,74	0,43	0,21	0,06	
G3B	-0,01	0,25	0,55	0,75	0,88	0,95	0,91	0,99	0,96	0,83	0,58	0,29	0,04	
G3C							1,01	1,09	1,06	0,89	0,61	0,32	0,05	
G3D							1,08	1,12	1,08	0,91	0,69	0,32	0,04	
G3E							1,06	1,10	1,07	0,88	0,61	0,28	0,06	
G3F							0,83	0,92	0,88	0,71	0,45	0,20	0,08	
G3G							0,90	0,99	0,97	0,85	0,64	0,28	0,01	
TIPOLOGIAS														
	G1A	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G		

Fonte: A Autora (2020).

Tabela 34: Valores do diferencial de pressão médio ($\Delta C_{p\text{méd}} = C_{p\text{méd}} \text{ barlavento} - C_{p\text{méd}} \text{ sotavento}$) calculado para as tipologias avaliadas em modelo genérico com aberturas.

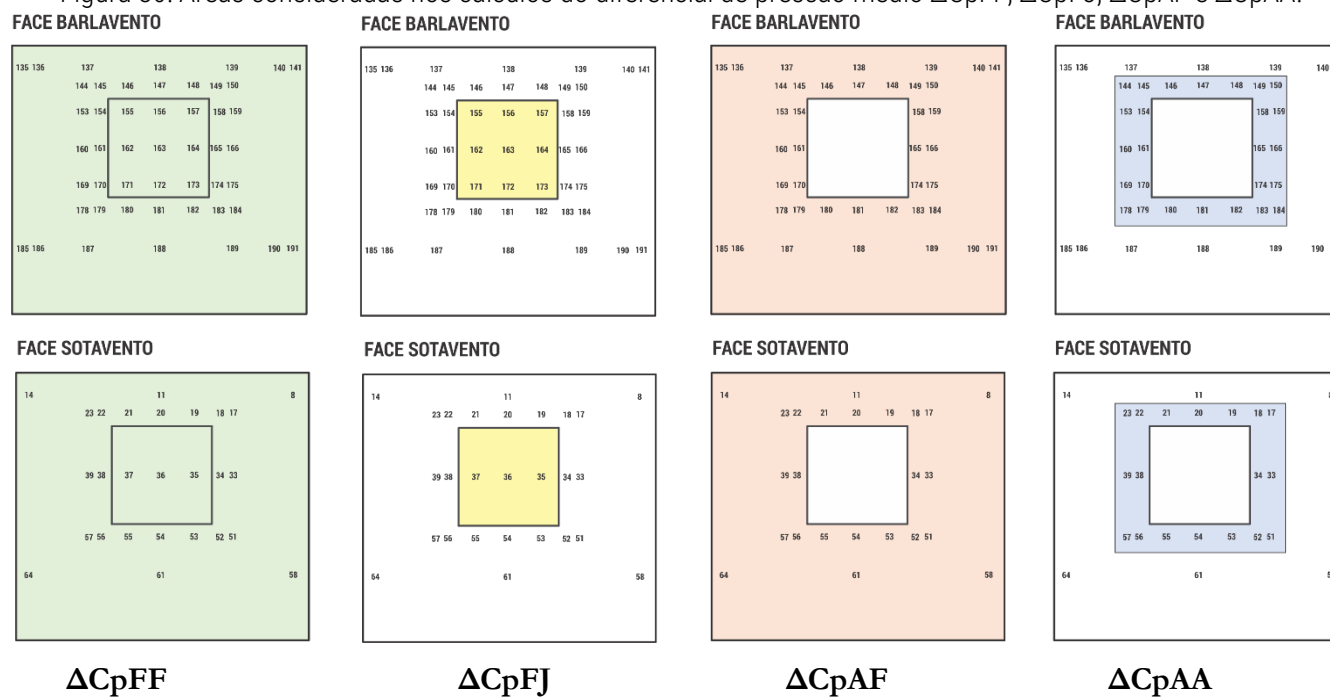
	$\Delta C_p \text{ AF}$												
	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
G1B	0,01	0,24	0,66	0,92	1,09	1,13	1,02	1,13	1,09	0,92	0,66	0,24	0,01
G2A							1,04	1,11	1,03	0,84	0,61	0,16	-0,05
G2B							0,94	1,04	0,97	0,74	0,49	0,22	0,02
G2C							0,91	1,01	0,95	0,70	0,45	0,29	0,15
G2D							0,97	0,99	0,98	0,86	0,53	0,11	0,02
G3A	-0,06	0,00	0,36	0,71	0,95	1,04	0,96	1,11	1,06	0,89	0,61	0,25	-0,05
G3B	-0,07	0,09	0,46	0,74	1,01	1,09	0,97	1,09	1,06	0,91	0,69	0,28	-0,06
G3C							0,97	1,07	1,05	0,86	0,59	0,23	-0,03
G3D							0,99	1,10	1,09	0,91	0,64	0,24	-0,04
G3E							1,00	1,10	1,04	0,87	0,59	0,21	-0,03
G3F							0,92	1,04	0,94	0,74	0,55	0,24	0,01
G3G							0,98	1,09	1,03	0,88	0,60	0,23	-0,05
TIPOLOGIAS													
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G	

Fonte: A Autora (2020).

Tendo isso considerado, buscou-se definir diferentes áreas de abrangência para o cálculo do $\Delta C_{p\text{méd}}$ efetivo, a fim de identificar a que melhor capturasse a ação dos dispositivos de sombreamento na distribuição de pressão e assim configurasse em um dado de análise mais realista a ser aplicado em estimativas ou simulações de ambiente naturalmente ventilados com dispositivos de sombreamento.













Portanto, outras duas configurações de áreas foram delineadas, totalizando quatro possibilidades, sendo elas: $\Delta C_{p\text{FF}}$, $\Delta C_{p\text{FJ}}$, $\Delta C_{p\text{AF}}$ e $\Delta C_{p\text{AA}}$ (Figura 80). As duas primeiras fazem referência às avaliações realizadas em modelo genérico selado e, as duas últimas, com aberturas. O $\Delta C_{p\text{FF}}$ considera todas as TP que compõem as fachadas a barlavento e sotavento e, o $\Delta C_{p\text{FJ}}$, somente as localizadas nas aberturas. Já, o $\Delta C_{p\text{AF}}$ reúne todas as TP do modelo com aberturas e, a $\Delta C_{p\text{AA}}$, as TP situadas na área de influência, que abrange o entorno imediato da abertura e dos dispositivos. Como verificado nos ensaios do IPT, este entorno imediato foi o que caracterizou maiores variações nos valores dos diferenciais de pressão locais.

Após calculado os $\Delta C_{p\text{méd}}$ para duas novas configurações de áreas de abrangência consideradas ($\Delta C_{p\text{FJ}}$ e $\Delta C_{p\text{AA}}$) (Tabela 35 e Tabela 36, respectivamente), buscou-se verificar o diferencial de pressão médio que melhor satisfizesse a igualdade apresentada na Equação 27.

Figura 80: Áreas consideradas nos cálculos do diferencial de pressão médio ΔC_{pFF} , ΔC_{pFJ} , ΔC_{pAF} e ΔC_{pAA} .













Fonte: A Autora (2020).

Tabela 35: Valores do diferencial de pressão médio ΔC_{pFJ} calculado para as tipologias avaliadas em modelo genérico selado.

	ΔC_{pFJ}												
	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
G1A	0,01	0,72	0,98	1,17	1,30	1,31	1,26	1,31	1,30	1,17	0,98	0,72	0,01
G2A							1,29	1,35	1,31	0,89	0,48	0,42	0,16
G2B							1,31	1,37	1,23	0,79	0,33	0,13	0,08
G2C							1,27	1,35	1,25	0,79	0,12	-0,23	0,01
G2D							1,31	1,31	1,37	1,09	0,40	-0,16	-0,03
G3A	0,00	0,70	1,09	1,18	1,23	1,18	1,09	1,16	0,97	0,52	0,05	-0,04	0,12
G3B	-0,04	0,58	0,97	1,13	1,20	1,19	1,09	1,14	1,04	0,74	0,31	0,18	0,07
G3C							1,23	1,36	1,30	0,94	0,45	0,30	0,10
G3D							1,32	1,38	1,33	1,04	0,68	0,39	0,07
G3E							1,32	1,37	1,36	1,00	0,48	0,32	0,13
G3F							1,13	1,21	1,14	0,73	0,22	0,06	0,05
G3G							0,96	1,06	1,04	0,92	0,72	0,39	0,04
TIPOLOGIAS													
	G1A	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G	

Fonte: A Autora (2020).

Tabela 36: Valores do diferencial de pressão médio $\Delta C_p AA$ calculado para as tipologias avaliadas em modelo genérico com aberturas.

	$\Delta C_p AA$												
	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
G1B	0,00	0,29	0,71	0,96	1,16	1,22	1,13	1,22	1,16	0,96	0,71	0,29	0,00
G2A							1,15	1,19	1,07	0,86	0,64	0,17	-0,06
G2B							1,02	1,09	0,99	0,73	0,50	0,26	0,02
G2C							0,96	1,06	0,95	0,68	0,45	0,35	0,21
G2D							1,16	1,21	1,17	0,99	0,59	0,10	0,02
G3A	-0,07	-0,01	0,35	0,67	0,95	1,09	1,05	1,19	1,13	0,97	0,65	0,30	-0,05
G3B	-0,07	0,11	0,46	0,73	1,05	1,17	1,07	1,18	1,14	0,99	0,77	0,34	-0,07
G3C							1,06	1,14	1,10	0,88	0,61	0,26	-0,05
G3D							1,09	1,18	1,17	0,95	0,69	0,29	-0,05
G3E							1,09	1,18	1,10	0,90	0,63	0,25	-0,05
G3F							0,99	1,09	0,96	0,73	0,55	0,28	0,01
G3G							1,07	1,16	1,07	0,90	0,63	0,27	-0,07
TIPOLOGIAS													
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G	

Fonte: A Autora (2020).

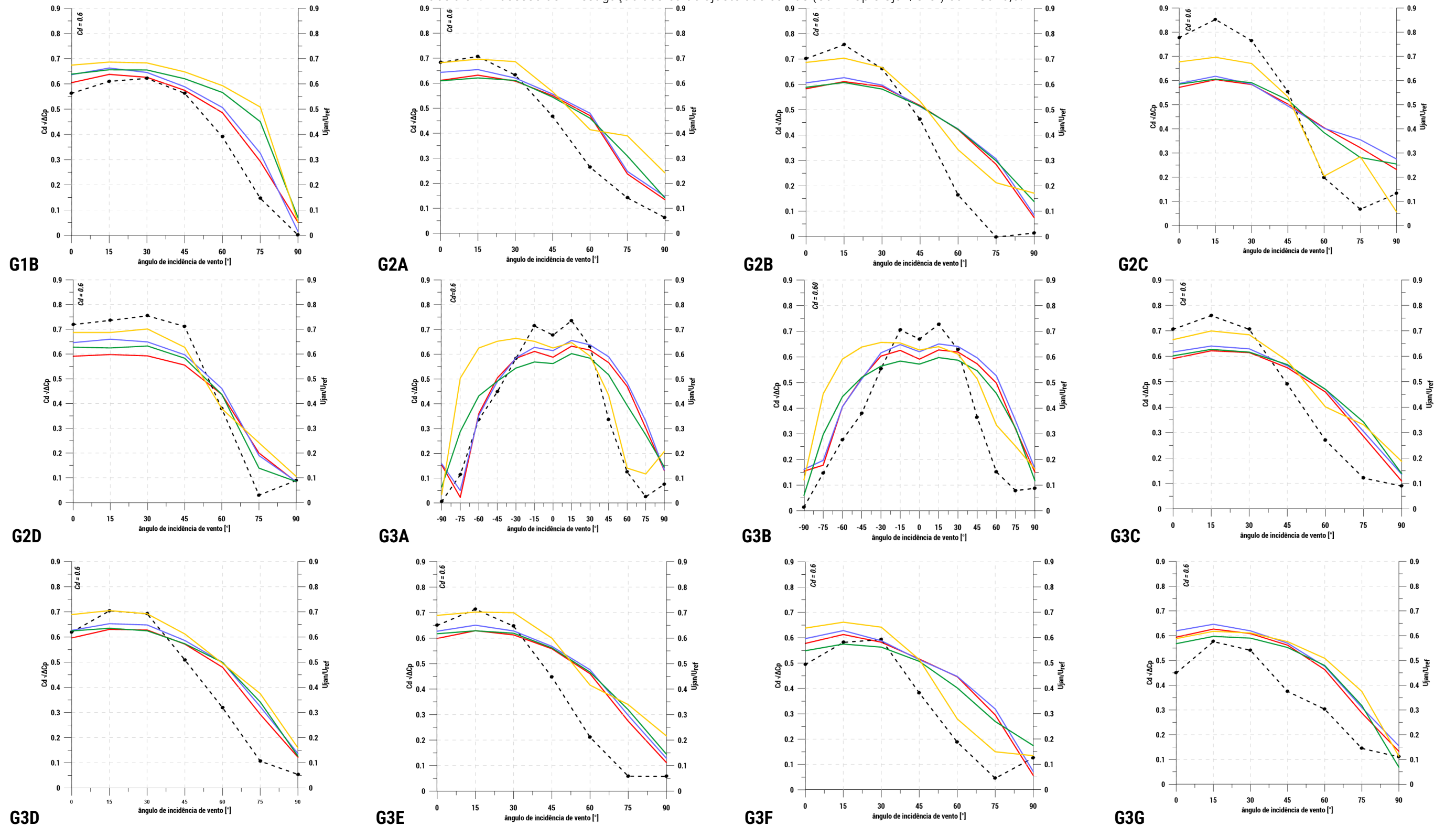
5.2.4 Investigações acerca dos valores para o ajuste das curvas de $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e U_{jan}/U_{ref}

Para as investigações, acerca dos valores indicados para o melhor ajuste das curvas de $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e U_{jan}/U_{ref} , conforme proposto na Equação 27, inicialmente, utilizou-se o valor de coeficiente de descarga (C_d), usualmente, indicado pela literatura para janelas retangulares, de 0,6.

5.2.4.1 $C_d = 0,6$

Os gráficos de linhas apresentados na Tabela 37 ilustram esse processo de investigação acerca da curva de $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ que proporcionasse o melhor ajuste à curva de U_{jan}/U_{ref} . Como supracitado, o C_d utilizado foi de 0,6.

Tabela 37: Processo de investigação acerca do ajuste das curvas ($C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e U_{jan}/U_{ref}) com $C_d=0,6$.



G1B **G2A** **G2B** **G2C** **G2D** **G3A** **G3B** **G3C** **G3D** **G3E** **G3F** **G3G**

LEGENDA

- U_{jan}/U_{ref} (dashed line with dots)
- ΔC_{pAF} (red line)
- ΔC_{pAA} (blue line)
- ΔC_{pFF} (green line)
- ΔC_{pFJ} (yellow line)

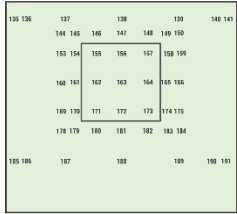
Fonte: A Autora (2020).

As conclusões desta análise são sintetizadas na Tabela 38 e discutidas na sequência. As opções de $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ para cada cenário e que melhor se ajusta à curva da velocidade relativa (U_{jan}/U_{ref}) é mapeado pela cor correspondente às opções analisadas: ΔC_{pFF} (verde), ΔC_{pFJ} (amarelo), ΔC_{pAF} (vermelho) e ΔC_{pAA} (azul).

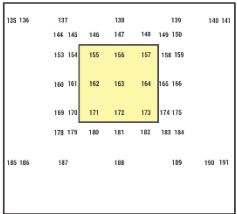
Tabela 38: Conclusões do processo de investigação acerca do ajuste de curvas ($C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e U_{jan}/U_{ref}) com $C_d=0,6$.

Cd padrão = 0,6												
	SEM DISPOSITIVO	PROFUNDIDADE			AFASTAMENT 0	ASSIMÉTRICAS		SIMÉTRICAS			COMPLEXAS	
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G
ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO	-90°											
	-75°											
	-60°											
	-45°											
	-30°											
	-15°											
	0°											
	15°											
	30°											
	45°											
	60°											
	75°											
90°												

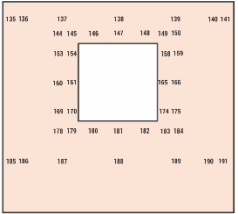
LEGENDA: POSSIBILIDADES DE CÁLCULO DO ΔC_p (C_p barlavento – C_p sotavento)



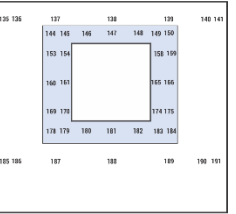
ΔC_{pFF}



ΔC_{pFJ}



ΔC_{pAF}



ΔC_{pAA}

Fonte: A Autora (2020).

Na tipologia G1B, dentre as possibilidades de cálculo do diferencial de pressão médio (ΔC_{pFF} , ΔC_{pFJ} , ΔC_{pAF} e ΔC_{pAA}), é o ΔC_{pAF} que melhor se ajusta à curva de velocidade relativa (U_{jan}/U_{ref}), por quase todo o intervalo de incidência de vento, com exceção da situação de 90°. Nesta última, o ΔC_{pAA} configura a melhor alternativa.

Nas tipologias do G2: Característica (G2A; G2B; G2C e G2D), majoritariamente é o ΔC_{pFJ} que promove o melhor ajuste entre as curvas do $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e da velocidade relativa para a maioria dos ângulos de incidência de vento. As tipologias deste segundo grupo, por englobar variações nas profundidades dos seus elementos de sombreamento ou no posicionamento dos mesmos em relação aos limites da abertura, têm as TP localizadas nas aberturas altamente influenciadas por estes aspectos, influências estas capturada pelo ΔC_{pFJ} .

As tipologias G3A e G3B caracterizam as Assimétricas (G3: Geometrias) e, por consequência, apresentam comportamentos totalmente distintos entre os intervalos de incidência de vento de 0° a 90° e de 0° a -90° . Para a G3A, nas situações de incidência de 0° a -90° , é o ΔC_{pAA} e o ΔC_{pFJ} que melhor descrevem o ajuste das curvas. No intervalo oposto, é o ΔC_{pFJ} a alternativa mais preponderante, sendo este último padrão semelhante ao reportado na tipologia G3B para as mesmas situações de exposição ao escoamento.

Para as tipologias Simétricas (G3: Geometrias), são o ΔC_{pFJ} e o ΔC_{pAF} que descrevem, com mais recorrência, a relação entre as curvas. O ΔC_{pFJ} caracteriza os ângulos 0° a 30° e 60° da G2C; as situações 15° e 30° da G3D e as incidências de 15° e 60° da G3E. O ΔC_{pAF} é denotado como a melhor alternativa nos ângulos 45° , 75° e 90° , na G3C; de 45° a 90° , na G3D e nas situações de 45° , 75° e 90° na G3E.

Por fim, as tipologias G3F e G3G, nomeadas como Complexas (G3: Geometrias), em razão da maior resistência ao escoamento imposta por suas geometrias, têm o ΔC_{pFF} como a opção que melhor descreve a relação entre $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e U_{jan}/U_{ref} e, sendo este indicado nas situações de 0° , 15° e 45° na G3F e de 0° a 45° na G3G. Nas demais incidências, as alternativas variam dentre as demais possibilidades de cálculo do $\Delta C_{p\text{médio}}$.

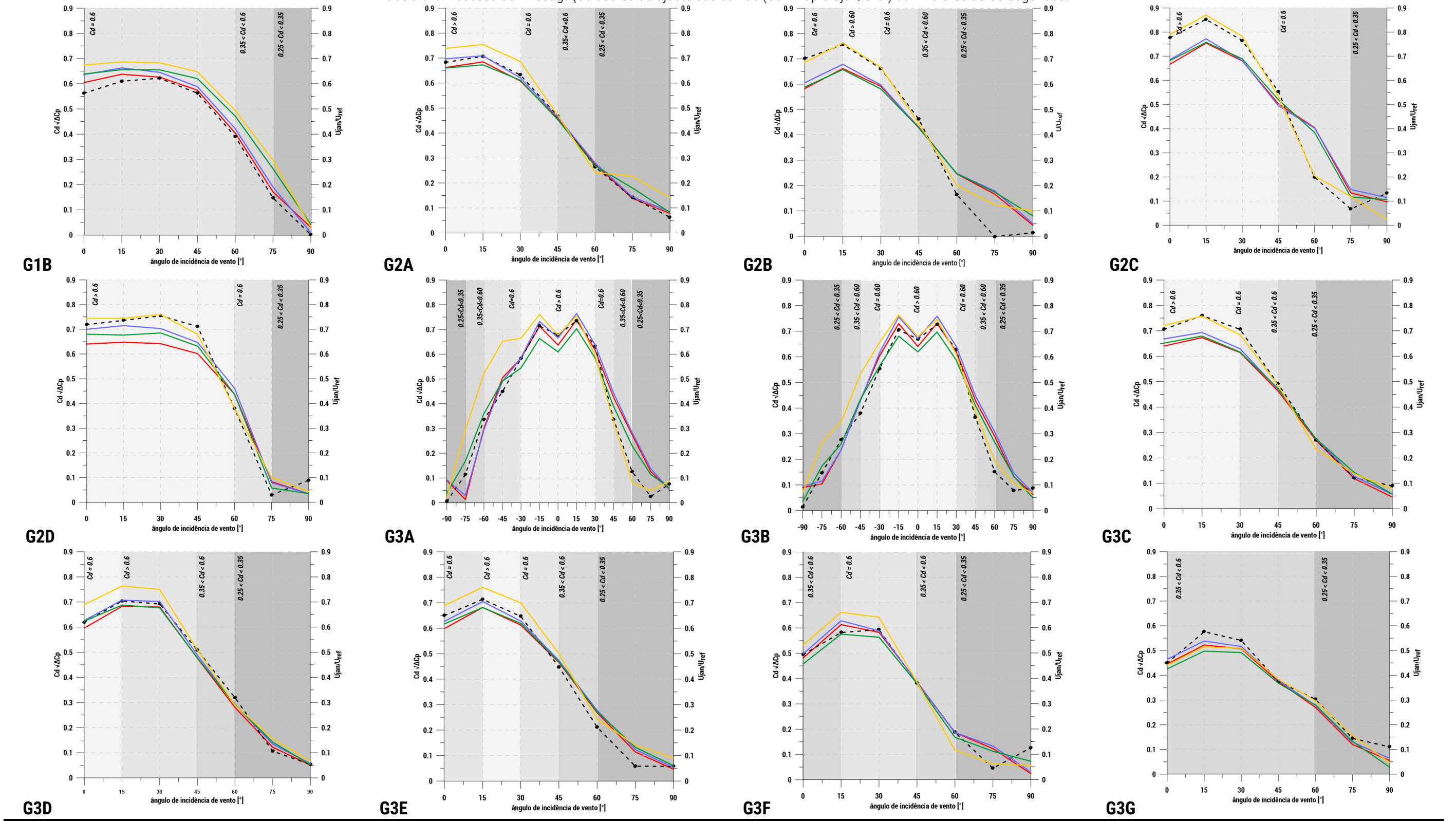
Em síntese, independente da tipologia avaliada e da forma de designação do diferencial de pressão, nota-se uma maior concordância entre as curvas de $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e U_{jan}/U_{ref} nas menores angulações de incidência de vento (0° a 30°). Em incidências maiores (de 45° em diante), os valores da curva $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ tendem a se distanciarem dos valores de velocidade relativa. Este padrão indica que a alteração isolada no diferencial de pressão, em tipologias com dispositivos de sombreamento, é insuficiente para alcançar a igualdade dos fatores ($C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e U_{jan}/U_{ref}). As interações dos protetores com o escoamento incidente, principalmente em situações oblíquas, resultam em zonas de separação que podem influenciar significativamente a área efetiva da abertura para ventilação. Estas alterações culminam em menores ou maiores perdas de carga na abertura, variando assim, conseqüentemente, o seu coeficiente de descarga. Desta forma, além de variações na determinação do diferencial de pressão, alterações no C_d também são necessárias e passam a serem investigadas.

5.2.4.2 C_d : valores sugeridos

Na seção Revisão Bibliográfica foi apresentada uma compilação de valores de coeficientes de descarga indicados pela literatura especializada para caracterizar aberturas (de variados formatos) expostas a diferentes condições de escoamento. Com base neste referencial teórico, sugestões de ajuste deste parâmetro (C_d) são indicadas para cada tipologia e para cada ângulo de incidência de vento, atendendo aos seguintes intervalos: **$C_d > 0,6$; $C_d = 0,6$; $0,35 < C_d < 0,6$ e $0,25 < C_d < 0,35$.**

Nas Tabela 39 são apresentadas as sugestões de faixas de valores aplicadas para cada situação. Já, a Tabela 40 apresenta uma síntese acerca do diferencial de pressão médio mais indicado, e também, do valor exato de C_d adotado em cada situação.

Tabela 39: Processo de investigação acerca do ajuste das curvas ($C_d/\Delta C_p$ e U_{jan}/U_{ref}) com valores de C_d sugeridos.



G1B **G2A** **G2B** **G2C** **G2D** **G3A** **G3B** **G3C** **G3D** **G3E** **G3F** **G3G**

LEGENDA

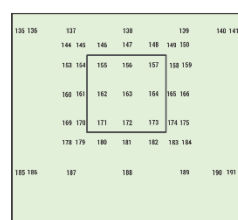
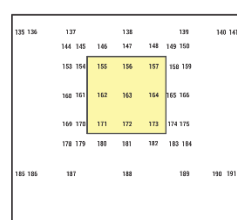
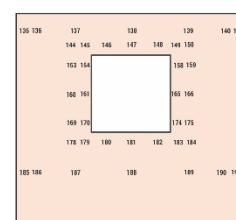
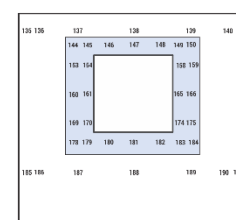
- U_{jan}/U_{ref} (dashed black line)
- ΔC_pAF (red line)
- ΔC_pAA (blue line)
- ΔC_pFF (green line)
- ΔC_pFJ (yellow line)

Fonte: A Autora (2020).

Tabela 40: Conclusões do processo de investigação acerca do ajuste de curvas ($C_d \sqrt{\Delta C_p}$ e U_{jan}/U_{ref}) com valores de C_d sugeridos.

Cd adaptado												
	SEM DISPOSITIVO	PROFUNDIDADE			AFASTAMENT 0	ASSIMÉTRICAS		SIMÉTRICAS			COMPLEXAS	
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G
-90°	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
-75°	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
-60°	0,50	0,35	0,35	0,60	0,60	0,50	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25	0,35
-45°	0,60	0,50	0,50	0,60	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,45	0,40
-30°	0,60	0,60	0,60	0,70	0,65	0,60	0,60	0,60	0,65	0,60	0,60	0,50
-15°	0,60	0,65	0,65	0,75	0,65	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,50
0°	0,60	0,65	0,60	0,70	0,65	0,65	0,65	0,65	0,60	0,60	0,50	0,45
15°	0,60	0,65	0,65	0,75	0,65	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,50
30°	0,60	0,60	0,60	0,70	0,65	0,60	0,60	0,60	0,65	0,60	0,60	0,50
45°	0,60	0,50	0,50	0,60	0,65	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,40
60°	0,50	0,35	0,35	0,60	0,60	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25	0,35
75°	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
90°	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

LEGENDA:

POSSIBILIDADES DE CÁLCULO DO ΔC_p (C_p barlavento – C_p sotavento) ΔC_{pFF}  ΔC_{pFJ}  ΔC_{pAF}  ΔC_{pAA}

Fonte: A Autora (2020).

Na tipologia G1B, o ΔC_{pAF} é o que melhor descreve o comportamento das pressões de 0° a 75° e o ΔC_{pAA} na situação de 90°. Quanto aos valores de C_d , este é igual a 0,6 (de 0° a 45°), $0,35 < C_d < 0,6$ (60°) e, entre 0,25 a 0,35, nas demais incidências.

A tipologia G2A, apresenta o ΔC_{pAA} como a opção mais indicada e valores de C_d maiores que 0,6 nas situações de 0° e 15°, igual a 0,6 (30°), $0,35 < C_d < 0,6$ na incidência oblíqua (45°) e, entre 0,25 a 0,35, nas demais incidências.

Nas demais tipologias do G2: Característica (G2B, G2C e G2D), é o ΔC_{pFJ} que melhor descreve em grande parte do intervalo de incidência do vento o comportamento da distribuição de pressão, exceto em algumas situações pontuais (90°, na G2B; 75° e 90°, na G2C e, 0° e 75°, na G2D). Maiores divergências entre as tipologias são observadas em relação ao C_d , devido à variação na profundidade dos elementos de sombreamento ou do seu posicionamento. Desta forma, na G2B, o C_d é igual a 0,6 nas situações de 0° e 30°, maior que 0,6 a 15°, pertencente ao intervalo de 0,35 a 0,6 na

incidência de 45° e, entre 0,25 a 0,35, nas demais incidências. Na G2C, com elementos de sombreamento de maiores profundidades, Cd maiores que 0,6 ocorrem até 30°, iguais a 0,6 nas situações de 45° e 60° e entre, 0,25 a 0,35, nos ângulos de 75° e 90°. Por fim, na G2D, Cd > 0,6 são indicados até a incidência de 45° e, igual a 0,6 e entre 0,25 a 0,35, a 60° e de 75° a 90°, respectivamente.

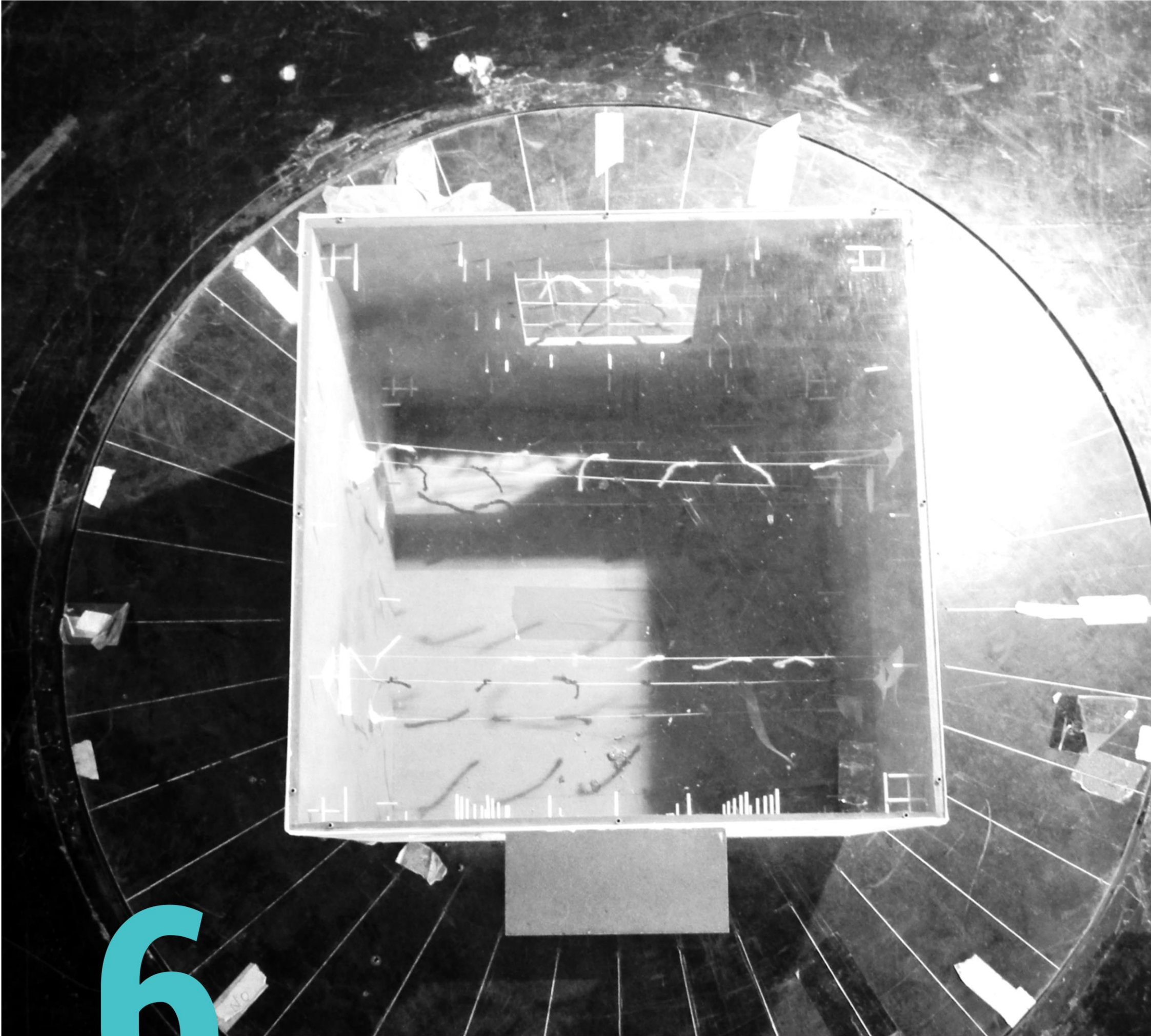
Nas tipologias G3A e G3B, devido à assimetria das geometrias, o espectro de possibilidades de diferenciais de pressão e Cd varia ao longo do intervalo de incidência de vento (-90° a 90°). Em relação à pressão, as quatro possibilidades caracterizam o intervalo, sendo distribuídas da seguinte forma: ΔC_{pFF} de -45° a -75°; ΔC_{pAF} nas situações de -30°, -15° e 30°; ΔC_{pAA} a 30° e o ΔC_{pFJ} , nos demais ângulos de incidência. Quanto ao Cd, têm-se: Cd > 0,6 (-15° a 15°), igual a 0,6 (de -30°, -45° e 30°), $0,35 < Cd < 0,6$ (-60° e -45°) e $0,25 < Cd < 0,35$ (demais incidências). Na G3B, o Cd entre 0,25 e 0,35 é característico de -60° a -90° e de 60° a 90°, entre 0,35 a 0,60 (-45° e 45°), iguais a 0,60 (-30° e 30°) e maiores que 0,60, nas demais situações. Quanto ao diferencial de pressão, ΔC_{pAA} e ΔC_{pFF} são mais recorrentes de 0° a -90° e o ΔC_{pFJ} e ΔC_{pAF} , no intervalo oposto.

Nas tipologias Simétricas, o ΔC_{pFJ} é mais representativo para a G3C. Na G3D e G3E, as quatro possibilidades de determinação do ΔC_{p} médio são computadas ao longo do intervalo de incidência de vento. Quanto aos valores sugeridos de coeficientes de descarga, têm-se: para a G3C, valores maiores que 0,6 a 0° e 15°, igual a 0,6 a 30°, entre 0,35 e 0,6 a 45° e entre 0,25 a 0,35, nas demais situações. Para a G3D, igual a 0,6 a 0°, maiores que 0,6 de 15° a 30°, entre 0,35 a 0,6 nas incidências de 45° e 60° e variando entre 0,25 a 0,35, nas de 75° e 90°. E, por fim, para a G3E, valores iguais a 0,6 a 0° e 30°, maiores que 0,6 a 15°, entre 0,35 a 0,60 a 45° e entre 0,25 a 0,35, nas incidências restantes.

Nas tipologias Complexas, o ΔC_{pAA} configura a alternativa mais recorrente e os valores de Cd são menores, comparativamente, aos demais subgrupos tipológicos, em razão das geometrias das tipologias pertencentes a este subgrupo serem mais obstrutivas ao escoamento. Desta forma, para a G3G, valores entre 0,35 a 0,6 são sugeridos de 0° a 45° e Cd entre 0,25 a 0,35 nas demais incidências. Na G3F, Cd igual a 0,6 são indicados nas incidências de 15° e 30° e menores que este valor nas outras situações.

5.3 SÍNTESE DO ITEM

Neste item a partir dos ensaios realizados nos túneis de vento, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e do Laboratório Nacional de Engenharia de Civil (LNEC), o impacto de dispositivos de sombreamento, com variações em suas características, foi verificado. Análises acerca dos parâmetros aerodinâmicos tais como: pressão na envoltória externa do modelo genérico, por meio dos coeficientes de pressão (C_p) devido ao vento ou na velocidade média relativa (U_{jan}/U_{ref}) embasaram as investigações. Fundamentado em um processo composto por diferentes etapas de análise, progressivas e sucessivas, delineou-se uma relação entre a multiplicação do coeficiente de descarga e da raiz do diferencial de pressão efetivo ($C_d \sqrt{\Delta C_p}$) e a velocidade média relativa para cada cenário avaliado. A partir do estudo desta relação de parâmetros, constatou-se que o uso do diferencial médio de pressão da fachada e de um valor padrão de coeficiente de descarga não, necessariamente, caracterizaram as melhores correlações. Logo, ao fim deste processo, foram indicadas as formas de obtenção e os valores mais adequados para a determinação do diferencial de pressão médio efetivo e do coeficiente de descarga para estimar o impacto das diferentes tipologias de sombreamento no desempenho da ventilação natural. No item seguinte, estas conclusões são aplicadas e o impacto quantitativo, dos dispositivos de sombreamento avaliados, são quantificados.



6

**DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO:
IMPACTO NA VENTILAÇÃO NATURAL**

A ciência não é contrária ao projeto, ela não compete com ou substitui o projeto, mas é parte e parcela dele. O projetista só pode exercer sua imaginação se a base física estiver compreendida. A compreensão científica deve permear o projeto inventivo e intuitivo. A ciência pode fornecer ferramentas de projeto valiosas, mas também pode prover ferramentas de controle para uso à medida que o projeto progride.

(SZOKOLAY, 2019, p. X)

A identificação dos valores mais adequados de coeficiente de descarga (C_d) e da raiz do diferencial médio de pressão efetivo ($\sqrt{\Delta C_p}$), para cada tipologia e cenário, guiou a determinação de fatores de correção, denominados de Φ .

O fator Φ ilustra o quão próximo ou divergente a situação analisada (com sombreamento) está de uma referência⁷⁷ (sem sombreamento) sendo a sua determinação oriunda da relação entre as respectivas vazões de ar⁷⁸ (em m^3/s) calculadas de acordo com a Equação 28.

$$\Phi = \frac{G_{\text{sombreamento}}}{G_{\text{referência}}} = \frac{(C_d \cdot A \cdot U_{\text{ref}} \cdot \sqrt{\Delta C_p})_{\text{sombreamento}}}{(C_d \cdot A \cdot U_{\text{ref}} \cdot \sqrt{\Delta C_p})_{\text{referência}}} \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

Φ : impacto quantitativo da inclusão do dispositivo de sombreamento analisado em relação à referência (adimensional).

G : vazão de ar no modelo (m^3/s)

C_d : coeficiente de descarga (adimensional)

A : área da abertura (m^2)

U_{ref} : velocidade média na altura de referência (m/s)

$\sqrt{\Delta C_p}$: raiz do diferencial de pressão (adimensional).

⁷⁷ Adota-se como referência o diferencial de pressão (ΔC_p) obtido a partir da média das pressões em um modelo selado ($\Delta C_p = C_p$ médio barlavento – C_p médio sotavento) e sem dispositivos de sombreamento, ou seja, a tipologia nomeada neste trabalho como G1A. Utiliza-se o valor de 0,6 para o coeficiente de descarga. A caracterização desta referência buscou reproduzir dados e informações que são, usualmente, utilizados ou disponibilizados para cálculos de ventilação natural.

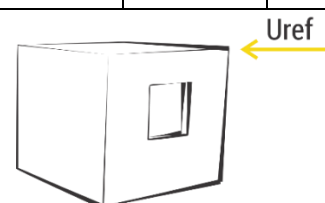
⁷⁸ A descrição da Equação 17 pode ser verificada no item “2. Revisão Bibliográfica”.

6.1 IMPACTO NO DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL (Φ)

Os valores referentes às velocidades médias na altura de referência⁷⁹, U_{ref} (em m/s), para as tipologias avaliadas, são apresentados na Tabela 41. Como já mencionado (ver item 4. Ensaio em túnel de vento) a determinação da U_{ref} ocorreu para cada ensaio a partir de valores das pressões atmosférica e dinâmica e de temperaturas externa e do escoamento. A U_{ref} para a tipologia de referência (G1A) foi de **7,41 m/s**.

Tabela 41: Valores das velocidades médias na altura de referência (U_{ref} em m/s) para as tipologias avaliadas.

U_{ref} (m/s)												
	SEM DISPOSITIVO	PROFUNDIDADE			AFASTAMENT 0	ASSIMÉTRICAS		SIMÉTRICAS			COMPLEXAS	
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G
	7,84	7,82	7,82	7,86	7,86	7,91	7,91	7,86	7,92	7,92	7,88	7,88



Fonte: A Autora (2021).

Os valores dos diferenciais de pressão (ΔC_p) e dos coeficientes de descarga (C_d) utilizados para as tipologias com sombreamento e a de referência estão sintetizados no Apêndice H.

Após a aplicação da Equação 28, obteve-se o fator Φ para cada tipologia e cenário avaliado conforme apresentado na Tabela 42. Como o fator Φ indica o impacto da adoção de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento na vazão de ar de um modelo genérico em relação a uma mesma referência (G1A), seus valores podem ser comparados. Desta forma, se uma tipologia apresenta seu fator Φ igual a um (1,0) significa que a sua vazão é semelhante à encontrada na referência. Valores maiores ($\Phi > 1,0$) e menores ($\Phi < 1,0$) que um, indicam vazões superiores e inferiores, respectivamente, à referência adotada. Assim, na Tabela 42, utiliza-se de cores (verde e vermelho, respectivamente) para mapear situações caracterizadas por impacto positivo ($\Phi \geq 1,0$) e negativo ($\Phi < 1,0$) em relação à referência.

⁷⁹ Topo de cobertura do modelo, $h=0,36$ m.

Tabela 42: Valores absolutos de Φ cada cenário analisado.

Φ													
	SEM DISPOSITIVO	PROFUNDIDADE			AFASTAMENT 0	ASSIMÉTRICAS		SIMÉTRICAS			COMPLEXAS		
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G	
ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO	-90°	0,13	1,18	0,65	1,72	0,66	0,30	0,52	1,17	0,79	0,93	1,09	0,97
	-75°	0,40	0,34	0,29	0,28	0,14	0,40	0,41	0,28	0,29	0,28	0,15	0,37
	-60°	0,76	0,50	0,37	0,38	0,71	0,67	0,49	0,50	0,55	0,47	0,35	0,56
	-45°	0,98	0,79	0,76	0,91	1,16	0,84	0,73	0,83	0,88	0,82	0,66	0,64
	-30°	1,01	1,00	1,07	1,27	1,23	0,94	0,91	1,11	1,14	1,04	0,95	0,84
	-15°	1,03	1,14	1,23	1,41	1,20	1,15	1,10	1,23	1,15	1,17	0,93	0,87
	0°	1,00	1,15	1,13	1,31	1,16	1,13	1,12	1,20	1,04	1,07	0,83	0,74
	15°	1,03	1,14	1,23	1,41	1,20	1,19	1,18	1,23	1,15	1,17	0,93	0,87
	30°	1,01	1,00	1,07	1,27	1,23	1,03	1,00	1,11	1,14	1,04	0,95	0,84
	45°	0,98	0,79	0,76	0,91	1,16	0,56	0,66	0,83	0,88	0,82	0,66	0,64
	60°	0,76	0,50	0,37	0,38	0,71	0,15	0,36	0,50	0,55	0,47	0,35	0,56
	75°	0,40	0,34	0,29	0,28	0,14	0,11	0,25	0,28	0,29	0,28	0,15	0,37
	90°	0,13	1,18	0,65	1,72	0,66	1,30	1,02	1,17	0,79	0,93	1,09	0,97
	LEGENDA		IMPACTO NEGATIVO: $\Phi < 1,0$ (vazões menores a da referência)										
		IMPACTO POSITIVO: $\Phi \geq 1,0$ (vazões semelhantes ou superiores a da referência)											

Fonte: A Autora (2021).

A fim de deixar mais didática a apreensão das conclusões obtidas com fator Φ , calculado para as diversas situações consideradas, optou-se por conduzir as análises a partir de valores percentuais. Assim, percentuais positivos ou negativos indicam, respectivamente, impacto positivo (incremento na vazão) ou negativo (redução na vazão) da adoção dos dispositivos de sombreamento analisados em relação à G1A (modelo genérico selado).

Para o entendimento das análises apresentadas na sequência, algumas ressalvas são importantes:

- Neste contexto, as análises que até então (seções anteriores) eram desenvolvidas por ângulos de incidência de vento, passam a ser baseadas nos subgrupos tipológicos –variação das profundidades dos elementos, afastamento em relação à abertura e variações geométricas caracterizadas como assimétricas, simétricas e complexas – para guiar um melhor entendimento acerca do impacto na ventilação natural da adoção de uma tipologia em detrimento de outra. Dentro destes subgrupos, as investigações ocorrem por ângulo de incidência de vento.
- Percentual positivo indica incremento na vazão de ar no modelo com sombreamento quando comparado à referência, sendo que para o percentual negativo, o contrário é verdadeiro. No entanto, é válido ressaltar que um ambiente dotado de um bom desempenho de ventilação natural é resultante de uma somatória satisfatória de vários aspectos, tais como: taxa de vazão de ar, comportamento e distribuição do fluxo de

ar no ambiente, forma e velocidade com que o mesmo atinge a zona do usuário e, por fim, se estes valores são coerentes com às necessidades destes usuários e/ou às atividades que desempenham neste local. Desta forma, expressões com atribuições de valor, como por exemplo, melhores e piores desempenhos em relação à ventilação natural são evitadas e substituídas por impactos positivo (ou incremento da variável observada) e negativo (ou redução da variável observada).

- **Situações que o escoamento é tangente às aberturas, isto é, com incidências próximas a 90°, podem decorrer na relação de vazões de ar com valores absolutos muito pequenos (para -90° e 90° as vazões variam, por exemplo, na ordem de 0 a 0,02 m³/s) e, conseqüentemente, reduções ou incrementos percentuais elevados.**
- Em todos os gráficos, os valores atribuídos ao G1B (modelo genérico com aberturas) são expostos para fins de comparação, no entanto a referência para a determinação dos fatores Φ , como já detalhado, consiste na tipologia G1A (modelo genérico selado).
- A fim de manter uma padronização dos gráficos, apresentam-se os valores percentuais para o intervalo de incidência de vento de -90° a 90°. Contudo, este intervalo é analisado apenas para as tipologias assimétricas. Nas geometrias simétricas, restringem-se as análises aos cenários de 0° a 90° (rotação do modelo no sentido horário).

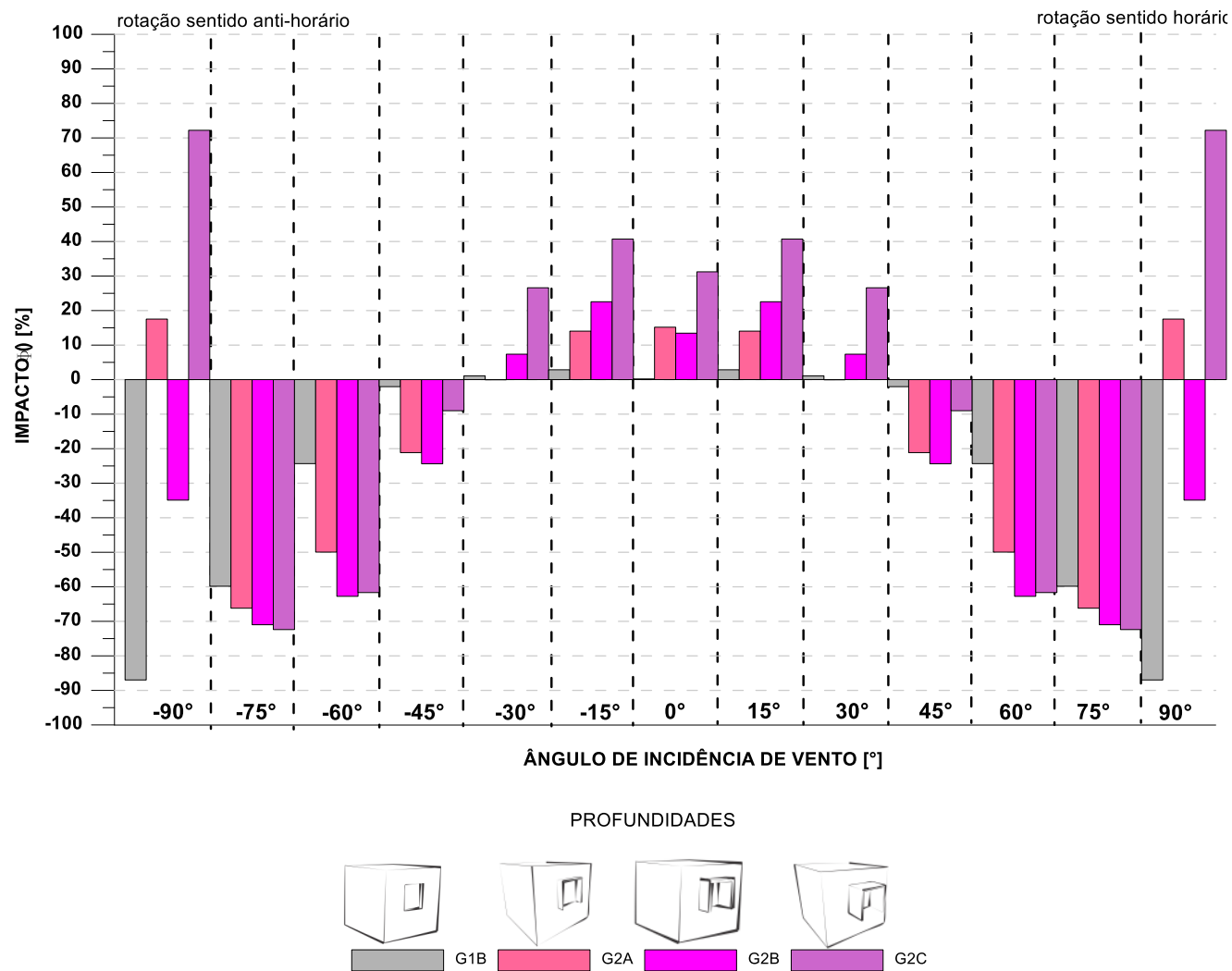
6.1.1 Impacto na ventilação natural (Φ): referência

O grupo, G1: Referências, composto pelas tipologias G1A (modelo genérico selado) e G1B (modelo genérico com aberturas), teve o fator Φ determinado apenas para a G1B, já que a G1A consiste na referência de cálculo. Em relação à G1A, a G1B apresenta pouca (pequenos incrementos nas situações 15° e 30° e redução a 45°) ou nenhuma diferença (0°) para o intervalo de incidência de vento de 0° a 45°. Reduções mais significativas (da ordem de 24% a 87%) ocorrem de 60° a 90°. Neste intervalo, a adequação do diferencial de pressão (ΔC_p), mas, principalmente, dos valores de coeficientes de descarga (C_d) promovem essas diferenças nas taxas de vazão, que foram, conseqüentemente, capturadas pelos respectivos fatores Φ . De acordo com Karava; Stathopoulos; Athienitis (2004), principalmente para aberturas de maior porosidade, o aumento do ângulo de incidência de vento tende a decrescer os valores de C_d , logo valores específicos devem ser considerados.

6.1.2 Impacto na ventilação natural (Φ): variação na profundidade dos elementos de sombreamento

O aumento progressivo da profundidade dos elementos de sombreamento (equivalentes a 0,25 m; 0,50 m e 0,75 m, respectivamente, tipologias G2A; G2B e G2C) resulta em impacto positivo no intervalo de incidência de vento de 0° a 30° e para o 90° (exceto para a G2B) e negativo nas demais rotações conforme ilustradas na Figura 81.

Figura 81: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G2A, G2B e G2C para os diferentes ângulos de incidência de vento.



Fonte: A Autora (2021).

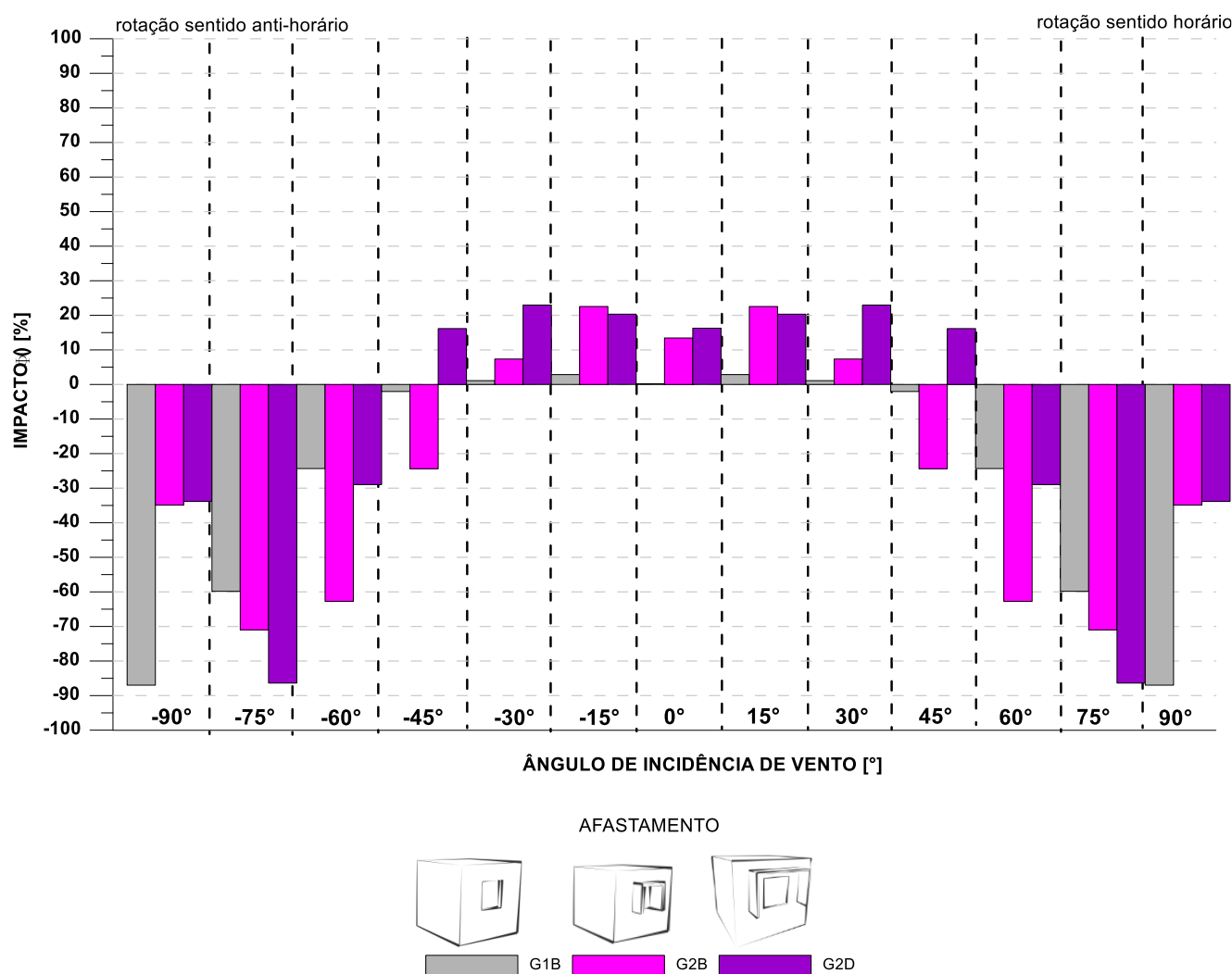
Nas situações de 0° a 30° , a G2C apresenta os maiores incrementos possivelmente por potencializar o Efeito Venturi devido ao prolongamento do afunilamento do escoamento imposto por seus elementos de maiores profundidades. Aos 15° e 30° , os percentuais positivos incrementam conforme o aumento da profundidade dos elementos. Na situação de 0° , a tipologia G2A apresenta um impacto 2% superior ao da G2B, devido à sua menor influência no escoamento resultante de seus elementos de menor profundidade.

Na incidência oblíqua (45°), é possível verificar a influência que, principalmente, os componentes verticais de diferentes profundidades impõem ao escoamento. Essas variações nas suas dimensões resultam em diferentes zonas de separação que podem reduzir, em maior ou menor grau, a área de abertura disponível ao escoamento. Desta forma, menores reduções são notadas na G2A e maiores, na G2C. Esse padrão persiste até a situação de 75° , que configura impacto negativo de maior magnitude para todas as tipologias. Por fim, aos 90° , a presença dos dispositivos de sombreamento resulta em maiores diferenciais de pressão entre as faces com aberturas e, assim, denota pequenos incrementos nas taxas de vazão em relação à referência. Os valores percentuais são significativos por remeterem a uma relação caracterizada por valores reduzidos.

6.1.3 Impacto na ventilação natural (Φ): afastamento em relação à abertura de entrada

O impacto (em valores percentuais) do posicionamento dos dispositivos de sombreamento no limiar da abertura de entrada (G2B) ou de modo afastado (G2D) é apresentado na Figura 82.

Figura 82: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G2B e G2D para os diferentes ângulos de incidência de vento.



Fonte: A Autora (2021).

Impactos positivos são observados de 0° a 30° para a tipologia G2B e de 0° a 45° para a G2D. Para as demais situações, os elementos de sombreamento reduzem o potencial de ventilação natural.

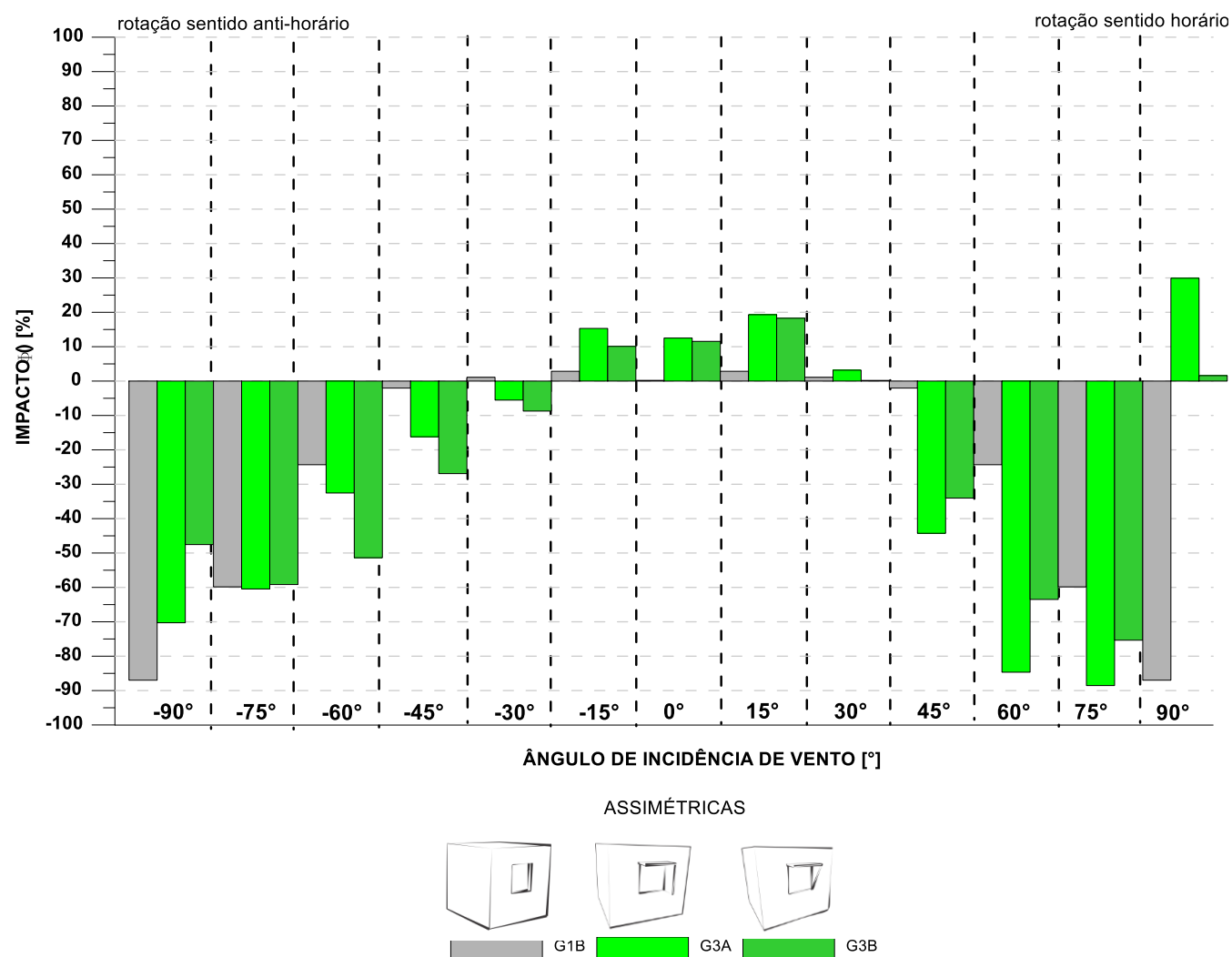
A 0°, o afastamento dos elementos da abertura de entrada (G2D) reduz a sua influência no escoamento, logo denota um impacto mais positivo. A 15°, a presença dos protetores no limiar da abertura (G2B) potencializa o Efeito Venturi e apresenta um maior incremento. Nas incidências de 30° e 45°, o afastamento dos dispositivos de mesma profundidade dos limites da abertura resulta em impacto positivo na ventilação natural. Na situação de 45° esse padrão fica evidente, uma vez que enquanto a G2B reporta uma redução de 9%, a G2D ainda indica um incremento de 16% em relação à referência. A

60°, o afastamento dos elementos (G2D), comparativamente com a tipologia G2B, representa uma menor redução na taxa de vazão. Na situação de escoamento paralelo (90°) às aberturas, os impactos são semelhantes, distinguindo-se em 1%.

6.1.4 Impacto na ventilação natural (Φ): geometrias assimétricas

As tipologias G3A e G3B, devido à assimetria de suas geometrias, são analisadas para o intervalo de incidência de vento de -90° a 90° (Figura 83). A rotação do modelo no sentido horário caracteriza situações em que os elementos de sombreamento funcionam como uma barreira ao escoamento. No sentido anti-horário, a abertura está mais exposta ao escoamento.

Figura 83: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G3A e G3B para os diferentes ângulos de incidência de vento.



O impacto positivo da adoção de ambas as geometrias assimétricas é verificado no intervalo de -15° a 30° e a 90°. Em todas as situações de incremento, a G3A apresenta valores superiores à G3B. No caso das angulações menores (-15° a 30°) pode ser justificado pelo maior direcionamento do escoamento

para o interior do modelo por seu formato mais restritivo. A 90° , essa maior obstrução ao escoamento intensifica o diferencial de pressão entre as faces opostas e resulta em um pequeno aumento na taxa de vazão em relação à referência, no entanto por se tratar de uma relação entre valores reduzidos, o percentual de incremento indicado é alto.

Para todas as demais incidências de vento, reduções nas taxas de vazão decorrentes da adoção das tipologias assimétricas são reportados. Alguns padrões são observados: de 45° a 75° , os impactos negativos são maiores para quanto maior for a angulação do vento incidente. Ademais, são maiores para a tipologia G3A em razão da sua geometria mais restritiva. Nas rotações anti-horárias (-30° a -90°), as reduções são menores que nas horárias, uma vez que o elemento vertical do dispositivo de sombreamento ao ser posicionado após a abertura de entrada, não reproduz uma barreira ao escoamento. Nas rotações de -30° a -60° , ao analisar comparativamente as duas opções de geometrias assimétricas, nota-se que a G3A apresenta percentuais menores de redução. Ao contrário da G3B, que apresenta seu elemento vertical chanfrado a 45° , a G3A é caracterizada por um protetor inteiriço ao ser disposto após a abertura pode captar o escoamento, apresentando, portanto, impactos negativos menores que a G3B. Na situação de 75° , impactos semelhantes são indicados. E, por fim, a -90° , a redução referente à G3A é superior à G3B.

6.1.5 Impacto na ventilação natural (Φ): geometrias simétricas

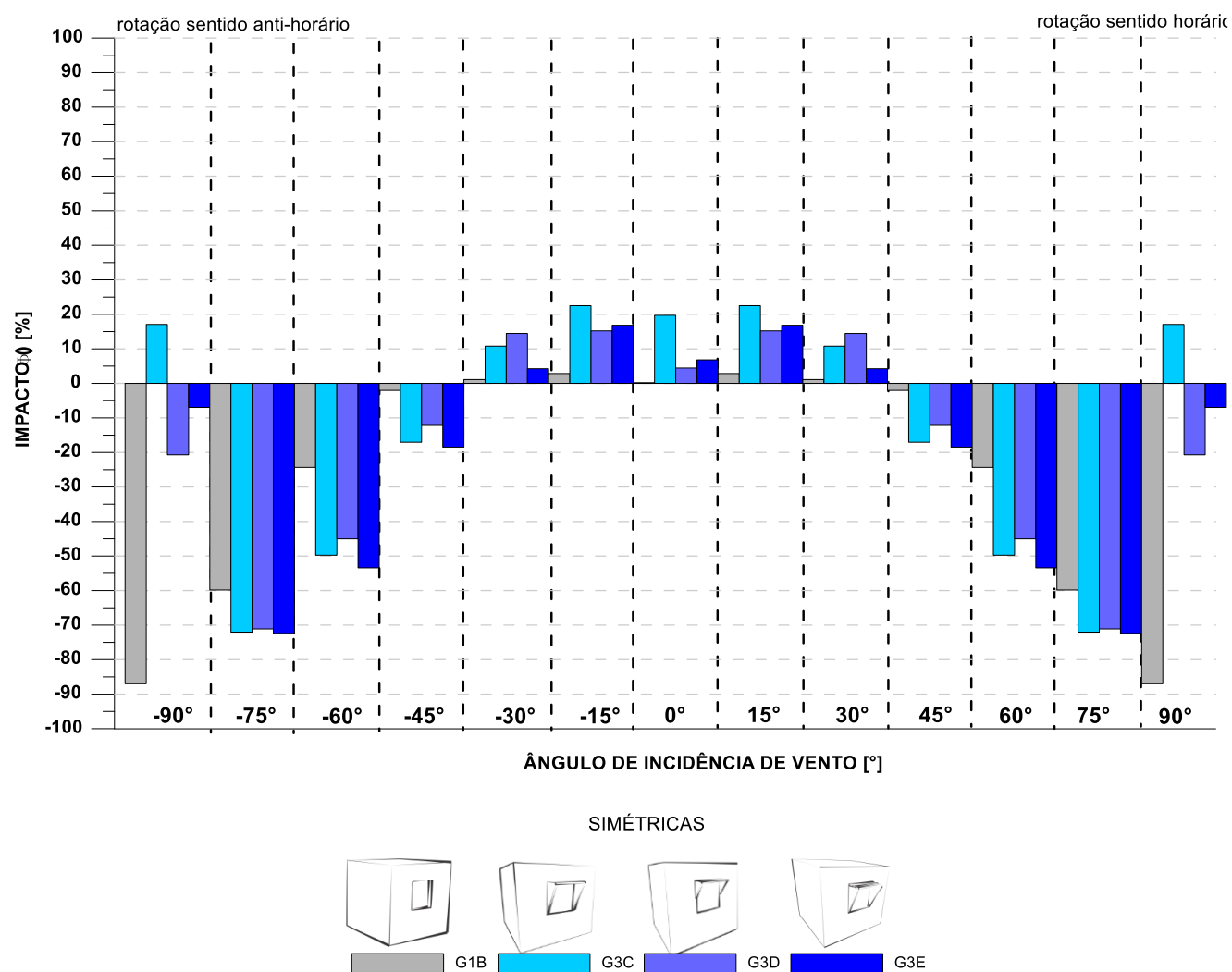
A Figura 84 apresenta os incrementos e reduções percentuais referentes às tipologias com variações simétricas em suas geometrias (G3C, G3D e G3E). Em geral, impacto positivo é verificado no intervalo de 0° a 30° para todas as tipologias e, na situação de 90° , para a G3C.

Nas situações de 0° e 15° , a G3C apresenta os maiores incrementos percentuais, possivelmente, por intensificar o Efeito Venturi na abertura de entrada, seguida da G3E que, por apresentar o seu componente horizontal filetado, e conseqüentemente, um escape ao escoamento, indica um aumento percentual ligeiramente inferior quando comparada à primeira.

Aos 30° , a G3D, que nos cenários anteriormente descritos (ângulos de incidência de 0° e 15°) indicava o menor incremento; neste contexto, reporta o maior dentre as tipologias deste subgrupo. Nesta incidência de vento, a característica de sua geometria em apresentar elementos verticais ocupando apenas metade da altura do vão da abertura, aumenta o potencial de ventilação no ambiente. A partir dos 45° reduções percentuais são presentes em todas as tipologias simétricas. O padrão da tipologia G3D continuar a apresentar um percentual de redução menor que as demais (G3C e G3E), sugere que o escoamento, separado no dispositivo, recale ainda sobre a abertura e que o elemento vertical a jusante auxilie a reorientá-lo para o interior do modelo.

Por fim, aos 90° , a tipologia G3C indica incremento, enquanto as demais, reduções. Esse incremento em taxa de vazão é pequeno e pode ser decorrente de um aumento do diferencial de pressão entre as faces ocasionados por uma geometria mais restritiva ao escoamento tangente ao modelo, característico desta situação.

Figura 84: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G3C, G3D e G3E para os diferentes ângulos de incidência de vento.



Fonte: A Autora (2021).

6.1.6 Impacto na ventilação natural (Φ): geometrias complexas

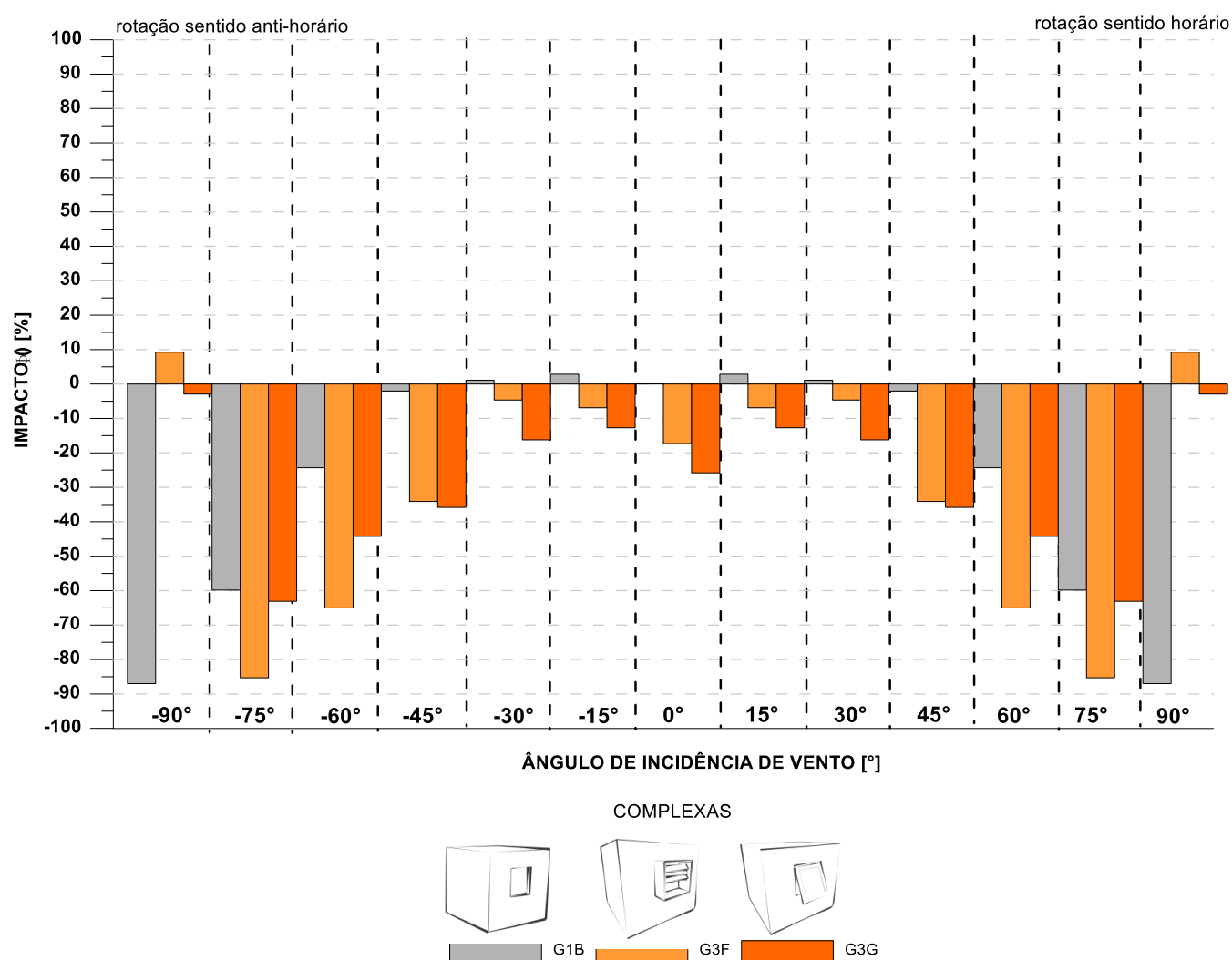
O último subgrupo analisado é caracterizado por geometrias complexas (Figura 85). Estas tipologias receberam esta denominação por se posicionarem fora do escopo de investigação acerca de intervenções simétricas e assimétricas de uma geometria inicial (G2B).

Portanto, as complexas fazem referência, considerando as devidas adequações ao modelo genérico, a dispositivos de sombreamento encontrados em edificações brasileiras e portuguesas. Por apresentarem geometrias mais restritivas ao escoamento, diferem-se do padrão de resultados observados nos demais subgrupos tipológicos, pois reportam reduções no potencial de ventilação independente da incidência de vento. Uma única exceção ocorre a 90° para a tipologia G3F, no entanto, trata-se de um pequeno aumento na taxa de vazão e, em uma situação, que já é caracterizada por um fluxo de ar reduzido.

De 0° a 30°, menores reduções são observadas para a tipologia G3F. Esta geometria, embora apresente uma maior resistência ao escoamento na parte superior, tem a sua parte inferior mais exposta. Além disso, a disposição de elementos em todo o limiar da abertura de entrada, pode intensificar o Efeito Venturi. A G3G, por ser caracterizada por uma trama, imprime uma maior resistência ao escoamento nestas mesmas ocasiões.

Aos 45°, os resultados das tipologias são semelhantes. A 60° e 75°, a G3G reporta menores reduções em relação à G3F. Isto é, possivelmente, decorrente da maior obstrução ao escoamento ocasionado, principalmente, pelos elementos verticais que compõem a G3F aliados à ação das aletas superiores. Nestas incidências, a G3G, com projeção de 30° em relação à fachada do modelo, tem o vão da abertura de entrada mais exposto ao escoamento.

Figura 85: Impacto (Φ) percentual das tipologias G1B, G3F e G3G para os diferentes ângulos de incidência de vento.



Fonte: A Autora (2021).

6.2 APLICAÇÃO DO Φ E RECOMENDAÇÕES PROJETUAIS

Este item engloba uma aplicação do Φ em uma situação prática de projeto arquitetônico e o delineamento, a partir das conclusões, de recomendações projetuais para o uso das tipologias de sombreamento avaliadas em um ambiente genérico. Desta forma, o seu conteúdo é estruturado em três etapas:

(a) descrição e definição do problema projetual; (b) verificações do impacto dos dispositivos de sombreamento na ventilação natural, a partir de taxas de renovação de ar, e por fim, (c) delineamento de recomendações projetuais.

6.2.1 Descrição e definição do problema projetual

Considerou-se a partir de uma situação hipotética que o ambiente⁸⁰, ao qual o modelo genérico faz referência, fosse projetado em diferentes localidades brasileiras. Desta forma, fixou-se este exemplar hipotético e objetivou-se em ilustrar as conclusões alcançadas por esta tese a partir da aplicação dos Φ aos dados reais de um projeto arquitetônico, verificando o impacto da inclusão de dispositivos de sombreamento nas taxas de renovação de ar no ambiente.

A fim de caracterizar um intervalo representativo da velocidade média do vento no território brasileiro, duas bases de dados foram selecionadas para análise: (a) arquivos climáticos gerados a partir de dados de estações meteorológicas e; (b) as normais climatológicas divulgadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

(a) Arquivos climáticos gerados a partir de dados de estações meteorológicas

Os arquivos climáticos (*EPW- EnergyPlus Weather Data*) – desenvolvidos por Roriz (2012) e atualizados, recentemente, pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LABEEE, 2018) – foram elaborados a partir de dados horários de aferições da velocidade do vento a 10 m, oriundos de estações meteorológicas do INMET, e registrados durante o intervalo de 10 anos.

Nesta etapa, observou-se os arquivos climáticos das capitais brasileiras pertencentes a zona bioclimática 8 (ABNT, 2005-3), caracterizada por climas mais quentes e úmidos, logo com maior demanda de uso de estratégias conjugadas de ventilação natural e sombreamento das aberturas. Assim, utilizou-se dos *EPWs* para identificar o intervalo de velocidades de vento mais recorrente nestas localidades.

A Figura 86 ilustra as porcentagens de horas do ano (% horas do ano) que cada velocidade do vento (variação de 0,5 m/s) atinge nas capitais selecionadas.

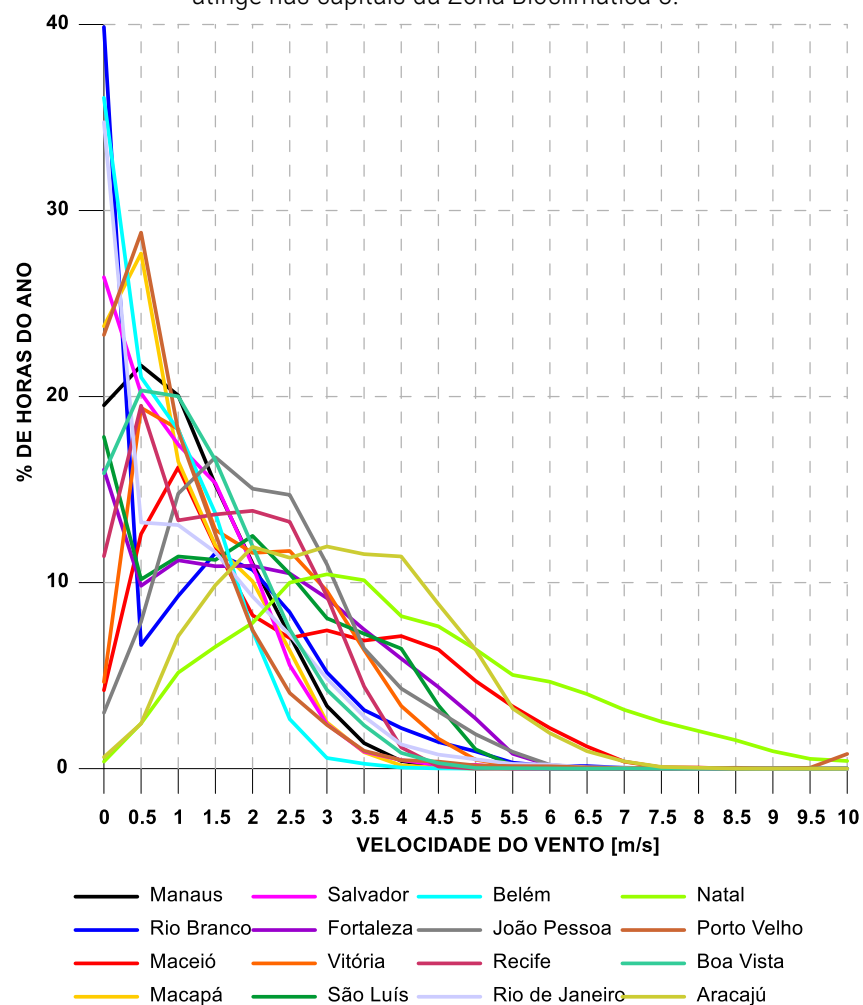
(b) Normais climatológicas - Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Por fim, a última verificação ocorreu a partir dos dados das normais climatológicas fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As normais climatológicas consistem em valores médios calculados para um período de 30 anos (1981 a 2010) a partir de dados de 438⁸¹ estações meteorológicas. As orientações da Organização de Meteorologia Mundial devem ser asseguradas e as aferições da velocidade do vento realizadas a 10 m.

⁸⁰ Ambiente de 3,0 m x 3,0 m x 2,7m de pé direito, com duas aberturas idênticas de 1m² (1,0 m x 1,0 m e peitoril de 1,1 m) dispostas em faces opostas.

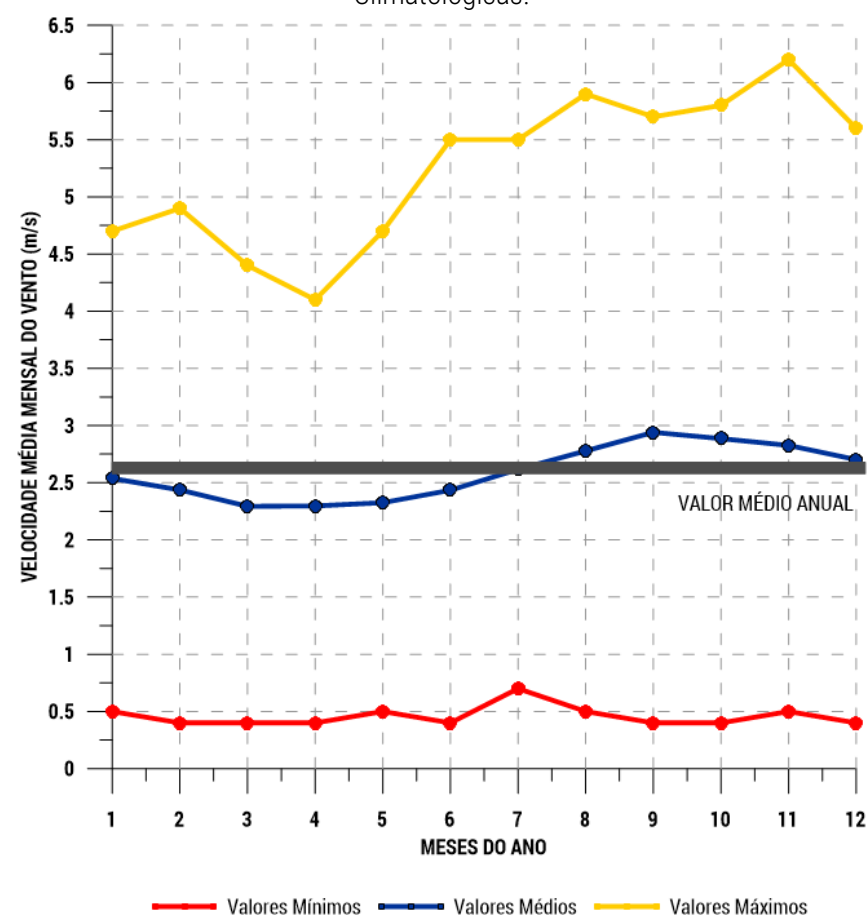
⁸¹ Os dados referentes a intensidade de vento (em m/s) disponibilizados para *download* no *website* do INMET para o período selecionado (1981 a 2010) fazem referência as aferições de 265 estações meteorológicas distribuídas pelo território brasileiro. Assim, nesta tese, as médias calculadas (dos valores médios, máximos e mínimos) foram, por sua vez, embasadas nestes dados.

Figura 86: Porcentagem de horas do ano que cada velocidade do vento (m/s) atinge nas capitais da Zona Bioclimática 8.



Fonte: A Autora (2020) a partir dos dados dos EPWs (LABEEE, 2018).

Figura 87: Velocidade média mensal do vento (m/s) de acordo com as Normais Climatológicas.



Fonte: A Autora (2020) a partir dos dados das Normais Climatológicas (INMET, 2020).

Baseando-se nos dados disponibilizados (Figura 87 e Figura 88), estabeleceu-se as médias (dos valores médios, máximos e mínimos) mensais e anual. A velocidade média anual do vento no território brasileiro é de 2,6 m/s, sendo seu valor médio máximo anual de 5,0 m/s.

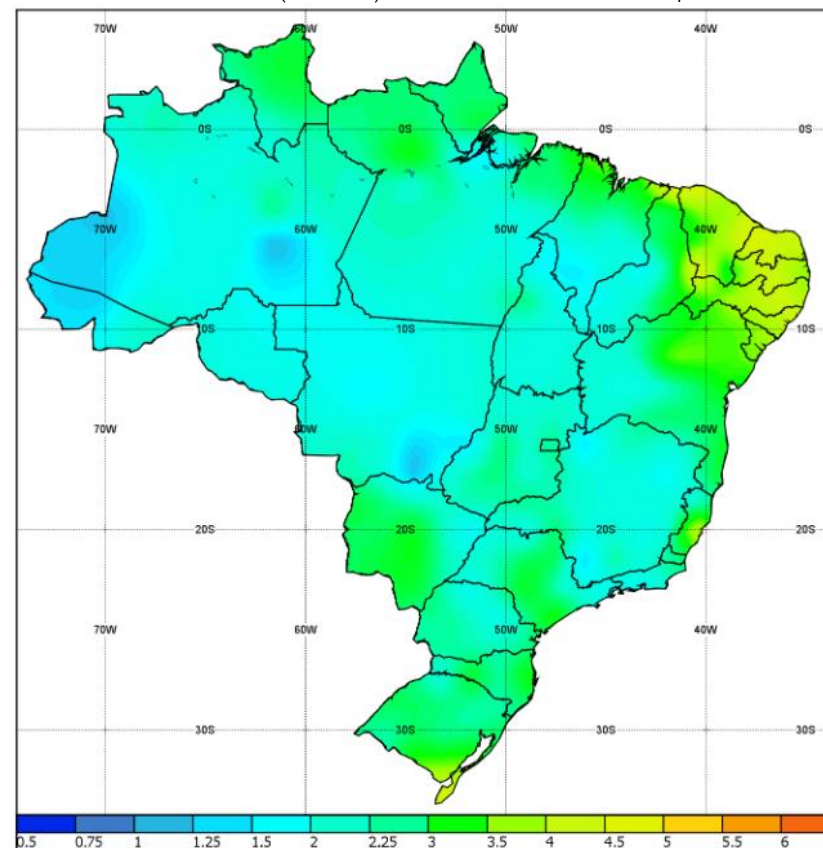
Em síntese, após a verificação das fontes de informação descritas, definiu-se que o intervalo de velocidade média do vento a ser considerado nas aplicações dos resultados originados nesta tese seria **de 2,6 m/s a 5,0 m/s**⁸².

Westphal (2020) identifica incertezas nos dados de ventos ao comparar quatro arquivos climáticos para uma mesma localidade brasileira, além de demonstrar o impacto destas variações nos resultados de simulações computacionais do desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas. Vallis; Loredou-Souza e Watrin (2017) constataram, a partir da revisão de dados de vento de estações meteorológicas da Força Aérea Brasileira (FAB) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), uma série de questões que podem influenciar na qualidade dos dados aferidos, tais como: variações

⁸² As médias, dos valores médios e máximos de velocidade média do vento em m/s, foram definidos como extremos do intervalo a ser adotado na exemplificação proposta. A média dos valores mínimos equivalente a 0,4 m/s foi desconsiderada por representar uma velocidade média de vento muito reduzida.

na altura do anemômetro, interferência de obstáculos no entorno imediato, erros nos relatórios ou nas leituras que eram computadas manualmente, diferenças nos períodos de aferições, entre outras.

Figura 88: Intensidade de vento (em m/s) no território brasileiro no período de 1981 a 2010.



Fonte: INMET (2021).

Entretanto, embora tenha consciência das incertezas que podem estar relacionadas aos dados de vento compilados nos arquivos climáticos, parte-se do pressuposto que o intervalo de velocidades de vento definido foi determinado com base em aferições de estações meteorológicas alinhadas aos requisitos da Organização Mundial de Meteorologia que estipula que as capturas sejam realizadas a 10 m de altura e em terreno de baixa rugosidade.

Logo, antes deste intervalo de velocidades ser utilizado como dado para a aplicação de projeto proposta (de um exemplar que visa à ventilação natural), estes valores devem ser corrigidos para representar as velocidades médias do vento em terrenos de implantação mais característicos de habitações brasileiras. Optou-se por fazer essa correção para um contexto suburbano.

Desta forma, fez-se a transposição das velocidades médias (em m/s), aferidas em estações meteorológicas para a altura de topo de cobertura do ambiente (2,7 m) considerando a rugosidade característica de um subúrbio, a partir das equações propostas pelo *Building Research Establishment* (BRE, 1978) e pela normativa brasileira *NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações* (ABNT, 1988). As equações assim como a descrição dos valores utilizados nestes cálculos estão sintetizados no Apêndice I. As velocidades médias resultantes das duas possibilidades de equação para o intervalo anteriormente definido foram semelhantes. De acordo com a primeira fonte, o intervalo passou a assumir valores de **1,2 m/s a 2,2 m/s**. Já, na segunda, de **1,3 m/s a 2,5 m/s**. Optou-se por prosseguir com as velocidades médias de vento obtidas por meio da normativa brasileira. Assim, estes valores foram aplicados como dados de entrada (U_{ref}) para o cálculo de vazão de ar no ambiente.

6.2.2 Verificações do impacto de dispositivos de sombreamento na ventilação natural

Após a obtenção do intervalo de velocidades médias ajustadas para um contexto suburbano, calculou-se a vazão de ar (em m³/s) para o ambiente genérico, considerando as duas possibilidades de velocidade ($U_{ref\ 1} = 1,3$ m/s e $U_{ref\ 2} = 2,5$ m/s).

A consideração do impacto da adoção de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento foi possível a partir da inclusão dos fatores Φ na equação do cálculo de vazão, obtendo-se a Equação 29:

$$G = Cd \cdot A \cdot \Phi \cdot U_{ref} \cdot \sqrt{\Delta Cp} \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

G: vazão de ar no ambiente (m³/s)

Φ : impacto quantitativo da inclusão do dispositivo de sombreamento (adimensional) – ver Tabela 42

Cd: coeficiente de descarga (adimensional) = **0,6**

A: área da abertura (m²) = **1 m²**

U_{ref}: velocidade média na altura de referência (m/s) – **U_{ref 1} = 1,3 m/s e U_{ref 2} = 2,5 m/s**

$\sqrt{\Delta Cp}$: raiz do diferencial de pressão observado na abertura analisada (adimensional). = **ΔCp modelo selado**

Após a determinação das vazões de ar (m³/s) para as duas possibilidades de velocidades médias ($U_{ref\ 1} = 1,3$ m/s e $U_{ref\ 2} = 2,5$ m/s), estes valores foram transformados em taxas de renovação de ar por hora, designadas de Ren , calculadas conforme a Equação 30:

$$Ren = \frac{G \cdot 3600}{V} \quad \text{Equação 30}$$

Onde:

Ren: taxas de renovação de ar no ambiente (adimensional)

G: vazão de ar (m³/s) calculada a partir da Equação 14 para área de abertura = 1 m²

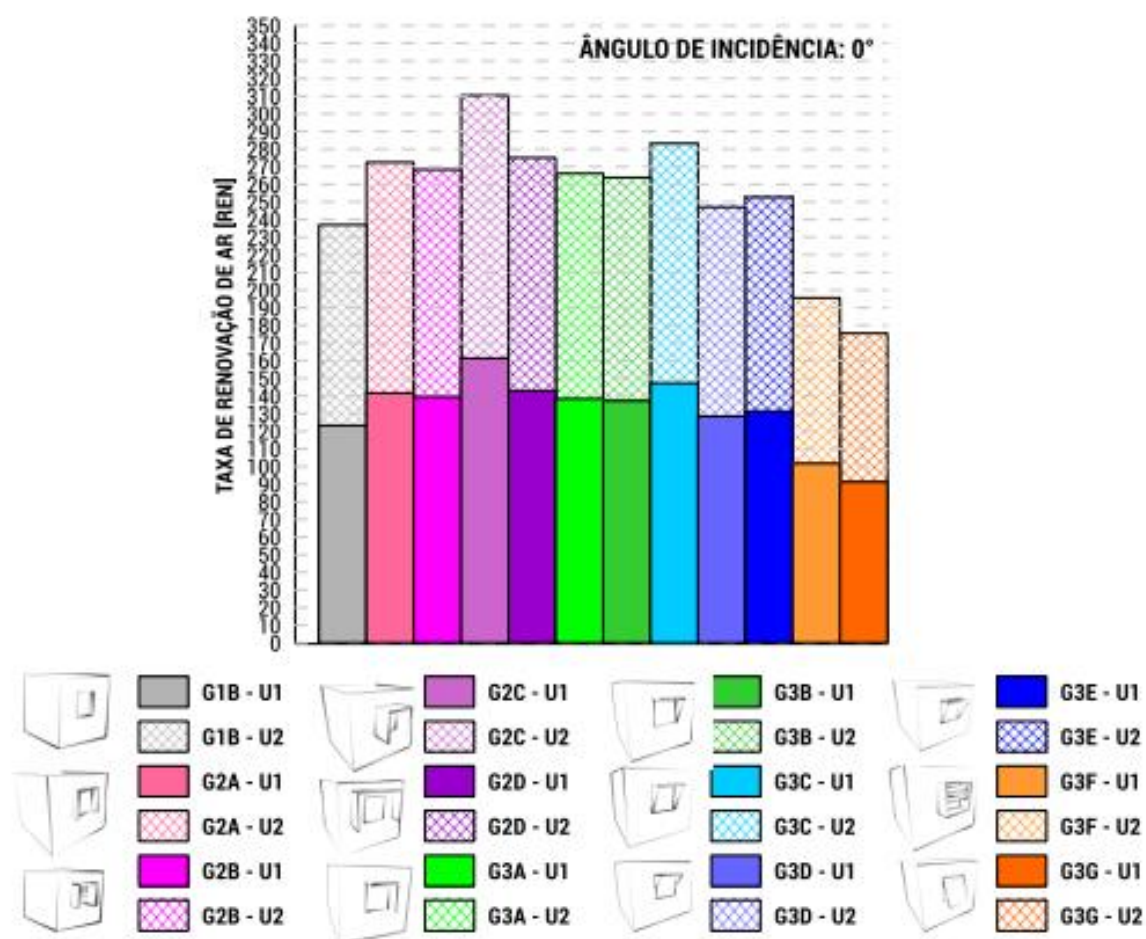
V: volume do ambiente analisado (m³) = 24,3 m³

É válida a ressalva que trata-se de um exercício hipotético, cujo o objetivo foi ilustrar e comparar o modo de aplicabilidade do impacto dos dispositivos de sombreamento no cálculo da vazão e, conseqüentemente, das taxas de renovações de ar horárias. Assim, os valores elevados destas taxas de renovações não são e nem pretendem ser adequados a realidade e são decorrentes da caracterização do modelo utilizado e das condições de ensaio, tais como: (a) as velocidades de ensaio são muito superiores as reais e, conseqüentemente, os fluxos são elevados;

(b) aberturas de mesma área, dispostas em faces opostas e com áreas efetivas máximas de ventilação; (c) espaço interior desobstruído e; (d) volume reduzido, ou seja, somente um ambiente. Deste modo, configura-se uma situação de grandes áreas para a ventilação e de reduzida perda de carga, uma vez que, não havendo outras aberturas, o percurso realizado pelo fluxo de ar é uma ligação direta entre a abertura de entrada e de saída e sem variações internas nas distribuições de pressão.

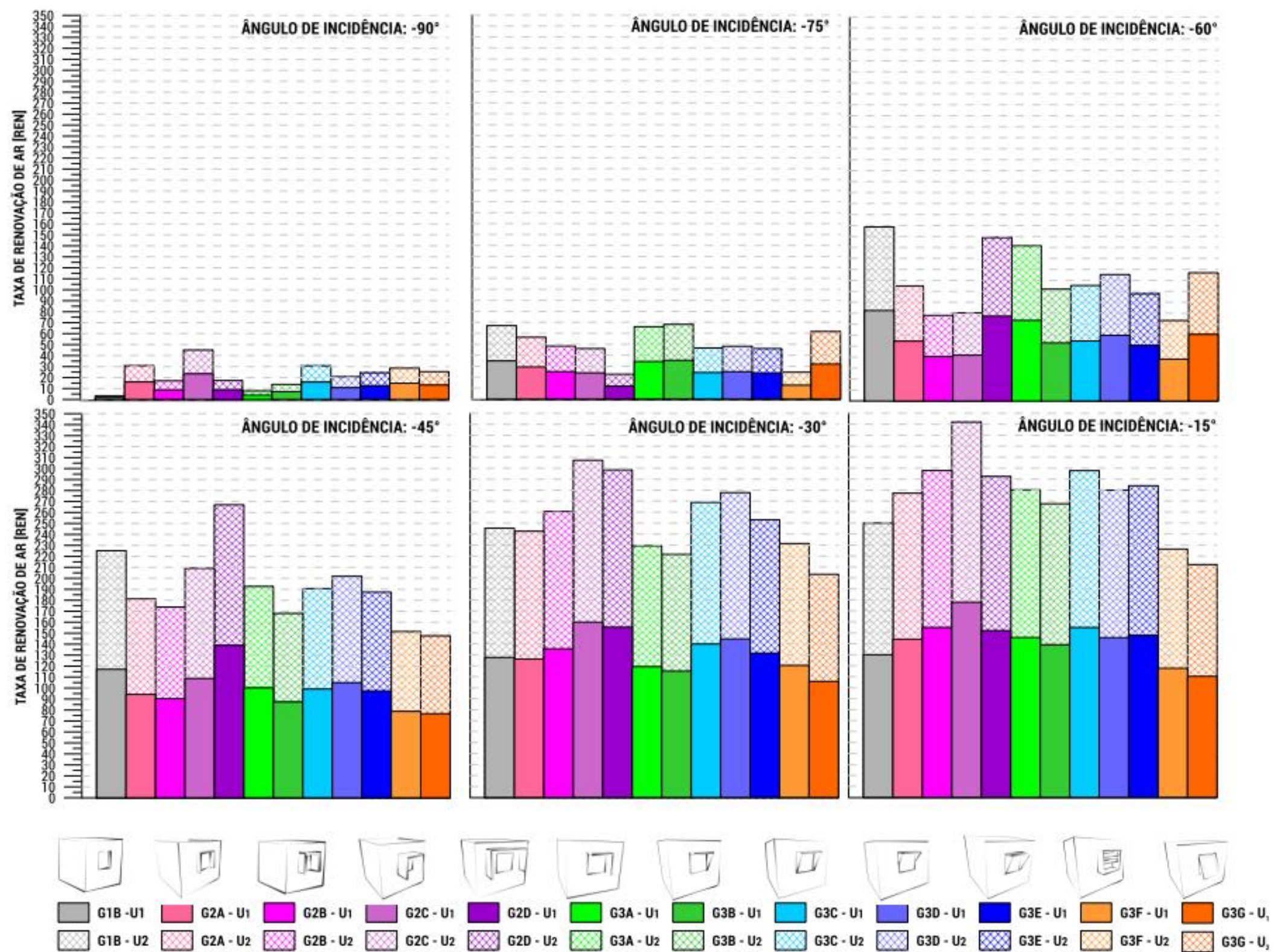
As taxas de renovação de ar (ren) para a tipologia G1B (modelo genérico com aberturas e sem dispositivos) e para as tipologias de sombreamentos analisadas (G2A a G3G) são apresentadas por ângulo de incidência de vento, considerando as duas possibilidades de velocidade média de vento de referência ($U_1 = 1,3$ m/s, representada por hachura sólida e; $U_2 = 2,5$ m/s, indicada por hachura quadriculada), na Figura 89 (para ângulo de incidência de 0°), na Figura 90 (para rotação anti-horária do ambiente, ou seja, ângulos de incidência de -90° a 15°) e, na Figura 91 (para rotação horária, isto é, para o intervalo de 15° a 90°). As tabelas apresentadas no Apêndice I também reúnem estes valores. Na sequência, a partir destes dados, recomendações projetuais acerca do uso de dispositivos de sombreamento em um ambiente genérico naturalmente ventilado são delineadas.

Figura 89: Taxa de renovação de ar (ren) em um ambiente genérico sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) com velocidades médias de referência de 1,3 m/s (U_1) e 2,5 m/s (U_2) para o ângulo de incidência de 0° .



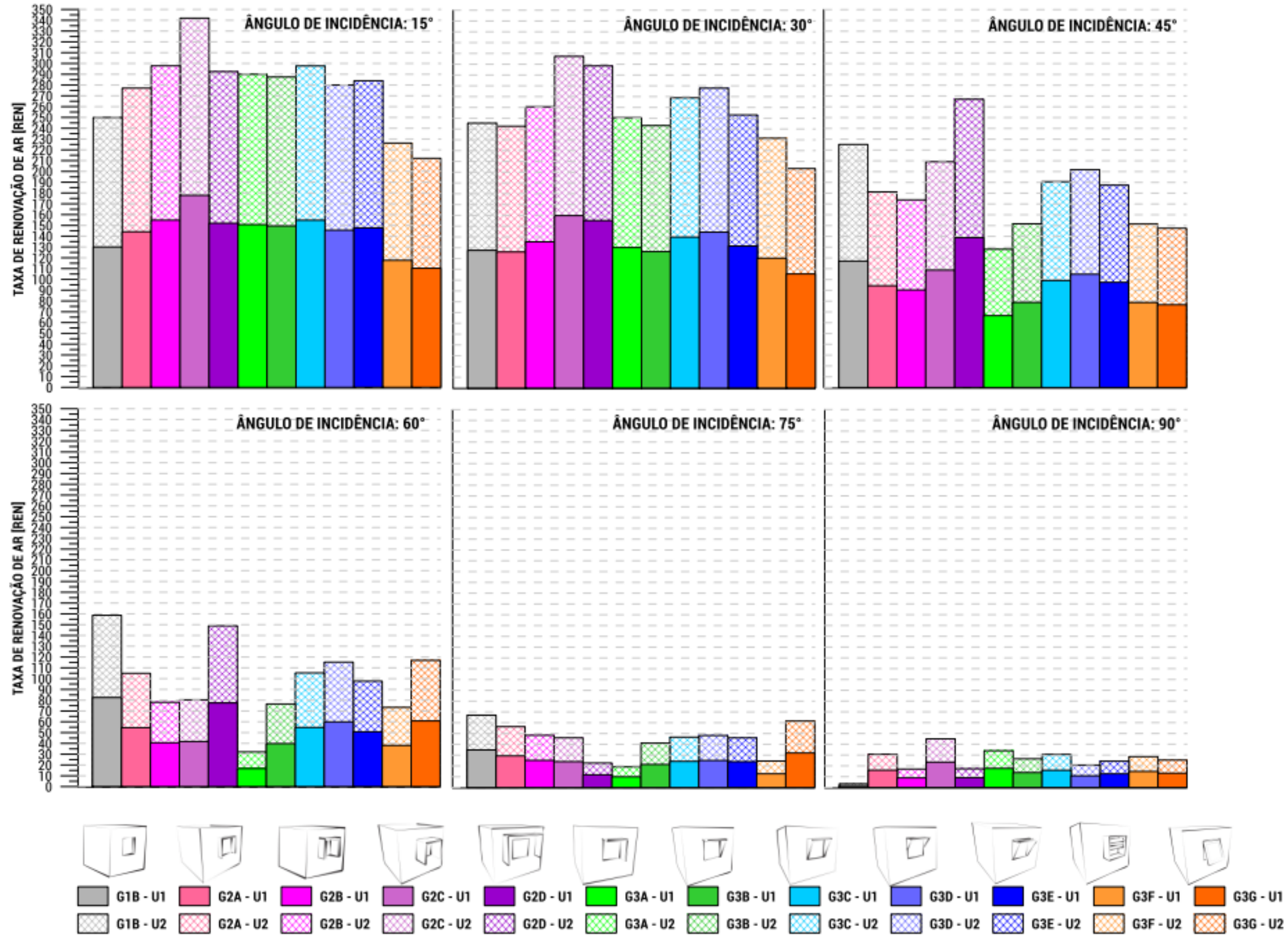
Fonte: A Autora (2021).

Figura 90: Taxa de renovação de ar (ren) em um ambiente genérico sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) com velocidades médias de referência de 1,3m/s (U1) e 2,5 m/s (U2) para ângulos de incidência de -90° a -15°.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 91: Taxa de renovação de ar (ren) em um ambiente genérico sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) com velocidades médias de referência de 1,3m/s (U₁) e 2,5 m/s (U₂) para ângulos de incidência de 15° a 90°.



Fonte: A Autora (2021).

Fonte: A Autora (2021).

6.2.3 Recomendações projetuais

Em subitem anterior (6.1 Impacto no desempenho da ventilação natural), avaliou-se a partir do fator Φ o impacto percentual dos dispositivos de sombreamento pertencentes aos diferentes grupos tipológicos no desempenho da ventilação natural. Como a variação nas taxas de renovação de ar no ambiente, independente da velocidade média de vento de referência adotada, reproduz o impacto capturado pelo fator Φ , analisa-se, neste contexto, as tipologias sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) por ângulo de incidência do vento. Assim, a partir de uma análise comparativa de todas as possibilidades avaliadas, busca-se delinear recomendações projetuais, indicando as tipologias que proporcionam impacto positivo (aumento da taxa de renovação de ar no ambiente) ou negativa (redução desta variável) para cada orientação.

Como o impacto (fator Φ) é o mesmo, independente da velocidade média do vento de referência adotada ($U_1=1,3$ m/s e $U_2=2,5$ m/s), a discussão, apresentada na sequência, é embasada nos valores de taxa de renovação de ar no ambiente referente a uma das opções. Seleciona-se a $U_1=1,3$ m/s. As figuras (Figura 89, Figura 90 e Figura 91), ilustram, de modo simultâneo, os valores da variável analisada (ren) para U_1 e U_2 .

Ângulo de incidência de 0° : como já verificado ao longo das análises anteriores (resultados dos ensaios do IPT e do LNEC), a adoção, a 0° , de dispositivos de sombreamento externos com elementos no limiar ou afastados da abertura impactam em menor grau o potencial de ventilação no ambiente, quando comparada às mesmas situações nas demais incidências. De modo geral, as tipologias auxiliam o incremento das taxas de renovação de ar, principalmente, pelos seus elementos auxiliarem o direcionamento do escoamento para o interior ou ainda por intensificarem o seu afunilamento (Efeito Venturi) e assim, a velocidade do fluxo de ar na abertura de entrada. Em relação à tipologia sem dispositivos de sombreamento, G1B que indica 123,7 renovações de ar no ambiente para a U_1 (1,3 m/s), apenas a G3F e G3G reproduzem um impacto negativo, ou seja, redução deste valor, nesta situação, para 101,7 e 91,3, respectivamente. O decaimento destas taxas é justificado pela maior restrição imposta ao escoamento por estas geometrias. Os maiores incrementos são observados nas tipologias G2C (161,4 renovações de ar) e a G3C (147,3 renovações de ar). Desta forma, para esta orientação, o uso de elementos no limiar da abertura pode auxiliar o direcionamento e o aumento da velocidade do fluxo de ar de entrada no ambiente. Ressalta-se também que tais elementos não necessariamente precisam apresentar grandes dimensões como, por exemplo, na G2C, de 0,75 m. A G3C (com elementos de 0,5 m chanfrados a 45°) incrementa o potencial de ventilação em 20% em relação a referência de cálculo (G1A), conforme denotado pelo seu fator Φ .

Nota-se que tipologias caracterizadas por elementos que não ocupam a dimensão total da altura do vão como, por exemplo, a G2D, ou apresentem escapes ao escoamento, como a G3E devido ao seu protetor horizontal filetado, registram taxas de renovações inferiores às tipologias G2C e G3C.

A fim de intensificar o potencial de ventilação no ambiente, nesta orientação, recomenda-se à adoção de tipologias de sombreamento que auxiliem a intensificação do Efeito Venturi na abertura de entrada.

Ângulos de incidência de -15° e 15° : para estas incidências de vento, a adoção de sombreamento continua a reportar incrementos no potencial de ventilação no ambiente, com exceção das tipologias G3F e G3G.

O aumento progressivo da profundidade dos elementos de sombreamentos, ocasiona incrementos também progressivos nas taxas de renovação do ar no ambiente. Sendo esse impacto positivo e da ordem de 14% (G2A); 23% (G2B) e 41% (G2C), conforme sintetizado pelo fator Φ . Estes valores sugerem que o escoamento, nesta situação de incidência de vento, separe-se ao encontrar o elemento a montante e recole sobre a abertura antes de encontrar o elemento à jusante, o qual, por sua vez, auxilia na captação e direcionamento do escoamento ao interior do ambiente.

O posicionamento no limiar da abertura ou com afastamento continua a apresentar padrões semelhantes nesta incidência. Quanto às variações assimétricas, nota-se que aos 15° quando o elemento vertical funciona como uma barreira ao escoamento, independente da sua geometria (inteiriço ou chanfrado) as taxas de renovação de ar no ambiente (considerando $U_1 = 1,3$ m/s) são semelhantes, sendo de 150,8 ren para G3A e 149,5 ren para G3B. Contudo, quando os elementos verticais são posicionados à jusante da abertura (rotação no sentido anti-horário, ou seja, ângulo de incidência de vento de -15°), uma discrepância maior entre os valores é observada (145,7 e 139,1 renovações de ar, respectivamente). A G3A apresenta impacto positivo superior, justamente pela geometria do seu elemento vertical ser mais restritiva e assim, promover uma captação mais efetiva do escoamento.

A G2C continua a indicar a maior taxa de renovação de ar, seguida das tipologias G2B e G3C que reportam incrementos semelhantes nesta mesma variável.

Ângulos de incidência de -30° e 30°: Nestas incidências, a inclusão dos dispositivos de sombreamento continuam a impactar positivamente no potencial de ventilação do ambiente, exceto para as tipologias G3F e G3G. Em relação à profundidade dos dispositivos de sombreamento, o aumento progressivo desta dimensão dos elementos, indica incrementos, também progressivos, nas taxas de renovação de ar do ambiente. Dispositivos de mesma profundidade, quando locados afastados dos limites da abertura de entrada, incrementam o fator Φ de 1,07 (G2B) para 1,23 (G2D) e se mostram como uma melhor alternativa para a ventilação natural no ambiente. Pequenas alterações geométricas nos elementos verticais, tais como chanfrá-los a 45° de modo que ocupem (G3C) ou não (G3D) a totalidade da altura do vão da abertura, aumentam as taxas de renovação de ar (139,8 ren e 144,5 ren para $U_1=1,3$ m/s) se comparados ao desempenho observado com a adoção da tipologia G2B (135,5 ren para U_1). As tipologias assimétricas (G3A e G3B) continuam a apresentar resultados mais satisfatórios para quando atuam como bloqueadores de vento do que como captadores, sendo a G3A superior dentre estas duas opções.

As maiores e menores taxas de renovação de ar no ambiente são observadas nas tipologias G2C e G3G, respectivamente, independente do sentido de rotação da geometria.

Ângulos de incidência de -45° e 45°: Com exceção da tipologia G2D (em que os elementos são posicionados afastados dos limites da abertura), todas as demais apresentam impacto negativo ($\Phi < 0$), ou seja, reduzem as taxas de renovação do ar nestes ângulos de incidência de vento. Esse desempenho da G2D ($\Phi = 1,16$) é justificado, pois o escoamento ao separar no elemento vertical a montante da abertura, devido ao afastamento, recola ainda na região da abertura e tem seu redirecionamento ao interior do ambiente potencializado pela existência do protetor a jusante. Elementos de maiores profundidades (G2C) ou componentes verticais que não ocupem a totalidade da altura do vão (G3D) apresentam impacto negativo de menor magnitude.

A partir destas incidências oblíquas, as geometrias assimétricas (G3A e G3B), funcionando como captadores de vento (rotação anti-horária, -45°), ou seja, posicionadas a jusante da abertura, indicam impacto negativo inferior em relação às mesmas geometrias em rotação horária. Quando atuam como bloqueadores do vento (rotação horária, 45°), a somatória dos efeitos de separação nas arestas do modelo e do sombreamento, posicionam a região da abertura em uma zona de sombra de vento, o que impacta negativamente no potencial de ventilação resultante desta configuração.

Assim, pela primeira vez, observa-se discrepância entre as tipologias com maiores e menores taxas de renovação de ar no ambiente para esta incidência de vento, em rotação horária e anti-horária do modelo. Para 45°, a maior taxa de ren é observada na G2D e a menor na G3A, sendo que para -45°, a G2D continua sendo a superior, mas a G3G é a que configura a menor taxa.

Ângulos de incidência de -60° e 60°: Nestes ângulos de incidência de vento, o impacto é negativo para todas as tipologias de sombreamento consideradas. A tipologia G1B, modelo genérico com aberturas e sem sombreamentos, indica as maiores taxas de renovação de ar interno em ambas as possibilidades de rotações do modelo (-60° e 60°).

Quanto às tipologias com sombreamentos, as tipologias em que o vão de abertura está mais desobstruído ao escoamento são favorecidas. Para rotação anti-horária (-60°), esse padrão pode ser observado nas tipologias com afastamento (G2D com 77,4 ren), na assimétrica (G3A com 73,5 ren) e na complexa (G3G com 60,8 ren). Na G3A, o elemento posicionado a jusante da abertura funciona como um captador do escoamento. A G3G, caracterizada por um elemento projetável em relação ao plano normal da fachada, tem maior área disponível ao escoamento nesta situação, favorecendo a renovação do ar interno. A maior redução na taxa de renovação de ar é indicada na G3F.

Para rotação horária (60°), a geometria assimétrica, que representava uma opção satisfatória na angulação oposta, nesta ocasião atuando como bloqueador de vento, reporta o impacto negativo de maior magnitude, reduzindo a taxa de renovação para 66,6 ren. Assim, aos 60°, as tipologias que menos reduzem o potencial de ventilação são a G2D, G3G e G3D, com fatores Φ iguais a 0,71; 0,56 e 0,55, respectivamente.

Ângulos de incidência de -75° e 75°: Nestas incidências de vento, o potencial de ventilação no ambiente é reduzido e os sombreamentos o impactam negativamente. Novamente, é a tipologia sem dispositivos de sombreamento (G1B) que apresenta a menor redução deste potencial (com 34,8 ren) na rotação horária e na anti-horária, é superada apenas pela G3B (com 35,4 ren).

Melhores taxas de renovação continuam a serem observadas em geometrias que impõem menor obstrução ao escoamento. Na rotação, horária (75°), são elas: G3G (com 32,0 ren) e G2A (com 29,3 ren). Já para a situação oposta (-75°), as maiores taxas são observadas nas assimétricas G3A e na G3B, com os elementos posicionados após o vão de abertura redirecionando o fluxo de ar ao ambiente.





















Menores taxas de renovação do ar interno são registradas na tipologia G2D (para -75°) e G3A (75°). Ambas as tipologias intensificam o efeito de separação e a região da abertura é posicionada, portanto, em uma área de sombra de vento, o que resulta em uma baixa circulação do ar.

Ângulos de incidência de -90° e 90°: A inclusão de dispositivos de sombreamento em uma das aberturas em situação de escoamento tangente, proporciona variações nos diferenciais de pressão das faces opostas e repercute em uma menor redução do potencial de ventilação natural se comparado aos valores obtidos na G1B (modelo com aberturas e sem dispositivos). Desta forma, a tipologia com menor taxa de renovação é a G1B (1,8 ren para $U_1=1,3$ m/s), em ambas as rotações (-90° e 90°). A tipologia G2C (com 23,4 ren nas mesmas situações) é a com maior taxa de renovação. Destacam-se os comportamentos das tipologias assimétricas (G3A e G3B) que apresentam valores superiores na rotação horária (90°) do que na anti-horária (-90°). A G3A, devido a sua geometria mais restritiva, o protetor vertical a montante da abertura, causa uma barreira ao escoamento e impacta a distribuição de pressão nesta face em maior grau do que se o mesmo fosse posicionado à jusante. A somatória dos efeitos de separação na aresta do modelo e da existência logo na sequência de uma obstrução ao escoamento ocasionam a formação de uma zona de pressão mais negativa, o que resulta em variações entre os diferenciais de pressão efetivos calculado para esta mesma tipologia nas rotações horária e anti-horária.

De modo geral, nestas incidências, a existência dos sombreamentos incrementa as taxas de renovação do ar no ambiente, sendo maiores para quanto maior for a sua influência na distribuição de pressão entre as faces.

A Tabela 43 reúne para o intervalo de ângulos de incidência considerado (-90° a 90°) a síntese das conclusões, recomendações projetuais e a indicação das tipologias com as maiores e menores taxas de renovação de ar para cada orientação.

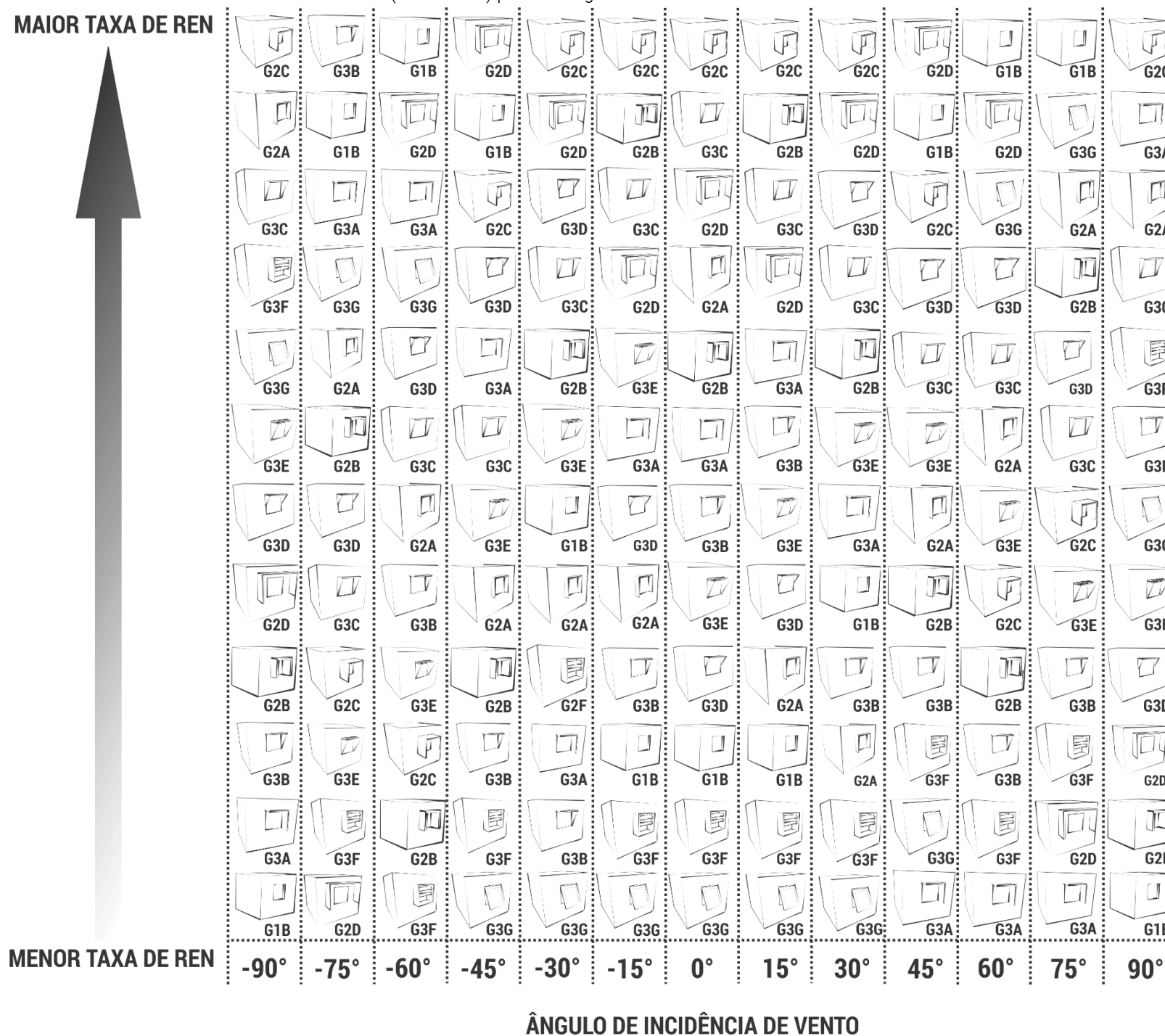
Tabela 43: Síntese das conclusões, recomendações projetuais e a indicação das tipologias com as maiores e menores taxas de renovação de ar para cada incidência de vento (-90° a 90°).

Incidência do vento	Síntese das conclusões/ Recomendações Projetuais	Maior REN	Menor REN
0°	<ul style="list-style-type: none"> Impacto positivo (aumento da taxa de renovação de ar no ambiente) para todas as tipologias, com exceção, da G3F e G3G. O posicionamento de elementos de mesma dimensão no limiar (G2B) ou afastados da abertura de entrada (G2D) apresentam impacto semelhante. Tipologias assimétricas, mesmo com variação na geometria do seu elemento vertical, indicam impacto semelhante. Priorização de tipologias que intensifiquem o Efeito Venturi na abertura de entrada (como por exemplo, G2C e G3C). 	 G2C	 G3G
-15°	<ul style="list-style-type: none"> Impacto positivo (aumento da taxa de renovação de ar no ambiente) para todas as tipologias, com exceção, da G3F e G3G. O posicionamento de elementos de mesma dimensão no limiar (G2B) ou afastados da abertura de entrada (G2D) apresentam impacto semelhante. Aumento progressivo da dimensão dos elementos de sombreamento, incrementa progressivamente o potencial de ventilação. Geometrias assimétricas, funcionando como bloqueadores de vento, ou seja, rotação horária, apresentam comportamentos semelhantes. Em rotação anti-horária, atuam como captadores, G3A é superior a G3B. No subgrupo tipológico simétricas, a G3C continua a apresentar o maior incremento e as tipologias G3D e G3E indicam taxas de renovação de ar semelhantes. 	 G2C	 G3G
15°			
-30°	<ul style="list-style-type: none"> Impacto positivo (aumento da taxa de renovação de ar no ambiente) para todas as tipologias, com exceção, da G3F e G3G. Aumento progressivo da dimensão dos elementos de sombreamento, incrementa progressivamente o potencial de ventilação. Geometrias assimétricas, funcionando como bloqueadores de vento, ou seja, rotação horária, apresentam comportamentos semelhantes. Em rotação anti-horária, atuam como captadores, G3A é superior a G3B. Pequenas alterações geométricas nos elementos verticais, auxiliam no incremento das taxas de renovação do ar no ambiente. Dispositivos de mesma dimensão quando locados afastados do limiar da abertura (G2D), incrementam o potencial de ventilação no ambiente. 	 G2C	 G3G
30°			
-45°	<ul style="list-style-type: none"> Dentre as tipologias avaliadas apenas a G2D (elementos afastados do limiar da abertura) apresenta impacto positivo, enquanto as demais reportam impacto negativo, independente do sentido de rotação do modelo. Impacto negativo de menor magnitude é observado na tipologia com maior dimensão dos seus elementos (G2C) ou quando os elementos verticais não ocupam a totalidade da altura do vão (G3D). Geometrias assimétricas (como captadores, ou seja, rotação anti-horária) apresentam desempenhos superiores às mesmas tipologias quando atuam como bloqueadores (incidência 45°). A -45°, recomenda-se que o elemento vertical imponha mais resistência ao escoamento (G3A) e na situação oposta (45°), sugere-se que o mesmo apresente maior permeabilidade (G3B). 	 G2D	 G3G
45°		 G2D	 G3A
-60°	<ul style="list-style-type: none"> Todas as tipologias de sombreamento impactam negativamente o potencial de ventilação natural do ambiente. Aos 60°, as tipologias (com sombreamentos) que menos reduzem a taxa de renovação do ar são: G2D, G3G e G3D, ou seja, geometrias que obstruem em menor grau o vão da abertura de entrada. Na situação oposta (-60°), as tipologias com impacto negativo de menor magnitude, são: G2D, G3A e G3G. Tipologias assimétricas (funcionando como captadores, ou seja, rotação anti-horária) auxiliam no incremento das taxas de renovação. Prioriza-se a tipologia G3A por apresentar a geometria do elemento a jusante mais restritiva e intensificar, portanto, este padrão. Quanto as variações na profundidade dos elementos, para ambas as possibilidades de rotação da geometria, a G2A reporta taxas superiores em relação a G2B e G2C. Quanto variações simétricas das geometrias, a G3D, por impor menor obstrução ao escoamento tem taxas de renovações superiores às tipologias G3C e G3E. 	 G1B	 G3F
60°		 G1B	 G3A
-75°	<ul style="list-style-type: none"> Todas as tipologias de sombreamento impactam negativamente o potencial de ventilação natural do ambiente. Aos 75°, dentre as tipologias com dispositivos de sombreamento, as que indicam impacto negativo de menor magnitude são: G3G e G2A. Já aos -75°, as assimétricas (G3A e G3B), ao funcionarem como captadores, reduzem em menor grau a taxa de renovação de ar interno. As tipologias que indicam maior impacto negativo são: G3A (75°) e G2D (-75°), por intensificarem os efeitos de separação do escoamento e posicionarem, portanto a região da abertura de entrada em uma zona de sombra de vento. A G3D continua sendo superior dentre as tipologias simétricas e a G2A dentre as com variação da profundidade dos elementos de sombreamento. 	 G3B	 G2D
75°		 G1B	 G3A
-90°	<ul style="list-style-type: none"> A adoção de dispositivos de sombreamento incrementa as taxas de renovação do ar no ambiente, sendo maiores para quanto maior for a sua influência na distribuição de pressão entre as faces. 	 G2C	 G1B
90°			

Fonte: A Autora (2021).

Por fim, a Figura 92 exibe uma classificação do impacto da adoção das tipologias de dispositivos de sombreamento no potencial de ventilação do ambiente por ângulo de incidência de vento (-90° a 90°). Assim, a partir de uma gradação das menores para as maiores taxas de renovação de ar no ambiente, as tipologias sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) são elencadas.

Figura 92: Gradação das menores para as maiores taxas de renovação de ar no ambiente verificadas nas tipologias sem (G1B) e com dispositivos de sombreamento (G2A a G3G) para os ângulos de incidência de vento de -90° a 90° .



Fonte: A Autora (2021).

6.3 SÍNTESE DO ITEM

A partir dos dados provenientes dos ensaios em túnel de vento, calculou-se o fator de impacto (Φ) correspondente a adoção de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento. O Φ foi determinado a partir de uma relação de vazões no modelo com dispositivo avaliado e no modelo adotado como referência. Este modelo de referência, G1A, buscou reproduzir o formato que os dados de pressão são, usualmente, disponibilizados ou encontrados na literatura científica, ou seja, para modelos lisos e selados. Um valor padrão também foi indicado ao coeficiente de descarga (0,6). Assim, a determinação do Φ indica uma ordem de grandeza quantitativa da divergência entre estes dois dados (modelos com sombreamento e de referência).

Desta forma, objetivou-se o desenvolvimento de dois tipos de contribuições com estas informações: (i) determinação de fatores de impacto (Φ) para avaliações empíricas ou numéricas de ventilação natural em modelo semelhante e; (ii) indicação de recomendações projetuais ao aplicar as conclusões do Φ em um problema projetual.

Por fim, é importante ressaltar que, neste trabalho, são apresentados dados do impacto dos dispositivos de sombreamento na ventilação natural. Com posse destas informações, cabe ao projetista, durante a concepção projetual, em uma fase de análise em que são elencadas as potencialidades e necessidades do clima local, selecionar a tipologia que melhor responde ao problema projetual. Às vezes, uma tipologia mais restritiva à ventilação como, por exemplo a G3F, em um clima com alta necessidade de bloqueio de radiação direta, atenderá de modo mais satisfatório à somatória das demandas de ventilação natural e insolação.



7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Já a algum tempo, vem circulando o equívoco de que "Edifícios Inteligentes" são aqueles cheios de geringonças automáticas. Um dia, eles compreenderão que inteligente mesmo é o edifício "unplugged", que se aproveita das forças da natureza.

(MAURÍCIO RORIZ)

Objetivou-se, nesta Tese de Doutorado, avaliar quantitativamente o impacto de dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural de um modelo genérico (representativo de um ambiente residencial), a partir, prioritariamente, da distribuição das pressões externas na sua envoltória. Ensaio em túneis de vento foram realizados, em momentos distintos do desenvolvimento da pesquisa, junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), em São Paulo, Brasil e ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa, Portugal e embasaram, cada qual, pontos específicos de investigação que contribuiriam na resolução do objetivo geral proposto.

A hipótese – de que a presença de dispositivos de sombreamento externos impacta na distribuição de pressão e, desta forma, valores correspondentes a geometrias lisas deveriam ser utilizados com criticidade em avaliações e/ou estimativas acerca do desempenho da ventilação natural nestas edificações –, foi confirmada. A seguir são sintetizadas, as principais conclusões, acerca de cada ponto de análise que contribuiriam para o entendimento desta lacuna:

7.1 IMPACTO NA PRESSÃO (Cps, coeficientes de pressão devido ao vento e, ΔC_p , diferencial de pressão efetivo)

Inicialmente e prioritariamente, o impacto dos dispositivos de sombreamento na ventilação natural foi observado a partir da aferição da distribuição de pressão nas envoltórias externas de um modelo genérico. Os ensaios, tanto no IPT quanto no LNEC, tiveram como únicos parâmetros variáveis a tipologia dos dispositivos de sombreamento e o ângulo de incidência de vento. Os dados de pressão aferidos foram pós-processados em coeficientes de pressão (Cps) devido ao vento ou em diferenciais de pressão efetivos (ΔC_p), podendo, este último, ser uma avaliação da relação entre os valores médios das fachadas destinadas às aberturas, nomeadas de barlavento e sotavento ($\Delta C_{pm} = C_{pm} \text{ barlavento} - C_{pm} \text{ sotavento}$), ou da diferença local também entre estas duas faces ($\Delta C_{plocal} = C_p \text{ barlavento} - C_p \text{ sotavento}$).

Nos ensaios do IPT, cinco tipologias (sem sombreamento, modelo genérico selado e com aberturas e, com protetores, horizontal, combinados e verticais) foram ensaiadas para oito incidências de vento (de 0° a 90° , com intervalos de 15° e, 180°). Estes primeiros ensaios foram fundamentais para o entendimento e a identificação de alguns padrões de comportamento do impacto dos sombreamentos na distribuição de pressão externa, tais como: (a) comparativamente, em relação às tipologias com componentes verticais, o elemento horizontal resultou em menor influência; (b) maiores impactos foram identificados nas tipologias com protetores verticais, principalmente nas incidências de vento mais oblíquas (de 45° a 75°). Isso se deve à barreira imposta ao escoamento e à criação de zonas de separação que abrangem em maior ou menor grau a área efetiva de ventilação na abertura a barlavento; (c) pouca influência ocorreu com posicionamento dos sombreamentos a sotavento, ou seja, na situação de 180° ; (d) maiores variações nas faces a sotavento foram observadas no entorno imediato da abertura, decorrentes da ação do jato de saída ou de recirculações; (e) o mapeamento local do diferencial de pressão indicou uma preponderância da influência dos dispositivos de sombreamento no entorno imediato das aberturas, seja de entrada como de saída, sugerindo a investigação de novas possibilidades de áreas efetivas para a determinação deste parâmetro a ser utilizado em avaliações e/ou estimativas de ventilação natural e, por fim, (f) poucas discrepâncias, entre as tipologias de sombreamento analisadas, foram notadas nas faces laterais.

Com base nestas conclusões, para os ensaios desenvolvidos no LNEC, algumas decisões foram adotadas: (a) redução da quantidade de tomadas de pressão em todas as faces, mantendo-as em maior número a barlavento e a sotavento e, mais discretizadas nas zonas de maior interesse ou nos pontos de possíveis mudanças no padrão de escoamento, ou seja, no entorno imediato das aberturas e nas arestas do modelo; (b) adoção da tipologia com elementos combinados (verticais e horizontal) para ser a base da nova matriz de ensaios a ser desenvolvida, em razão da sua maior complexidade e possibilidade de variação e, assim, mais coerente à utilização do túnel de vento; (c) retirada do ângulo de 180° do intervalo de ensaios e; (d) inclusão da aferição de todas as tipologias não somente no modelo genérico com aberturas, mas também no selado.

Desta forma, partiu-se da tipologia G2B (com elementos de sombreamento horizontal e verticais combinados) para a elaboração da matriz de ensaios do LNEC. A partir desta configuração inicial, variações nas profundidades dos elementos, no seu posicionamento em relação aos limites da abertura e nas suas características geométricas compuseram uma matriz com 13 tipologias, sendo duas de referência, ou seja, sem sombreamentos e, 11 alternativas de protetores, ensaiados em modelo genérico selado e com aberturas.

Os valores de pressão, pós-processados em coeficientes de pressão (C_p) devido ao vento, para todos os cenários avaliados (tipologias e ângulos de incidência de vento) foram investigados, assim como nos ensaios do IPT, a partir de gráficos de contorno das faces barlavento e sotavento, os quais mapearam as distribuições de pressões e indicaram nítidas variações das tipologias com sombreamentos quando comparadas às de referências para as mesmas situações.

O aumento progressivo da profundidade dos elementos de sombreamento, em menores ângulos de incidência do vento, promoveu incrementos também progressivos nos valores das tomadas situadas nas aberturas, identificados, a partir dos ensaios destas tipologias em modelo genérico selado. Para ângulos maiores, a alteração na profundidade dos elementos intensificou a variação de pressão ao longo da largura da face a barlavento, setorizando áreas mais positivas ou menos negativas na região a montante da abertura, devido à concentração de parte do escoamento e, de zonas mais negativas a jusante do vão em razão dos pontos de separação decorrentes da interação dos protetores com o escoamento incidente.

O afastamento dos elementos do limiar da abertura de entrada, possibilitou, ainda em incidências mais oblíquas (45° e 60°), que o escoamento, separado no protetor a montante, recolasse na região da abertura. Esse comportamento pode ser observado a partir das áreas mais positivas indicadas a jusante

da abertura, no seu entorno imediato, e é potencializado pela existência do segundo protetor também nesta região. Assim, o escoamento recém aderido à superfície migra em parte para o interior do modelo e em parte segue sua trajetória em direção à aresta da geometria.

Variações assimétricas resultaram em comportamentos de distribuições distintos para rotações anti-horárias (dispositivos a jusante da abertura) e horárias (protetores a montante do vão) do modelo. Dentre as tipologias categorizadas como simétricas, os exemplares com elementos ocupando a totalidade da altura do vão, proporcionaram maiores concentrações do escoamento (na região da abertura) nas rotações de 0° a 30°. A tipologia com componentes verticais ocupando metade da altura da abertura se mostrou mais permeável nos maiores ângulos de incidência do vento.

Por fim, as geometrias denominadas de complexas, por destoar das demais ao apresentarem elementos locados à frente da abertura, denotaram distribuições de pressões também particulares em suas faces, em especial, a tipologia representativa da estore de correr projetável.

7.2 IMPACTO NA VELOCIDADE MÉDIA RELATIVA (U_{jan}/U_{ref})

Nos ensaios realizados no túnel de vento do LNEC, além das distribuições de pressão na envoltória externa do modelo genérico, para as configurações com aberturas, foram também aferidas as velocidades médias do ar na altura de referência⁸³ e, no centroide da janela a sotavento. Estes valores foram pós-processados no formato de um adimensional de velocidade média relativa, denominado de U_{jan}/U_{ref} .

Este adimensional teve como principal objetivo auxiliar na investigação das taxas de vazão para cada cenário avaliado. A aferição da velocidade média do escoamento na abertura a sotavento pôde ser utilizada para esse fim devido aos princípios de conservação de massa e energia e à caracterização do modelo genérico – duas aberturas de mesma área, dispostas em faces opostas, com máxima área efetiva de ventilação e ambiente interno desobstruído.

Usualmente, em pesquisas de ventilação natural, analisa-se o coeficiente de velocidade média, C_v , principalmente quando a finalidade do uso desta estratégia é o conforto térmico dos usuários nas edificações. De acordo com Aynsley, Melbourne, Vickery (1977), o C_v , é a razão entre as velocidades médias do ar aferidas nos pontos de interesse e de referência⁸⁴. O adimensional U_{jan}/U_{ref} também é um coeficiente indicativo do aproveitamento da ventilação natural, cujo objetivo nesta pesquisa, como já mencionado, foi auxiliar na investigação das taxas de vazão nos cenários avaliados. Deste modo, é válida a ressalva que discrepâncias podem ser identificadas ao confrontar dados de C_v , disponíveis na literatura especializada, com os de U_{jan}/U_{ref} para modelos semelhantes, tais como o modelo genérico sem sombreamentos, sendo estas diferenças decorrentes das variações nos posicionamentos e/ou nas cotas das aferições. Aynsley, Melbourne, Vickery (1977) estudaram o efeito combinado de elementos verticais e horizontais na velocidade do vento e, mesmo com variações nas cotas de aferição⁸⁵ e na geometria dos modelos avaliados, convergências foram identificadas entre os padrões das curvas de C_v às de U_{jan}/U_{ref} no intervalo de incidência de vento comum aos estudos (0° a 90°).

Nesta pesquisa, como o objetivo é mensurar o impacto quantitativo da adoção de dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural, os valores de U_{jan}/U_{ref} para as diferentes tipologias consideradas foram sempre analisados em relação ao modelo genérico com aberturas e sem sombreamentos.

⁸³ Na cota do modelo, em local de escoamento não perturbado pela sua presença.

⁸⁴ Segundo os mesmos autores, a cota de referência pode variar de estudo para estudo, sendo a cota de cobertura ou a da altura da estação meteorológica (10 m), as mais usuais.

⁸⁵ Nos estudos de Aynsley, Melbourne, Vickery (1977), a velocidade média foi aferida no interior do modelo e a velocidade de referência utilizada para a determinação do C_v , a de estação meteorológica (10 m).

De modo geral, para as tipologias caracterizadas por formatos simétricos, incrementos em relação à referência caracterizaram o intervalo de 0° a 30°. Nas tipologias assimétricas essa faixa foi de -15° a 30°. Nas rotações positivas, o protetor se encontra a montante do vão e configura uma barreira ao escoamento. No entanto, a zona de separação originada nesta interação (dispositivo e escoamento), promoveu seu redirecionamento ao interior do modelo, sendo as velocidades médias registradas em ambas as tipologias assimétricas superiores às mesmas situações a -15°.

As incidências mais oblíquas de vento (de 45° a 75°) foram caracterizadas, para todas as tipologias analisadas, por valores de U_{jan}/U_{ref} inferiores à referência. A tipologia G2D, com elementos de sombreamento afastados do limiar da abertura, configurou uma exceção a essa regra na rotação de 45°, ao indicar um impacto positivo, enquanto as demais registravam impacto negativo.

As tipologias complexas, devido as suas geometrias, impuseram maior resistência ao escoamento e registraram decréscimos nos valores de U_{jan}/U_{ref} em relação à referência, independentemente do ângulo de incidência avaliado.

7.3 IMPACTO NA ÁREA DE DETERMINAÇÃO DO DIFERENCIAL MÉDIO DE PRESSÃO EFETIVO (ΔC_p) E DO VALOR DOS COEFICIENTES DE DESCARGA (C_d)

Além da avaliação individual do impacto dos sombreamentos no U_{jan}/U_{ref} , este mesmo adimensional auxiliou na investigação acerca da melhor correlação do diferencial de pressão efetivo e do coeficiente de descarga. Conforme explicado no item 5 (ver Análise dos Resultados), para situações de mesma área de abertura e mesmo diferencial de pressão, a igualdade $U_{jan}/U_{ref} = C_d \sqrt{\Delta C_p}$ é verdadeira. Desta forma, a curva de U_{jan}/U_{ref} foi utilizada para identificar a curva de $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ que melhor descrevia o impacto em cada cenário avaliado.

Baseando-se nos resultados dos ensaios realizados no túnel de vento do IPT, a maior preponderância do impacto dos dispositivos de sombreamento ocorre no entorno imediato das aberturas. Este padrão também foi confirmado nas análises de distribuição de pressão dos cenários ensaiados no LNEC. Assim, optou-se por testar diferentes configurações de áreas para a determinação do diferencial médio de pressão efetivo, totalizando em quatro possibilidades, sendo duas para o modelo genérico selado (ΔC_{pFF} e ΔC_{pFJ}) e, duas outras, para o com aberturas (ΔC_{pAF} e ΔC_{pAA}).

O ΔC_{pFF} e ΔC_{pAF} caracterizaram o diferencial entre os coeficientes médios de pressão das faces barlavento e sotavento para os modelos genéricos selado e com aberturas, respectivamente. Já, o ΔC_{pFJ} e ΔC_{pAA} delinearam outras possibilidades de áreas para o cálculo destas médias. Na primeira, considerou-se as áreas das aberturas do modelo selado e, na segunda, no modelo com aberturas, as áreas configuradas nos seus entornos imediatos. A multiplicação da raiz quadrada destes diferenciais de pressão efetivos por um valor padrão de coeficiente de descarga (0,6) possibilitou a observação, a partir do ajuste de curvas (U_{jan}/U_{ref} e $C_d \sqrt{\Delta C_p}$), da opção que melhor descrevia cada cenário avaliado.

Esse processo revelou outra necessidade de investigação. Embora as curvas apresentassem concordâncias, em maior ou menor grau dependendo da tipologia ensaiada, no intervalo de 0° a 45°, nas demais incidências elas divergiam. Logo, constatou-se que o impacto dos sombreamentos não se limitava à distribuição de pressão na envoltória externa do modelo genérico, mas também influenciava a perda de carga na abertura a barlavento. E esse impacto no valor do coeficiente de descarga era função da tipologia do dispositivo de sombreamento e do ângulo de incidência de vento.

Ao final deste processo, foi possível sugerir diferenciais médios de pressão efetivos e valores de coeficientes de descarga mais adequados para descrever o impacto da adoção dos dispositivos de sombreamento em cada cenário avaliado.

De modo geral, as geometrias com os elementos de maiores profundidades localizadas no limiar da abertura, com os protetores afastados ou promovendo uma barreira ao escoamento (G2B, G2C, G2D, G3A e G3C) foram melhores explicadas pelo diferencial médio de pressão composto pelas áreas das aberturas ($\Delta C_p FJ$). A tipologia G3B, nas rotações anti-horárias, o $\Delta C_p FF$ foi preponderante. Nas demais tipologias, com elementos localizados à frente da abertura (G3G e G3F) ou com maior permeabilidade (G3D) ou escape (G3E) ao escoamento, $\Delta C_p AA$ esteve mais presente dentre as opções.

Quanto aos valores de coeficientes de descarga (C_d), estes variaram nos intervalos de $C_d > 0,6$, $C_d = 0,6$, $0,35 < C_d < 0,6$ e $0,25 < C_d < 0,35$, em função do tipo de sombreamento e orientação do vento incidente.

7.4 IMPACTO NO DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL (Φ)

Tendo conhecimento dos valores mais adequados do parâmetro $C_d \sqrt{\Delta C_p}$ para cada cenário avaliado, buscou-se quantificar o impacto da adoção de valores usuais⁸⁶ nas estimativas e/ou avaliações de um ambiente naturalmente ventilado e dotado de sombreamentos. Assim, determinou-se o fator Φ para cada situação. Este fator é um quociente adimensional e indica o quanto divergem as estimativas de vazão entre um determinado modelo com sombreamento, utilizando-se dos dados apontados como mais adequados, e um modelo selado e com coeficiente de descarga padrão. Logo, o impacto positivo nas taxas de ventilação é indicado por Φ maior ou igual a 1,0 e, o negativo, por $\Phi < 1,0$. Calculados os fatores Φ , suas conclusões foram aplicadas em um exemplo hipotético de projeto e recomendações projetuais foram delineadas.

Assim, esta Tese de Doutorado buscou determinar o impacto quantitativo da adoção de diferentes tipologias de sombreamentos externos no desempenho da ventilação natural em um ambiente genérico. Este dado traz, por consequência, contribuições à comunidade acadêmica, a partir da ampliação da bibliografia acerca desta temática, mas também aos profissionais projetistas e simuladores.

Aos profissionais projetistas, essas contribuições podem garantir dados quantitativos para melhor guiar à tomada de decisões de projeto. Uma problemática de pesquisas na área de ventilação natural é a dependência dos seus resultados ao caso estudado. A força motriz desta estratégia é o diferencial de pressão e em ventilação por indução eólica, principalmente, este é função, dentre outros aspectos, da geometria e, por isso, a importância de estudos genéricos na tentativa de mapear possíveis regras gerais. Ainda que os dados, para modelos diferentes, não possam ser adotados diretamente, as recomendações projetuais tornam as conclusões mais acessíveis ao universo projetual e auxiliam na tradução dos conhecimentos científicos em estratégias.

É urgente uma cultura arquitetônica que priorize o uso de dados quantitativos para delinear soluções acerca do conforto ambiental no processo de projeto. Esse aporte, por vezes evitado ou negligenciado, possibilita ao projetista uma maior flexibilidade de atuação, pode libertá-lo das formas usualmente adotadas e ampará-lo na proposição de novas geometrias e desenhos. Assim, pontos até então limitantes, podem ser transformados em potenciais e, conseqüentemente, alternativas de projeto mais precisas e coerentes podem ser delineadas e, o usuário, beneficiado.

Aos simuladores, os dados aqui apresentados podem possibilitar fatores de correção passíveis de serem aplicados em modelos disponíveis na literatura científica especializada e assim garantir previsões mais realistas. Ademais, podem ser adotados como parâmetros de refino e detalhamento de malhas computacionais para modelos semelhantes com sombreamento, a partir dos quais, outras variações poderão ser investigadas.

⁸⁶ Valores de pressão para geometrias seladas e do coeficiente de descarga padrão para aberturas retangulares.

7.5 TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa permitiu aferir o impacto de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento externos em parâmetros aerodinâmicos, tais como: pressão externa (C_{ps}) e velocidade média relativa do fluxo de ar interno (U_{jan}/U_{ref}).

O conhecimento deste impacto, mensurado a partir de análises experimentais robustas, no desempenho da ventilação natural pode contribuir ao desenvolvimento e ao aprimoramento do processo de projeto arquitetônico integrado, ou seja, que priorize questões referentes ao Conforto Ambiental desde a sua concepção. Ademais, estes dados podem auxiliar no refinamento dos resultados provenientes de avaliações numéricas acerca da ventilação natural em edificações com sombreamentos externos.

Na sequência, diante das limitações e potencialidades identificadas neste trabalho, listam-se algumas sugestões de investigações futuras:

- Avaliação do impacto dos dispositivos de sombreamento propostos no comportamento e na distribuição do fluxo de ar.
- Avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento locados de modo afastado da fachada no desempenho da ventilação natural.
- Avaliações acerca do impacto dos dispositivos de sombreamento externos propostos nos desempenhos lumínico, térmico ou na eficiência energética de um modelo genérico ou ambiente.
- Avaliação do impacto dos dispositivos de sombreamento propostos no desempenho da ventilação natural em modelo genérico com a presença de entorno.

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**; v. 20; n.6: p.649–660, 2011.
- AKAMINE, Y., KURABUCHI, T.; OHBA, M: A CFD analysis of the airflow characteristics at inflow openings, **International Journal of Ventilation**, 2, 2004.
- ALLARD, F. **Natural ventilation in buildings**: a design handbook. London: James & James. 2002.
- ALLARD, F.; GHIAUS, C.; MANSOURI, Y. Natural ventilation for health, comfort and energy efficiency. In: VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e III Conferência Latino-americana sobre Conforto e Desempenho Térmico de Edificações, 2003, Curitiba/ PR. **Anais...** Curitiba/ PR: ANTAC, 2003.
- ALMEIDA, F. S.; RIBEIRO, R. M.; SCALCO, V. A.; FOSSATI, M.; ORDENES, M. Análise do uso de aplicativo virtual para estudo de ventilação natural em ambientes internos. In: ENTAC 2020 - FUTURO DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO E OS DESAFIOS GLOBAIS 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020.
- AMINI, R.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; BERARDI, U. Numerical investigation of indoor thermal comfort and air quality for a multi-purpose hall with various shading and glazing ratios. **Thermal Science and Engineering Progress** v. 22, p. 100812, 2020. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100812.
- 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) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP), São Carlos, 2016.
- ARMIT, J.; COUNIHAN, J. The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel. **Atmospheric Environment**, v.2, p. 49-71, 1968.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook of Fundamentals**. Atlanta, 2001.
- ATKINS, R. E., PETERKA, J. A.; CERMAK J. E. Averaged pressure coefficients for rectangular buildings, Wind Engineering, **Proceedings of the Fifth International Conference** 7:369-80, Fort Collins, CO. Pergamon Press, NY,1979.
- AYNSLEY, R. M. Shape and Flow: The essence of architectural aerodynamics. **Architectural Science Review**, v. 42, p. 69–74, 1999. DOI: 10.1080/00038628.1999.9696854.
- AYNSLEY, R. M.; MELBOURNE, W.; VICKERY, B. J. **Architectural Aerodynamics**. London: Applied Science Publishers LTD, 1977.
- BACICHETI, R.; CARDOSO, L.; SARDEIRO, P. Desempenho geométrico de um *brise soleil*: um estudo sobre seu impacto na iluminação e ventilação natural. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção 2016, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ANTAC, 2016.
- BAYRAKTAR, N. T.; OK, V. Numerical evaluation of the effects of different types of shading devices on interior occupant thermal comfort using wind tunnel experimental data. **Building Simulation**, v. 12, n. 4, p. 683–696, 2019. DOI: 10.1007/s12273-019-0551-3.
- 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.
- BISTAFA, S. R. **Mecânica dos Fluidos**: Noções e aplicações [livro eletrônico]. São Paulo: Blucher, 2018.

- BITTENCOURT, L. e CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2008.
- BITTENCOURT, L. **O uso das cartas solares: Diretrizes para arquitetos**. Maceió: EDUFAL, 2004.
- 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.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 1a.edição ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, UFRGR e CNPq, 1983.
- BLOCKEN, B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 129, p. 69-102, 2014. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.03.008.
- BRE, F.; GIMENEZ, J. M.; FACHINOTTI, V. D. Prediction of wind pressure coefficients on building surfaces using artificial neural networks. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1429–1441, 2018. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.11.045.
- BRUAND, Y. **Arquitetura contemporânea no Brasil**. 4ª. Edição. São Paulo: Editora Perspectiva, 2005.
- BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. Principles of natural ventilation. BRE Digest n. 210. BRE, Garston, 1978 – *Apud* Bittencourt e Cândido, 2008.
- 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.
- 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.
- CHANDRASHEKARAN, D. **Air flow through louvered openings: Effect of louver slats on air movement inside a space**. Master of Building Science. Faculty of USC School of Architecture. University of Southern California, 2010.
- 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.
- CHEN, Y.; TONG, Z.; MALKAWI, A. Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations. **Building and Environment**, v. 122, p. 386–396, 2017. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.06.026.
- 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. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação**. Dissertação (Mestrado – Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- 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.

- CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; OHBA, M.; HENSEN, J.L.M. 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.
- COUNIHAN, J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. **Atmospheric Environment**, v.3, p. 197-214, 1969.
- CRUZ, H.; VIEGAS, J. C. On-site assessment of the discharge coefficient of open windows. **Energy and Buildings**, v. 126, p. 463–476, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.05.051.
- 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.
- EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **EnergyPlus**. Version 9.5.0. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2021a. Disponível em: < <https://energyplus.net/downloads>>. Acesso em: 23/abril/2021.
- EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Input-Output Reference**: the encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. Version 9.5.0. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2021b. Disponível em: < <https://energyplus.net/documentation>>. Acesso em: 23/abril/2021.
- ELSHAFEI, G.; NEGM, A.; BADY, M.; SUZUKI, M.; IBRAHIM, M. G. Numerical and experimental investigations of the impacts of window parameters on indoor natural ventilation in a residential building. **Energy and Buildings**, v. 141, p. 321–332, 2017. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.02.055.
- ENDO, T.; KURABUCHI, T.; OHBA, M: A fundamental study of the airflow structure of outflow openings, **International Journal of Ventilation**, 2, (4), pp439-446, 2004.
- 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. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia / IAU) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP), São Carlos, 2016.
- FERNANDES, L.; FRIEDRICH, M.; CÓSTOLA, D.; MATSUMOTO, E.; LABAKI, L.; WELLERSHOFF, F. Evaluation of discharge coefficients of large openable windows using full-scale samples in wind tunnel tests. **Revista Ingeniería de Construcción**, v.35, n.2, p. 203-214.
- FORTUNA, A. de O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos**. 2a. edição ed. São Paulo: EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo, 2012.
- FOX, R.W; McDONALD, A. T; PRITCHARD, P.J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8ed.- Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- FREEWAN, A. A. Y. Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. **Solar Energy**, v. 102, p. 14–30, 2014.
- FREIXANET, V. A. F.; VIQUEIRA. **Clima y arquitectura**. México: UAM, 2004.
- 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.
- GIMENEZ, J. M.; BRE, F. Optimization of RANS turbulence models using genetic algorithms to improve the prediction of wind pressure coefficients on low-rise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 193, 2019. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.103978.

GIMENEZ, J. M.; BRE, F.; NIGRO, N. M.; FACHINOTTI, V. Computational modeling of natural ventilation in low-rise non-rectangular floor-plan buildings. **Building Simulation**, v. 11, n. 6, p. 1255–1271, 2018. DOI: 10.1007/s12273-018-0461-9.

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

GONÇALVES, J.C.S.; VIANNA, N.S.; MOURA, N.C.S. **Iluminação Natural e Artificial**. Rio de Janeiro: PROCEL EDIFICA, 2011.

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, 2011.

HOLANDA, A. **Roteiro para Construir no Nordeste**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 1976.

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.

IRWIN, H.P.A.H. The design of spires for wind simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.7, p. 361-366, 1981.

JENSEN, J.T.; HEISELBERG, P.; NIELSEN, P.V: Numerical prediction of natural ventilation by means of CFD, In: Roomvent 2002, Copenhagen, 2002b, Denmark, **Proceedings...**Denmark: ROOMVENT, 2002b.

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.

JIANG, F.; LI, Z.; ZHAO, Q.; TAO, Q.; YUAN, Y.; LU, S. Flow field around a surface-mounted cubic building with louver blinds. **Building Simulation**, v. 12, p. 141–151, 2019. DOI: 10.1007/s12273-018-0493-1.

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., ATHIENTIS, A.K. Airflow assessment in cross- ventilated buildings with operable façade elements. **Build. Environ.**46, 266–279., 2011.

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENTIS, A. K. Wind Driven Flow through Openings – A Review of Discharge Coefficients. **International Journal of Ventilation**, v. 3, n. 3, p. 255–266, 2004. DOI: 10.1080/14733315.2004.11683920.

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.

KOSUTOVA, K.; VAN HOOFF, T.; VANDERWEL, C.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. Cross-ventilation in a generic isolated building equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations. **Building and Environment**, v. 154, p. 263–280, 2019. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.03.019.

KOTANI, H.; YAMANAKA, T. Wind pressure coefficient and wind velocity along building wall of apartment building with balcony. In: International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings, Sendai, Japan. **Anais...** Sendai, Japan: IAQVEC, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237295413>.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; LABAKI, L. C.; PINA, S. M. G.; BERTOLLI, S. R. A visualização do conforto ambiental no projeto arquitetônico. IN: VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1998, Florianópolis/SC. **Anais...** Florianópolis/SC:ANTAC, 1998.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; GONÇALVES PINA, S. A. M.; DAMASO, G. M.; FILHO, F. B.; Aspectos de Conforto Ambiental de descrições de espaços construídos na Literatura Brasileira, 11/2003, Encac- Cotedi 2003 (Int) VII Encontro Nacional Sobre Conforto no ambiente Construído e II Conferência Latino-Americana Sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações, Vol. 1, pp.1333-1340, Curitiba, PR, Brasil, 2003.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; LABAKI, L. C.; PINA, S. M. G.; GUTIERRES, G. C. R. e GOMES, V.S. The Challenges of Teaching bioclimatic architectural design, IN: International Conference: Passive and low energy cooling for the built environment, 2005, Santorini, Grécia, **Anais...Santorini**, Grécia, 2005.

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.

KURABUCHI, T.; OHBA, M.; ENDO, T.; AKAMINE, Y.; NAKAYAMA F.: Local dynamic similarity model of cross ventilation part 1 – theoretical framework, **International Journal of Ventilation**, 2, (4), pp371-382, 2004.

KURABUCHI, T.; OHBA, M.; FUGO, Y.; ENDON, T. Local similarity model of cross ventilation: part 1 modelling and validation. In: Roomvent 2002, Copenhagen, 2002b, Denmark, **Proceedings...Denmark: ROOMVENT**, 2002.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos INMET 2018**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2018.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **A Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª.ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL EDIFICA, 2014.

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, D. S.; KIM, S. J.; CHO, Y. H.; JO, J. H. Experimental study for wind pressure loss rate through exterior venetian blind in cross ventilation. **Energy and Buildings**, v. 107, p. 123–130, 2015. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.08.018.

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.

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

LIN, H.; XIAO, Y.; ZHAN, Q. Research on the Impact on Building Temperature and Ventilation by Outdoor Shading Devices in Hot Humid Area: Through Measurement and Simulation on an Office Building in Guangzhou. **International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering**. v.11, n.7, 2017. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10.5281/zenodo.1131748>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/323365564>.

LOCHE, Í. M. C. F. W.; OLIVEIRA, K. P. De; OLIVEIRA, M. D.; FRACALANZA, B. C.; NEVES, L. O. Effects of Balconies on the Wind Pressure Coefficients of Naturally Ventilated High-Rise Office Buildings. In: SYMPOSIUM ON SIMULATION IN ARCHITECTURE +URBAN DESIGN. SIMAUD2020 2020, **Anais [...]**: Society for Modeling & Simulation International (SCS) 365, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/341657819>.

MACIEL, L.; OLIVEIRA, M.; BARBOSA, S.; CARLO, J.; TIBIRIÇÁ, A. Influence of application of accurate airflow resistance on openings with different configurations of shading devices on the building thermal performance. In: PLEA 2017 Edinburgh Design to Thrive 2017, Edinburgh. **Anais [...]**. Edinburgh: PLEA, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/319085697>.

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

MARQUES DA SILVA, F. Parte 1- Acções que promovem a ventilação natural. In: PATRÍCIO, J.; SANTOS, A. (org.). **Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos**. 2a. Edição ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2004. p. 463.

MARQUES DA SILVA, F. V. **Ventilação natural de edifícios: turbulência atmosférica**. Lisboa, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2003.

MATHAN KANNAN, K.; NAGARAJAN, Dr R. V.; DHANALAKSHMI, M. Influence of External Concrete Shading Devices on Internal Airflow Pattern Through Windows. **International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)**, [S. l.], v. 9, n. 8, p. 1555–1563, 2018. Disponível em: <http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp1555http://www.iaeme.com/ijciyet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=8http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=8>.

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.

MELARAGNO, M. **Wind in architectural design**. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1982.

MELIKOV, A. K. COVID-19: Reduction of airborne transmission needs paradigm shift in ventilation. **Building and Environment**, [S. l.], v. 186, p. 19–21, 2020. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107336.

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

MONTEIRO, L. M.; BITTENCOURT, L.; YANNAS, S. Arquitetura da Adaptação. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. (org.). **Edifício Ambiental**. 1a.Edição ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MORBITZER, C.A. **Towards the Integration of Simulation into the Building Design Process**. Thesis; University of Strathclyde, Energy System Research Unit, Department of Mechanical Engineering; 2003.

MUNDHE, P.; DAMLE, R. M. A methodology for quantifying flow patterns in a water-table apparatus for naturally ventilated buildings. **Architectural Science Review**, 2020. DOI: 10.1080/00038628.2020.1733482.

MUNDHE, P.; DAMLE, R. M.; VAIDYA, P.; APTE, M. G. Quantification of Airflow Patterns in a Naturally Ventilated Building Simulated in a Water Table Apparatus. In: PLEA 2018 - SMART AND HEALTHY WITHIN THE 2-DEGREE LIMIT 2018, Hong Kong. **Anais [...]**. Hong Kong: PLEA 2018, 2018. p. 19–24.

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, **Anais**. 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.

- NISHIZAWA, S.; SAWACHI, T.; NARITA, K.; SETO, N.; ISHIKAWA, Y. A wind tunnel full-scale building model comparison between experimental data and CFD results based on standard k- ϵ turbulence representation, **International Journal of Ventilation**, 2, (4), pp419-430, 2004.
- OHBA, M.; KURABUCHI, T., ENDO, T., AKAMINE, Y., KAMATA, M.; KURAHASHI, A: Local dynamic similarity model of cross ventilation part 2 - application of local dynamic similarity model, **International Journal of Ventilation**, 2, (4), pp383- 393, 2004.
- OHBA, M.T.Y.; KURABUCHI, T.; ENDON T. Local similarity model of cross ventilation: part 2 application. In: Roomvent 2002, Copenhagen, 2002, Denmark, **Proceedings...Denmark: ROOMVENT**, 2002.
- OLGYAY, A.; OLGAYAY, V. **Solar control & Shading devices**. New Jersey: Princeton University Press, 1957.
- OLGYAY, V. **Arquitetura y Clima**. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A., 1988.
- 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.
- ORME, M.; LIDDAMENT, M.W.; WILSON, A. **Numerical data for air infiltration and natural calculations**. UK: AIVC, 1998.
- PASSOS, I. C. S.; LAMENHA, M.; BITTENCOURT, L. Análise de pressões externas em edifício residencial multifamiliar para fins de ventilação natural. In: XIV ENCAC (ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO) E X ELACAC (ENCONTRO LATINO - AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO) 2017, Balneário de Camburiu. **Anais [...]**. Balneário de Camburiu: ANTAC, 2017. p. 1007–1015.
- 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.
- QUADROS, B. M. De; ORDENES, M. O Impacto de brises na ventilação natural: avaliação integrada em uma enfermaria em Florianópolis (SC). **Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, [S. l.], n. 19, 2017. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n19.2017.07.
- RAMOS, K. M.; MATTIA, P. H. S.; LUKIANTCHUKI, M. A. Sheds extratores e captadores de ar: análise da influência da geometria através de ensaios analógicos em mesa d'água. In: XIV ENCAC (ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO) E X ELACAC (ENCONTRO LATINO - AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO) 2017, Balneário de Camburiu. **Anais [...]**. Balneário de Camburiu: ANTAC, 2017. p. 554–563.
- RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: Validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects. **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.
- RIVERO, R. **Arquitetura e Clima**. Condicionamento Térmico Natural. Porto Alegre: Luzzato, 1985.
- ROFAIL, A.W.; KNOW, K.C.S. The effect of sunshading elements on cladding pressures. In: 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen. **Anais...Copenhagen: ICWE**, 1999.
- RORIZ, M. **Arquivos climáticos de municípios brasileiros**. São Carlos: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2012.

ROSSI, M. M.; OLIVEIRA FAVRETTTO, A. P.; GRASSI, C.; DECAROLIS, J.; CHO, S.; HILL, D.; CHVATAL, K. M. S.; RANJITHAN, R. Metamodels to assess the thermal performance of naturally ventilated, low-cost houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 204, 2019. b. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109457.

ROSSI, M. M.; VALE, F. I.; SHIMOMURA, A. P. R.; CHVATAL, K. M. S. A mesa d'água como ferramenta de apoio para a caracterização de um modelo genérico a ser ensaiado em túnel de vento. **Revista IPT | Tecnologia e Inovação**, v. 2, n. 10, p. 70–80, 2019. a.

ROSSI, M. M.; VALE, F. I.; SHIMOMURA, A. R. P.; CHVATAL, K.M.S. Desenvolvimento de modelo genérico para avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento na ventilação natural. In: 5° Congreso Sudamericano de Simulación de Edificios, 2018, Valparaíso. **Anais...5° Congreso Sudamericano de Simulación de Edificios**, 2018.

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) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP), São Carlos, 2016.

SACHT, H.; BRAGANÇA, L.; ALMEIDA, M.; CARAM, R. Study of Natural Ventilation in wind Tunnels and Influence of the Position of Ventilation Modules and Types of Grids on a Modular Façade System. **Energy Procedia**, v.96, p. 953–964, 2016. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.173.

SAKIYAMA, N. R. M.; CARLO, J. C.; FRICK, J.; GARRECHT, H. Perspectives of naturally ventilated buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, p. 109933, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109933. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032120302240>.

SANTAMOURIS, M. Prediction Methods. In: ALLARD, F. (Ed.). **Natural Ventilation in Buildings**. London: James X James. Prediction Methods, p.63 – 156 , 2002.

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**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SANTOS, A.J. Parte I: A iluminação natural. In: PATRÍCIO, J.; SANTOS; A. (org.). **Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos**. 2a.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2004. p. 463.

SAWACHI, T. Detailed observation of cross ventilaton and air flow through large openings by full scale building model in wind tunnel. In: Roomvent 2002, Copenhagen, 2002b, Denmark, **Proceedings...Denmark: ROOMVENT**, 2002.

SAWACHI, T.; NARITA, K; KIYOTA, N., SETO, H., NISHIZAWA, S.; ISHIKAWA, Y: Wind pressure and airflow in a full-scale building model under cross ventilation, **International Journal of Ventilation**, 2, (4), pp343-357, 2004.

SHIRZADI, M.; MIRZAEI, P. A.; NAGHASHZADEGAN, M. Development of an adaptive discharge coefficient to improve the accuracy of cross-ventilation airflow calculation in building energy simulation tools. **Building and Environment**, v. 127, p. 277–290, 2018. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.10.019.

STATHOPOULOS, T.; ZHU, X. Wind pressure on buildings with appurtenances. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 31, p. 265-281, 1968.

SUN, N.; CUI, Y.; JIANG, Y.; LI, S. Lighting and ventilation-based building sun-shading design and simulation case in cold regions. **Energy Procedia**, v.152, p. 462–469, 2018. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.09.254.

SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow, **ASHRAE Transactions** 94, 1988, p. 243-266.

SZOKOLAY, S. V. **Introdução à ciência arquitetônica: a base do projeto sustentável**. 1a. edição ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 2019.

TABLADA, A.; CARMELIET, J.; ZURICH, E.; BAELMANS, M.; LEUVEN, K. U. Exterior Louvers as a Passive Cooling Strategy in a Residential Building: Computational fluid dynamics and building energy simulation modelling. In: PLEA 2009, 2009, Quebec, Canadá. **Anais [...]**. Quebec, Canadá: PLEA, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/242311739>.

TOLEDO, A. M. **Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos:** uma aplicação em Maceió/AL. Tese (Doutorado Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TOLEDO, A. M.; PEREIRA, F. O. P. Natural ventilation due to wind action: practice knowledge against experimental airflow visualization. In: PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT 2005, Santorini, Grécia. **Anais [...]**. Santorini, Grécia p. 1009–1014.

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.

TPU - TOKYO POLYTECHNIC UNIVERSITY. **Aerodynamic Database for Low-rise Buildings**. 2007. Disponível em: http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise. Acesso em: 1 abr. 2021.

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

VALLIS, M. B.; LOREDO-SOUZA, A. M.; WATRIN, L. C. A review of Brazilian wind data. In: AMERICAS CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 13. , Gainesville, Florida, USA. **Proceedings...** Gainesville: ACWE, 2017.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B.; TOMINAGA, Y. On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. **Building and Environment**, v. 114, p. 148–165, 2017. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.12.019.

VAN MOESEKE, G.; BRUYÈRE, I.; DE HERDE, A. Impact of control rules on the efficiency of shading devices and free cooling for office buildings. **Building and Environment**, v. 42, n. 2, p. 784–793, 2007. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.09.015.

VETTORAZZI, E.; SACHT, 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.

WESTPHAL, F. S. Simulação da ventilação natural com o Energyplus: incertezas nos dados climáticos. In: XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais. 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

XAVIER, A. C. de A.; GULARTE, I. H.; MIZGIER, M. O.; LUKIANTCHUKI, M. A. Visualização da ventilação natural em ensaios na mesa d'água comparado a simulações computacionais. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 11, p. e020020, 2020. DOI: 10.20396/parc.v11i0.8656954. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8656954>. Acesso em: 5 maio. 2021.

YI, Q.; LI, H.; WANG, X.; ZONG, C.; ZHANG, G. Numerical investigation on the effects of building configuration on discharge coefficient for a cross-ventilated dairy building model. **Biosystems Engineering**, v. 182, p. 107–122, 2019. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.04.003.

ZHENG, J. W.; TAO, Q. H.; LI, L. Study of influence of shading louvers on wind characteristics around buildings under different wind directions. In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE 2019, **Anais [...]**. Institute of Physics Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/238/1/012031.

ZHENG, J.; TAO, Q.; LI, L. Numerical study of wind environment of a low-rise building with shading louvers: sensitive analysis and evaluation of cross ventilation. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, p. 1–18, 2020 b. DOI: 10.1080/13467581.2020.1758113.

ZHENG, J.; TAO, Q.; LI, L. Wind pressure coefficient on a multi-storey building with external shading louvers. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 3, 2020 a. DOI: 10.3390/app10031128.

ANEXOS

ANEXO A

NBR 6123 – VELOCIDADE NORMALIZADA S_2 e INTERVALO DE TEMPO

Tabela 44: Parâmetros $b, p, F_{r,H}$

Categoria	t (s)	3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
I	b	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
	p	0,06	0,065	0,07	0,075	0,075	0,08	0,085	0,085	0,09	0,095	0,095	0,10
II	b	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	p	0,085	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,12	0,125	0,135	0,145	0,15	0,16
	F_r	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,72	0,69	0,65
III	b	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85
	p	0,10	0,105	0,115	0,125	0,13	0,14	0,145	0,15	0,16	0,175	0,185	0,20
IV	b	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,80	0,79	0,76	0,73	0,71	0,68
	p	0,12	0,125	0,135	0,145	0,15	0,16	0,17	0,175	0,195	0,215	0,23	0,25
V	b	0,74	0,73	0,71	0,70	0,69	0,67	0,64	0,62	0,58	0,53	0,50	0,44
	p	0,15	0,16	0,175	0,185	0,19	0,205	0,22	0,23	0,255	0,285	0,31	0,35

Fonte: ABNT (1988).

APÊNDICES

APÊNDICE A

ENSAIOS EM MESA D'ÁGUA: CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA DA ÁGUA

Após a finalização dos ensaios em mesa d'água, realizaram-se aferições, sem a presença do modelo reduzido, para determinar a velocidade média da água. Com o auxílio de um cubo de isopor de aresta de 1 cm, registrou-se o tempo que o mesmo levava para percorrer o comprimento total da base de ensaio (1,10 m). Após 20 capturas de tempo, aplicou-se a equação ($V_{média} = \Delta s / \Delta t$) aos dados obtidos e as velocidades médias (m/s) correspondentes foram determinadas (Tabela 45). A média das velocidades médias calculadas foi de 0,25 m/s, sendo o desvio padrão da amostra de $\pm 0,021$.

Tabela 45: Cálculo da velocidade média [m/s] da água nos ensaios realizados na mesa d'água do IAU-USP.

TOMADA	TEMPO [s]	COMPRIMENTO DA BASE DE ENSAIO [m]	VELOCIDADE [m/s]
1	4,98		0,22
2	4,93		0,22
3	4,40		0,25
4	4,12		0,27
5	4,58		0,24
6	5,39		0,20
7	4,70		0,23
8	4,44		0,25
9	4,28		0,26
10	4,40	1,10	0,25
11	3,55		0,31
12	4,24		0,26
13	4,42		0,25
14	4,24		0,26
15	4,37		0,25
16	4,71		0,23
17	4,36		0,25
18	4,16		0,26
19	4,41		0,25
20	4,48		0,25

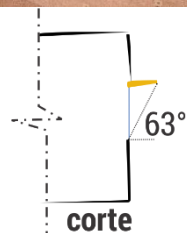
Fonte: A autora (2018).

APÊNDICE B

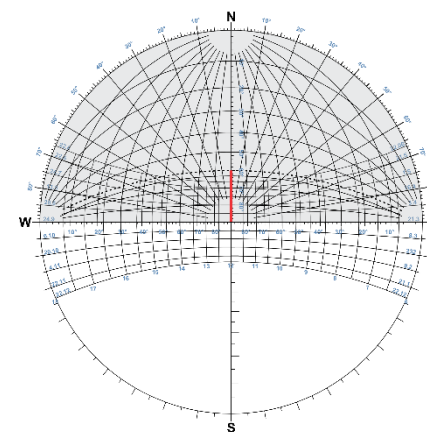
MÁSCARAS DE SOMBRA: DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO ENSAIADAS NOS TÚNEIS DE VENTO DO IPT E DO LNEC (continua).

Tabela 46: Máscaras de sombra das tipologias de dispositivos de sombreamento ensaiadas nos túneis de vento do IPT e LNEC (continua).

TIPOLOGIA G2A – ENSAIOS IPT

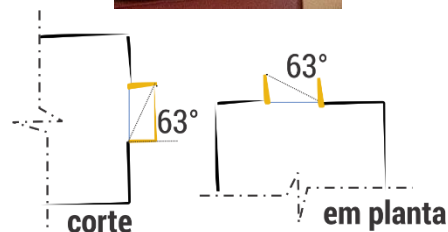


modelo em corte | $\alpha = 63^\circ$

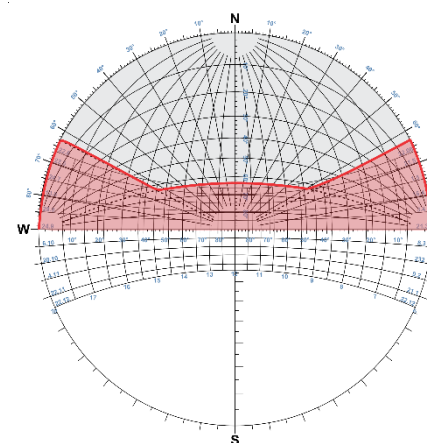


Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

TIPOLOGIA G2B – ENSAIOS IPT



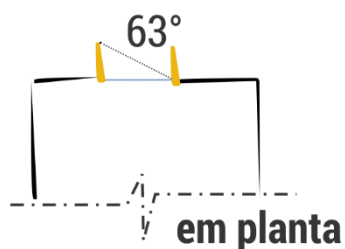
modelo em corte e em planta | $\alpha = 63^\circ$ | $\beta_e = \beta_d = 63^\circ$



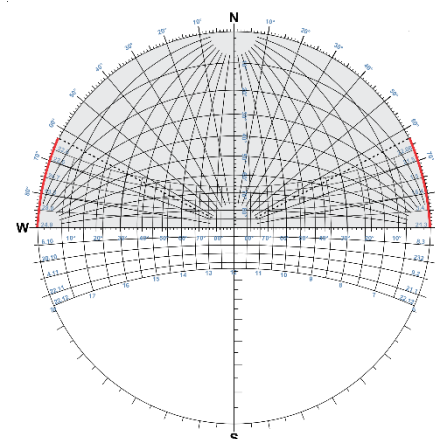
Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

Fonte: Elaborado pela Autora (2020) com base em FROTA (2004); BITTENCOURT (2004); LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (2014); OLGAY; OLGAY (1957).

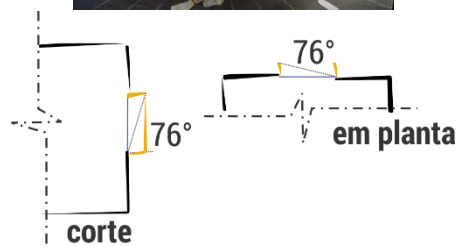
Tabela 46: Máscaras de sombra das tipologias de dispositivos de sombreamento ensaiadas nos túneis de vento do IPT e LNEC (continua).

TIPOLOGIA G2C – ENSAIOS IPT

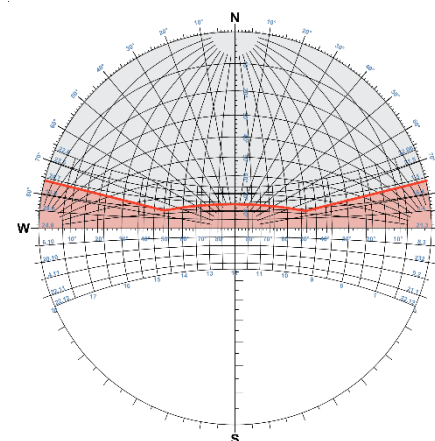
modelo em corte e em planta | $\beta_e = \beta_d = 63^\circ$



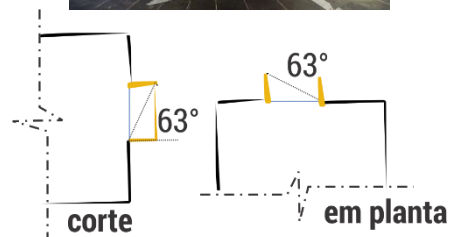
Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

TIPOLOGIA G2A – ENSAIOS LNEC

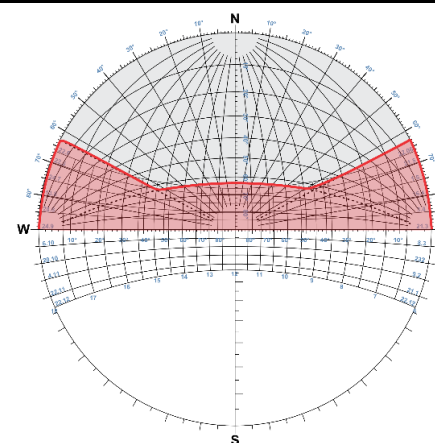
modelo em corte | $\alpha = 76^\circ$ | $\beta_e = \beta_d = 76^\circ$



Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

TIPOLOGIA G2B – ENSAIOS LNEC

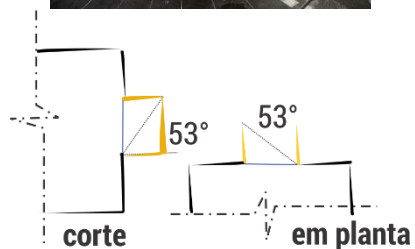
modelo em corte e em planta | $\alpha = 63^\circ$ | $\beta_e = \beta_d = 63^\circ$



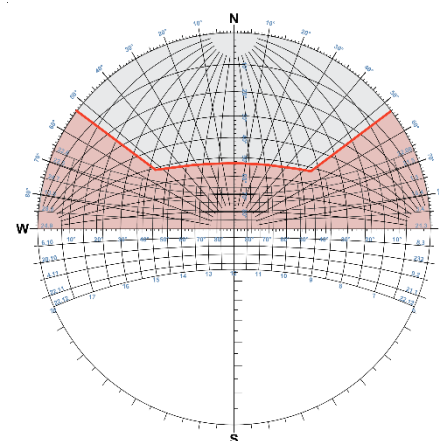
Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

Fonte: Elaborado pela Autora (2020) com base em FROTA (2004); BITTENCOURT (2004); LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (2014); OLGAY; OLGAY (1957).

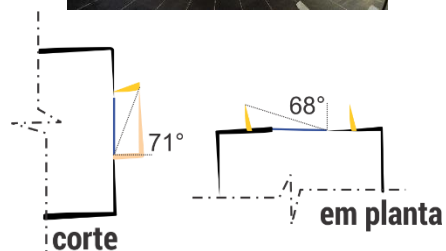
Tabela 46: Máscaras de sombra das tipologias de dispositivos de sombreamento ensaiadas nos túneis de vento do IPT e LNEC (continua).

TIPOLOGIA G2C – ENSAIOS LNEC

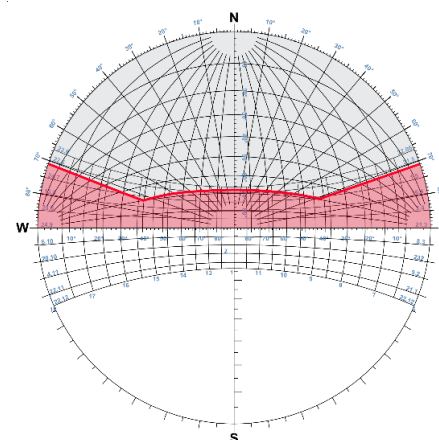
modelo em corte e em planta | $\alpha = 53^\circ$ | $\beta_e = \beta_d = 53^\circ$



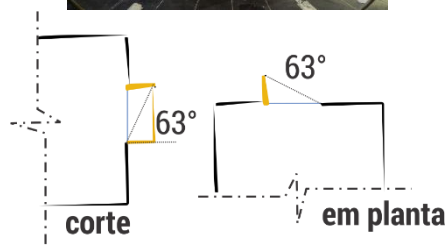
Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

TIPOLOGIA G2D – ENSAIOS LNEC

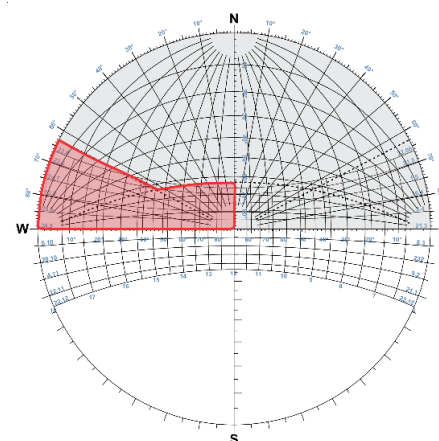
modelo em corte e em planta | $\alpha = 71^\circ$ | $\beta_e = \beta_d = 68^\circ$



Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

TIPOLOGIA G3A – ENSAIOS LNEC

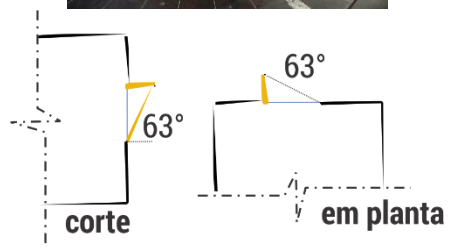
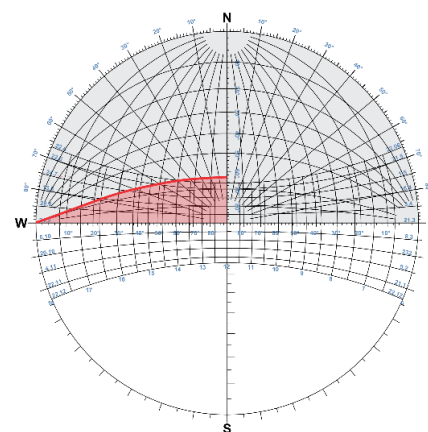
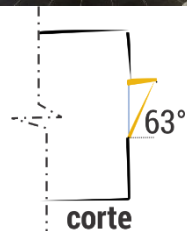
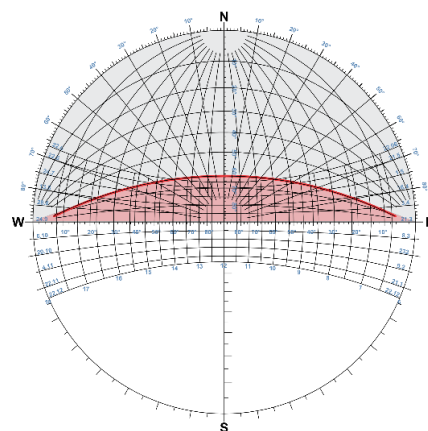
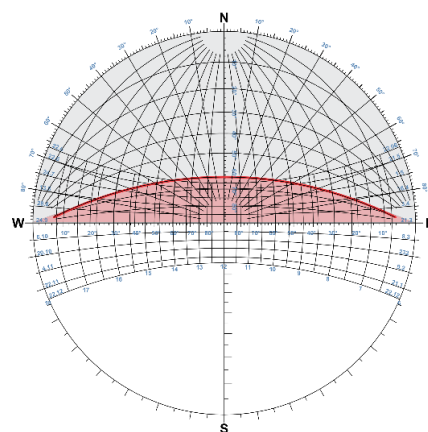
modelo em corte e em planta | $\alpha = 63^\circ$ | $\beta_e = 63^\circ$



Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

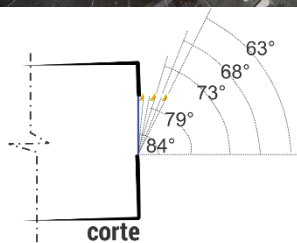
Fonte: Elaborado pela Autora (2020) com base em FROTA (2004); BITTENCOURT (2004); LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (2014); OLGAY; OLGAY (1957).

Tabela 46: Máscaras de sombra das tipologias de dispositivos de sombreamento ensaiadas nos túneis de vento do IPT e LNEC (continua).

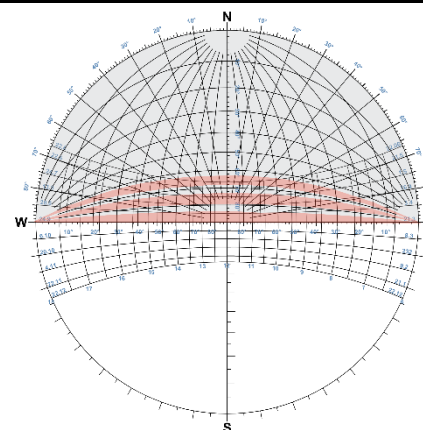
TIPOLOGIA G3B- ENSAIOS LNECmodelo em corte e em planta | $\beta_e = 63^\circ$ Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL**TIPOLOGIA G3C - ENSAIOS LNEC**modelo em corte | $\alpha = 63^\circ$ Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL**TIPOLOGIA G3D- ENSAIOS LNEC**modelo em corte e em planta | $\alpha = 63^\circ$ Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

Fonte: Elaborado pela Autora (2020) com base em FROTA (2004); BITTENCOURT (2004); LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (2014); OLGAY; OLGAY (1957).

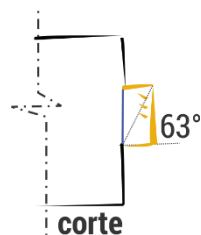
Tabela 46: Máscaras de sombra das tipologias de dispositivos de sombreamento ensaiadas nos túneis de vento do IPT e LNEC (conclusão).

TIPOLOGIA G3E- ENSAIOS LNEC

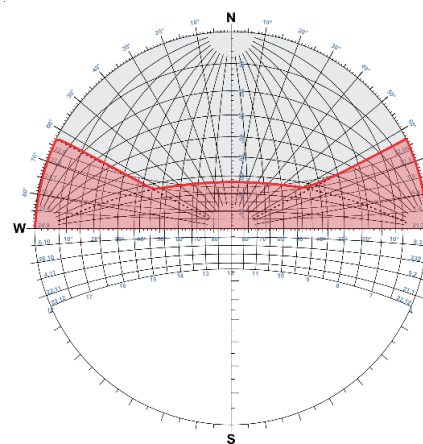
modelo em corte | $\alpha_1 = 84^\circ$, $\alpha_2 = 79^\circ$, $\alpha_3 = 73^\circ$, $\alpha_4 = 68^\circ$ e $\alpha_5 = 63^\circ$



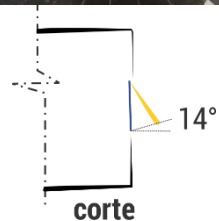
Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

TIPOLOGIA G3F - ENSAIOS LNEC

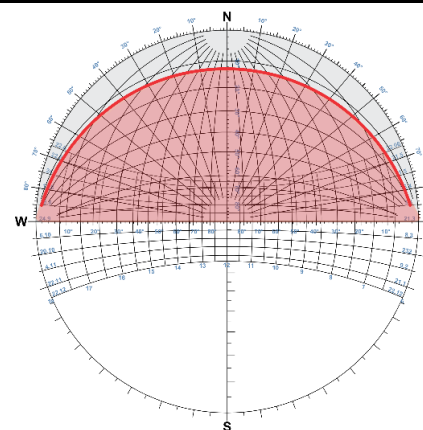
modelo em corte | $\alpha = 63^\circ$



Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

TIPOLOGIA G3G- ENSAIOS LNEC

modelo em corte | $\alpha = 14^\circ$



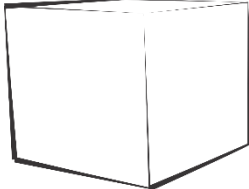
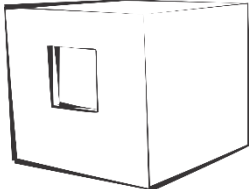
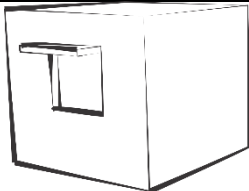
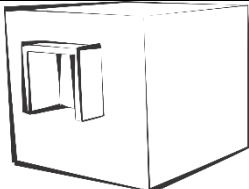
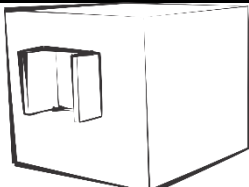
Carta solar (0°) e máscara de sombra correspondente
CINZA: PROTEÇÃO PARCIAL | VERMELHO: PROTEÇÃO TOTAL

Fonte: Elaborado pela Autora (2020) com base em FROTA (2004); BITTENCOURT (2004); LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (2014); OLGAY; OLGAY (1957).

APÊNDICE C

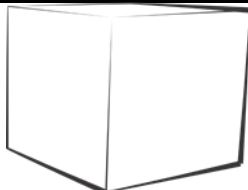
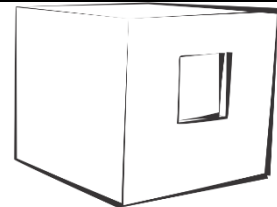
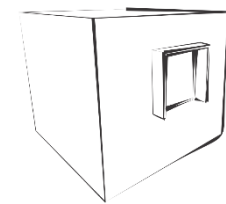
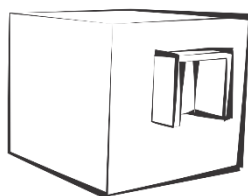
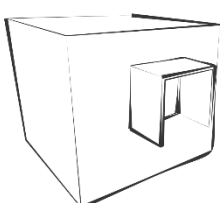
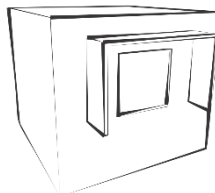
DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO: DESCRIÇÕES DAS TIPOLOGIAS ENSAIADAS NOS TÚNEIS DE VENTO DO IPT E DO LNEC

Tabela 47: Descrição das tipologias ensaiadas no túnel de vento do IPT.

DESCRIÇÃO DAS TIPOLOGIAS ENSAIADAS NO TÚNEL DE VENTO DO IPT	
G1: REFERÊNCIAS	 <p>G1A: Modelo genérico selado e sem sombreamentos.</p>
	 <p>G1B: Modelo genérico com aberturas e sem sombreamentos.</p>
G2: CARACTERÍSTICAS	 <p>G2A: Modelo genérico com aberturas e com dispositivo horizontal localizado no limiar da abertura a barlavento com profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo.</p>
	 <p>G2B: Modelo genérico com aberturas e com dispositivos verticais e horizontal localizados no limiar da abertura a barlavento com profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo.</p>
	 <p>G2C: Modelo genérico com aberturas e com dispositivos verticais localizados no limiar da abertura a barlavento com profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo.</p>

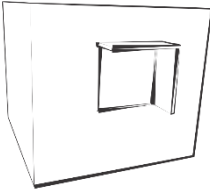
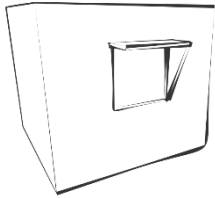
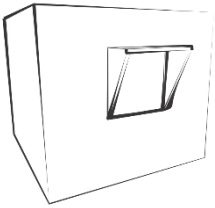
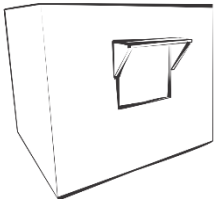
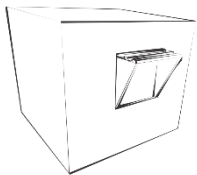
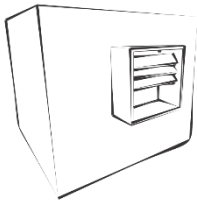
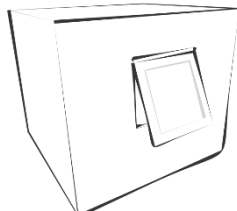
Fonte: A Autora (2021).

Tabela 48: Descrição das tipologias ensaiadas no túnel de vento do LNEC.

DESCRÇÃO DAS TIPOLOGIAS ENSAIADAS NO TÚNEL DE VENTO DO LNEC	
G1: REFERÊNCIAS	 <p>G1A: Modelo genérico selado e sem sombreamentos</p>
	 <p>G1B: Modelo genérico com aberturas e sem sombreamentos</p>
G2: CARACTERÍSTICAS: PROFUNDIDADE	 <p>G2A: Modelo genérico selado ou com aberturas com dispositivos verticais e horizontal localdos no limiar da abertura a barlavento com profundidades equivalentes a 0,25 m no protótipo.</p>
	 <p>G2B: Modelo genérico selado ou com aberturas com dispositivos verticais e horizontal localdos no limiar da abertura a barlavento com profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo.</p>
	 <p>G2C: Modelo genérico selado ou com aberturas com dispositivos verticais e horizontal localdos no limiar da abertura a barlavento com profundidades equivalentes a 0,75 m no protótipo.</p>
G2: CARACTERÍSTICAS:	 <p>G2D: Modelo genérico selado ou com aberturas com dispositivos verticais e horizontal localdos com afastamento de 0,45 m e 0,225 m, respectivamente, do limiar da abertura a barlavento com profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo.</p>

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 48: Descrição das tipologias ensaiadas no túnel de vento do LNEC.

G3: GEOMETRIAS: ASSIMÉTRICAS		G3A: Modelo genérico selado ou com aberturas com dispositivos vertical e horizontal localizados no limiar da abertura a barlavento de forma assimétrica (protetor vertical apenas à esquerda do vão) com profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo.
		G3B: Modelo genérico selado ou com aberturas com dispositivos vertical e horizontal localizados no limiar da abertura a barlavento de forma assimétrica (protetor vertical apenas à esquerda do vão e chanfrado a 45°) com profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo.
G3: GEOMETRIAS: SIMÉTRICAS		G3C: Modelo genérico selado ou com aberturas com dispositivos verticais e horizontal localizados no limiar da abertura a barlavento (protetores verticais chanfrados a 45° e ocupando a altura total do vão) com profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo.
		G3D: Modelo genérico selado ou com aberturas com dispositivos verticais e horizontal localizados no limiar da abertura a barlavento (protetores verticais chanfrados a 45° e ocupando a metade da altura total do vão) com profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo.
		G3E: Modelo genérico selado ou com aberturas com dispositivos verticais e horizontal localizados no limiar da abertura a barlavento. Protetores verticais chanfrados a 45° e ocupando a altura total do vão. Protetor horizontal composto por três aletas de 0,10 m, espaçadas entre si em 0,10 m. Profundidade final dos protetores equivalentes a 0,50 m no protótipo.
G3: GEOMETRIAS: COMPLEXAS		G3F: Modelo genérico (selado ou com aberturas) com dispositivo remetendo ao <i>brise soleil</i> proposto para o Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro. As aletas verticais e horizontais externas têm profundidades equivalentes a 0,50 m no protótipo. As aletas horizontais internas, anguladas a 45°, foram distribuídas em 56% da altura do vão e com profundidade equivalente aproximadamente 0,19 m no protótipo.
		G3G: Modelo genérico (selado ou com aberturas) com dispositivo remetendo a uma estore de correr projetável localizado na abertura a barlavento. Tentou-se reproduzir a porosidade semelhante à referência real e a angulação usual (30°).

Fonte: A Autora (2021).

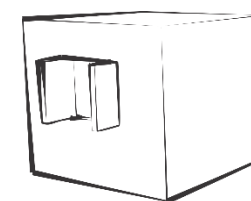
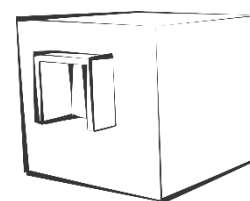
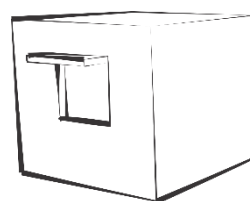
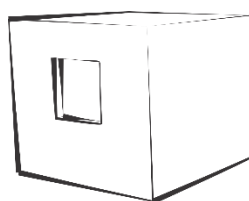
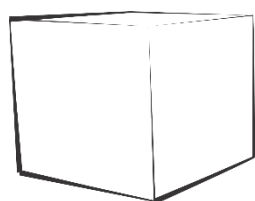
APÊNDICE D

COEFICIENTES DE PRESSÃO E DIFERENCIAIS DE PRESSÃO MÉDIOS: ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO DO IPT

Tabela 49: Coeficientes de pressão e diferenciais de pressão médios calculados para as faces barlavento e sotavento para todos os cenários ensaiados no túnel de vento do IPT.

Cpm barlavento	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°
G1A	0,56	0,54	0,44	0,27	-0,01	-0,41	-0,72	-0,32
G1B	0,58	0,58	0,46	0,30	-0,01	-0,38	-0,68	-0,31
G2A	0,58	0,58	0,49	0,33	0,07	-0,32	-0,63	-0,27
G2B	0,58	0,54	0,47	0,27	0,03	-0,30	-0,60	-0,28
G2C	0,61	0,58	0,48	0,29	0,03	-0,30	-0,59	-0,27
Cpm sotavento	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°
G1A	-0,31	-0,39	-0,47	-0,56	-0,68	-0,70	-0,72	0,58
G1B	-0,29	-0,39	-0,46	-0,52	-0,59	-0,63	-0,69	0,58
G2A	-0,27	-0,35	-0,42	-0,47	-0,57	-0,60	-0,64	0,60
G2B	-0,29	-0,35	-0,45	-0,48	-0,56	-0,63	-0,67	0,59
G2C	-0,25	-0,33	-0,42	-0,44	-0,52	-0,59	-0,64	0,63
ΔCpmédio	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°
G1A	0,86	0,93	0,91	0,83	0,67	0,29	-0,01	-0,90
G1B	0,87	0,97	0,92	0,82	0,58	0,25	0,01	-0,89
G2A	0,84	0,93	0,90	0,80	0,63	0,28	0,01	-0,88
G2B	0,87	0,90	0,92	0,76	0,58	0,33	0,06	-0,88
G2C	0,86	0,90	0,89	0,73	0,55	0,29	0,05	-0,90

TIPOLOGIAS



G1A

G1B

G2A

G2B

G2C

Fonte: A Autora (2020).

APÊNDICE E

DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO: TIPOLOGIAS DE REFERÊNCIA (G1A e G1B) ENSAIADAS NO TÚNEL DE VENTO DO LNEC

A sintetiza Tabela 50 de forma comparativa o comportamento da distribuição de pressão nas faces destinadas às aberturas (barlavento e sotavento) dos modelos de referência (G1A e G1B) ao longo da variação do ângulo de incidência de vento (0° a 90°). De modo geral, as principais discrepâncias entre os modelos são decorrentes da inclusão das aberturas. A tipologia G1A apresenta, para os ângulos menores, maiores áreas de estagnação (intervalo de Cps entre 0,8 a 1,0) ou de valores de Cps mais positivos, sendo que para os ângulos maiores, o contrário é verdadeiro. A tipologia G1B, em razão da presença das aberturas e da sua influência no escoamento, denotam-se reduções nas áreas de valores extremos de Cps (seja positivo ou negativo) e diferenciações mais significativas no comportamento das pressões restritas ao entorno imediato destas aberturas.

Para o **ângulo de incidência de 0°** , a zona de estagnação se localiza a aproximadamente 80% da altura da face a barlavento da tipologia G1A, indicando a existência da camada limite. As quinas superiores apresentam Cps entre 0,4 a 0,6 e as inferiores de 0,2 a 0,4, sendo a área restante caracterizada por valores entre 0,6 a 0,8. Na tipologia G1B, devido à presença da abertura, há uma redução da área destinada à zona de estagnação. Os demais contornos apresentam comportamentos semelhantes à primeira (G1A). Na face a sotavento, para ambas as tipologias, quase a totalidade das tomadas de pressão apresentam Cps entre -0,2 a -0,4, com exceção de algumas poucas, cujos valores são situados no intervalo superior (Cps entre -0,4 a -0,6).

Com a inclinação da **incidência do vento (nas situações de 15° e 30°)**, ambas as tipologias (G1A e G1B) apresentam variações no padrão de distribuição de pressão na face a barlavento, tais como: inclinação e perda de simetria dos contornos; redução das áreas correspondentes aos valores mais positivos; e expansão das destinadas aos mais negativos. A G1A, por ser uma geometria selada, registra maiores áreas de estagnação nas duas incidências (15° e 30°) em relação à G1B. Nas faces a sotavento, os valores de Cps se encontram majoritariamente no intervalo de -0,4 a -0,6, com exceção de regiões localizadas nos entornos imediatos da abertura ou nas quinas, que devido à somatória das ações das suas próprias arestas e da inclinação da geometria em relação ao escoamento, resultam em valores inferiores ou superiores ao referido intervalo.

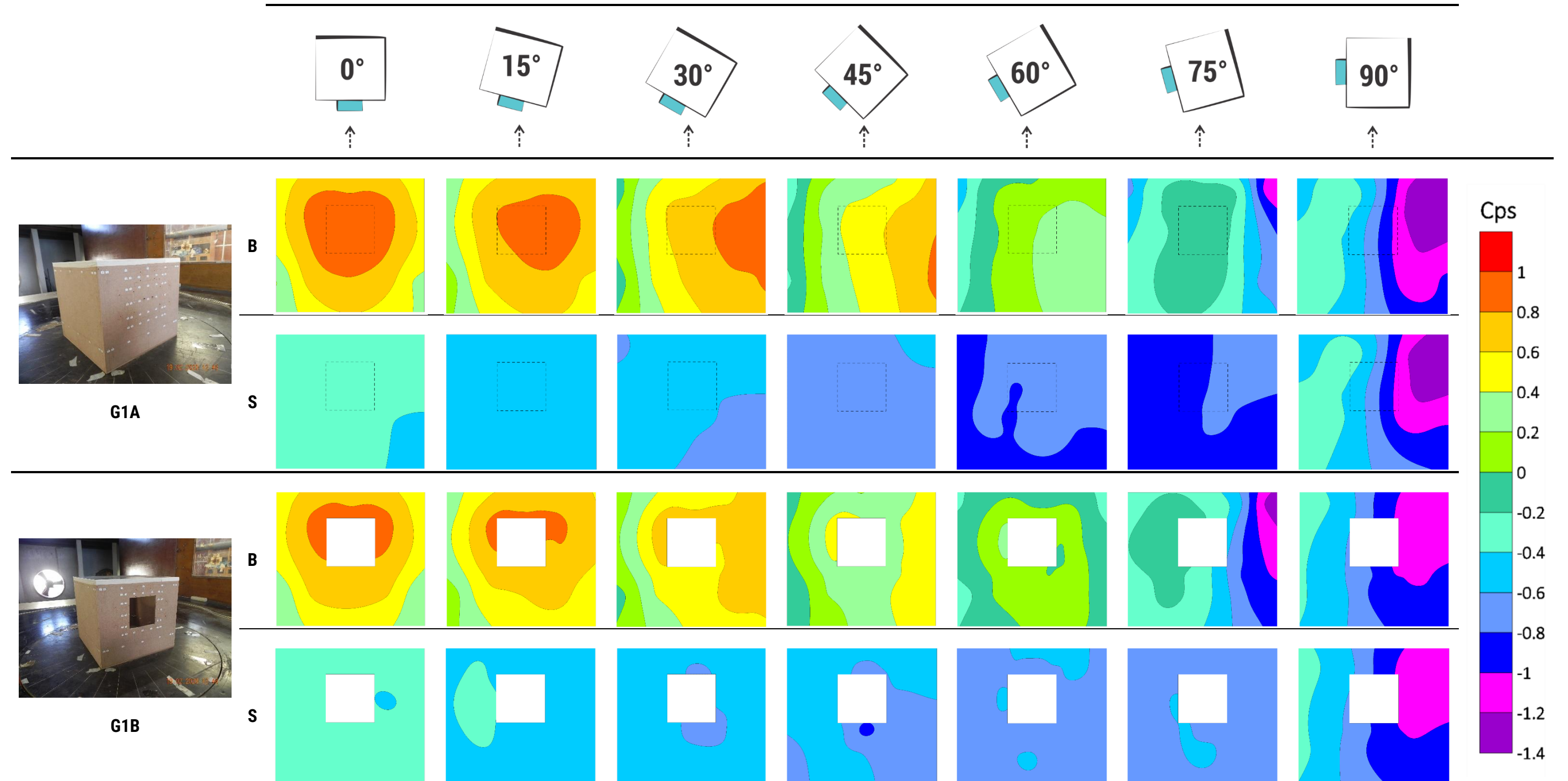
O **ângulo de incidência de 45°** registra a maior variação da distribuição de pressão ao longo da face a barlavento (com Cps pertencentes aos intervalos de -0,2 a 1,0 na G1A e 0 a 0,6 na G1B). A sotavento, a tipologia G1A é caracterizada por valores entre -0,6 a -0,8, com exceção das tomadas localizadas na quina superior direita. Já a G1B, apresenta Cps variando de -0,4 a -0,8, sendo os mais negativos situados no entorno da abertura devido à inclinação do jato de saída.

Para o **ângulo de 60°** , a face a barlavento da G1A é caracterizada por Cps entre 0,4 a -0,6, sendo grande parte pertencente ao intervalo de 0 a 0,4. Na G1B, os valores mais recorrentes estão entre 0,2 a -0,2 e o intervalo de variação é de 0,4 a -0,4. Em relação às faces a sotavento, no modelo selado (G1A) os Cps variam de -0,6 a -1,0, enquanto no modelo com aberturas (G1B) estes estão, majoritariamente, entre -0,6 a -0,8. Na situação de **incidência de vento igual a 75°** , as faces a barlavento se encontram (quase que totalmente) na zona de separação do escoamento. Desta forma, valores negativos de Cps entre 0 a -1,4 são observados. As faces a sotavento apresentam Cps situados, majoritariamente, entre -0,6 a -0,8. Por fim, **na situação de 90°** , ambas as faces com aberturas (barlavento e sotavento) se localizam nas zonas de separação do escoamento e, portanto, apresentam distribuições de pressão semelhantes com Cps variando de -0,2 a -1,4 ao longo das larguras das faces.

APÊNDICE F

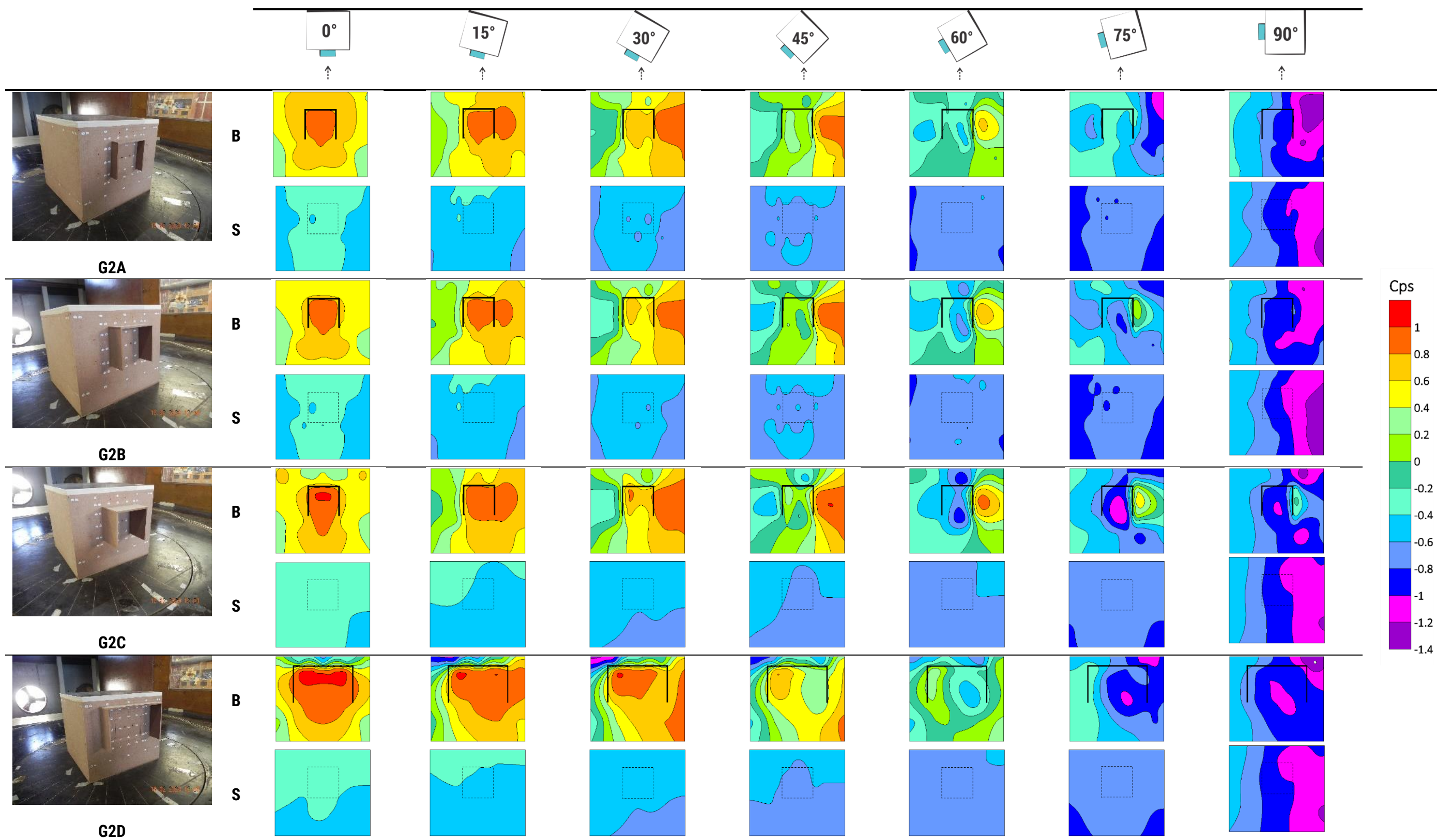
GRÁFICOS DE CONTORNO: DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NAS TIPOLOGIAS ENSAIADAS NO TÚNEL DE VENTO DO LNEC

Tabela 50: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento dos modelos de referência (G1A, modelo genérico selado e, G1B, modelo genérico com aberturas) para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.



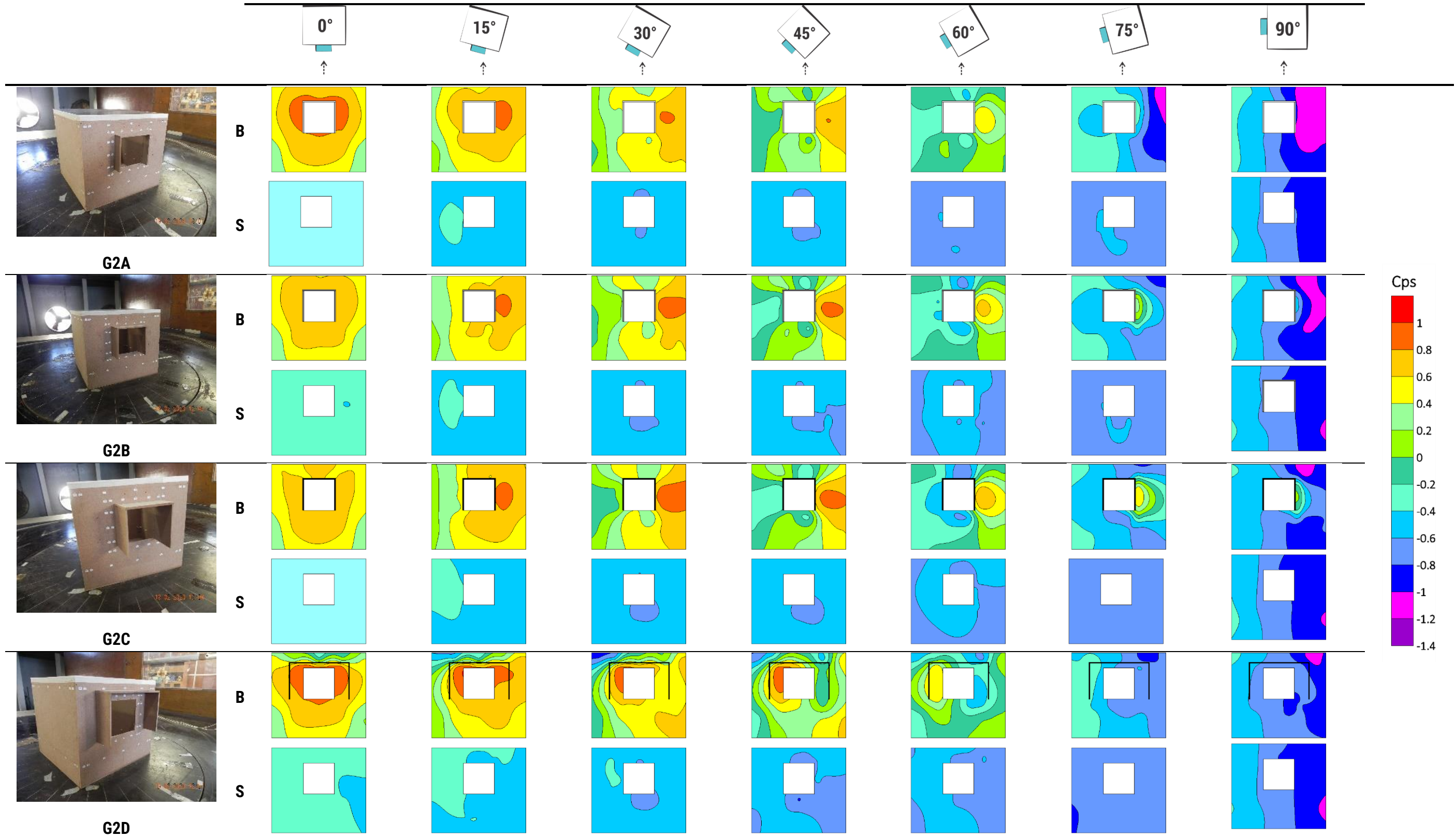
Fonte: A Autora (2020).

Tabela 51: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G2: Características (G2A; G2B; G2C e G2D) ensaiadas em modelo genérico selado para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.



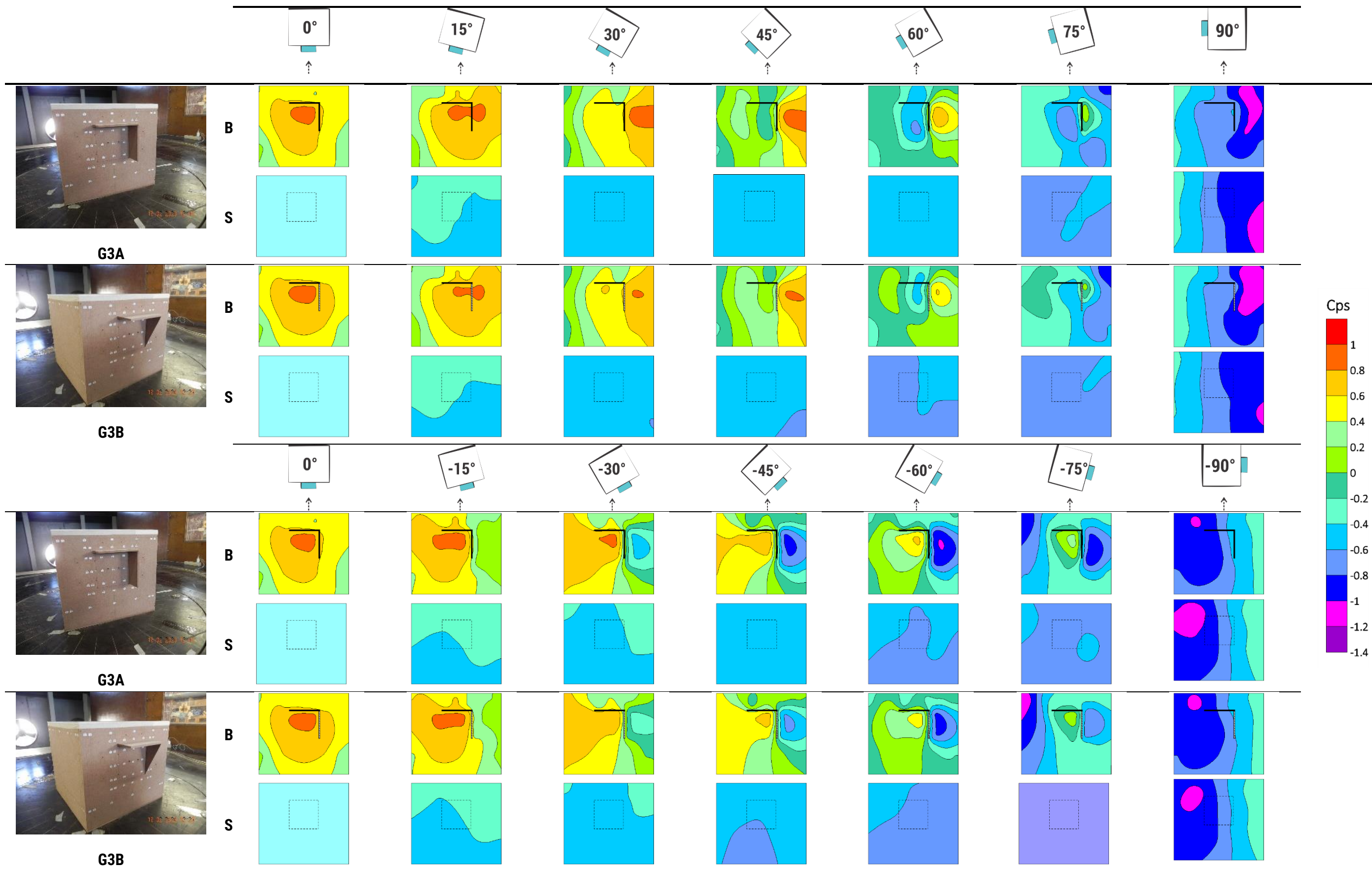
Fonte: A Autora (2020).

Tabela 52: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G2: Características (G2A; G2B; G2C e G2D) ensaiadas em modelo genérico com aberturas para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.



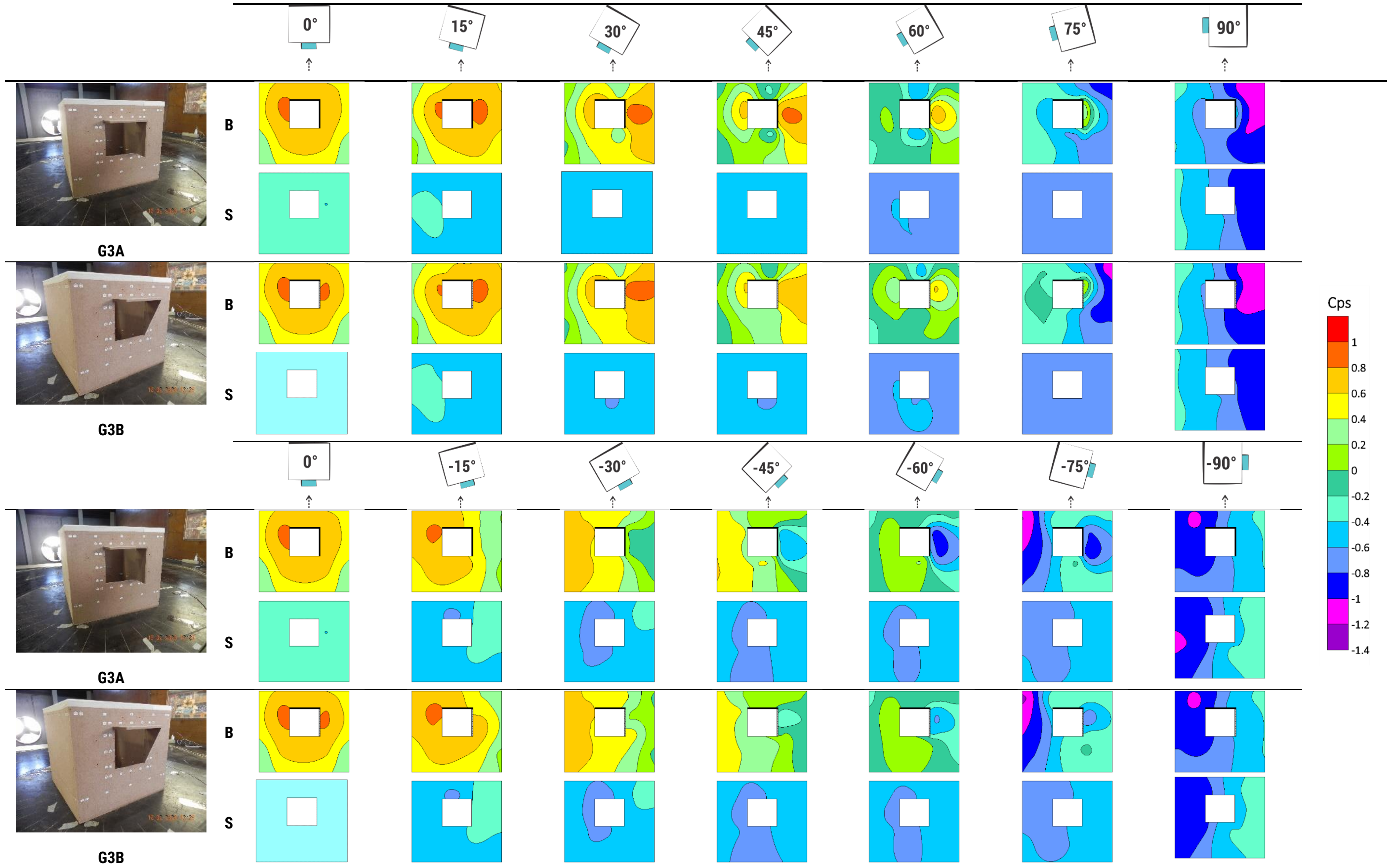
Fonte: A Autora (2020).

Tabela 53: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Assimétricas (G3A e G3B) ensaiadas em modelo genérico selado para os intervalos de ângulos de incidência de 0° a 90° e de 0° a -90°.



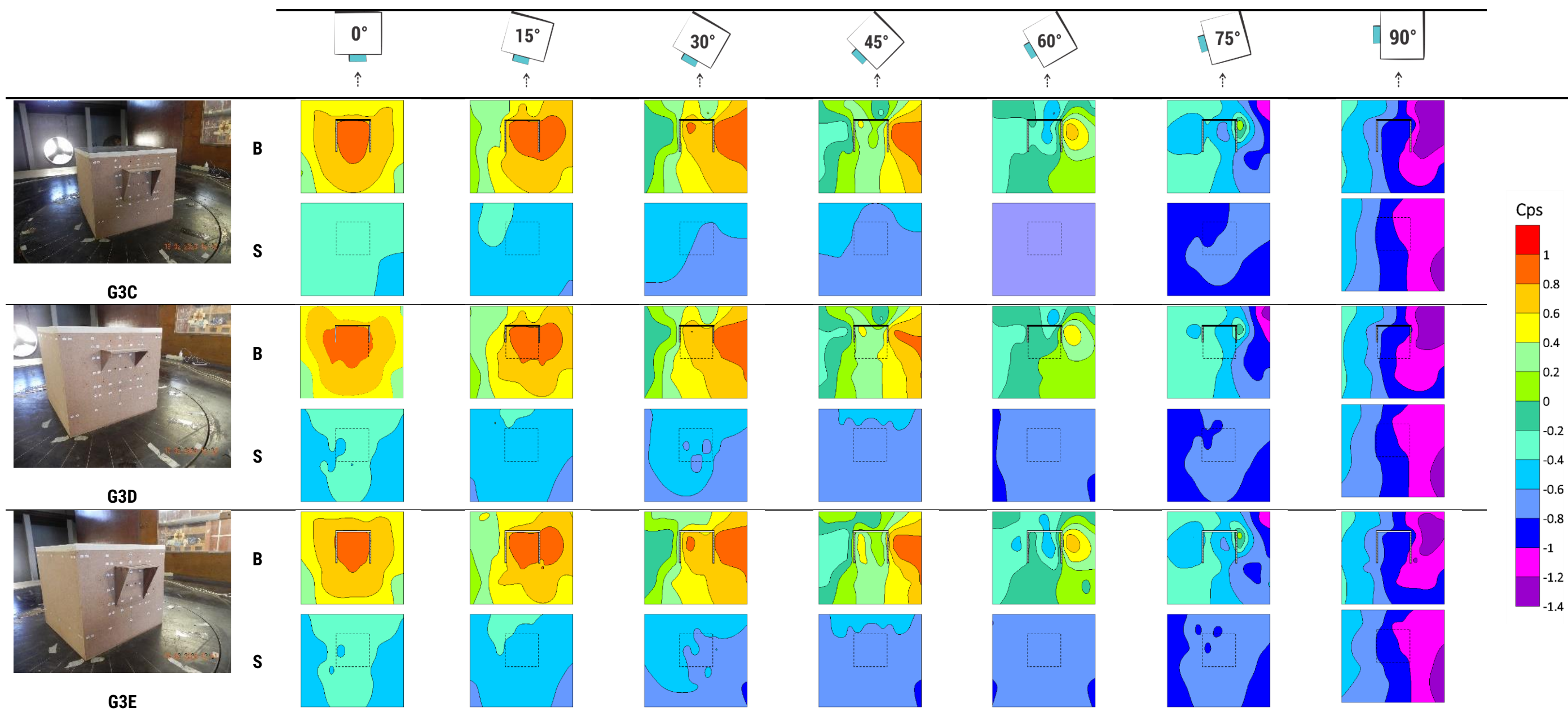
Fonte: A Autora (2020).

Tabela 54: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Assimétricas (G3A e G3B) ensaiadas em modelo genérico com aberturas para os intervalos de ângulos de incidência de 0° a 90° e de 0° a -90°.



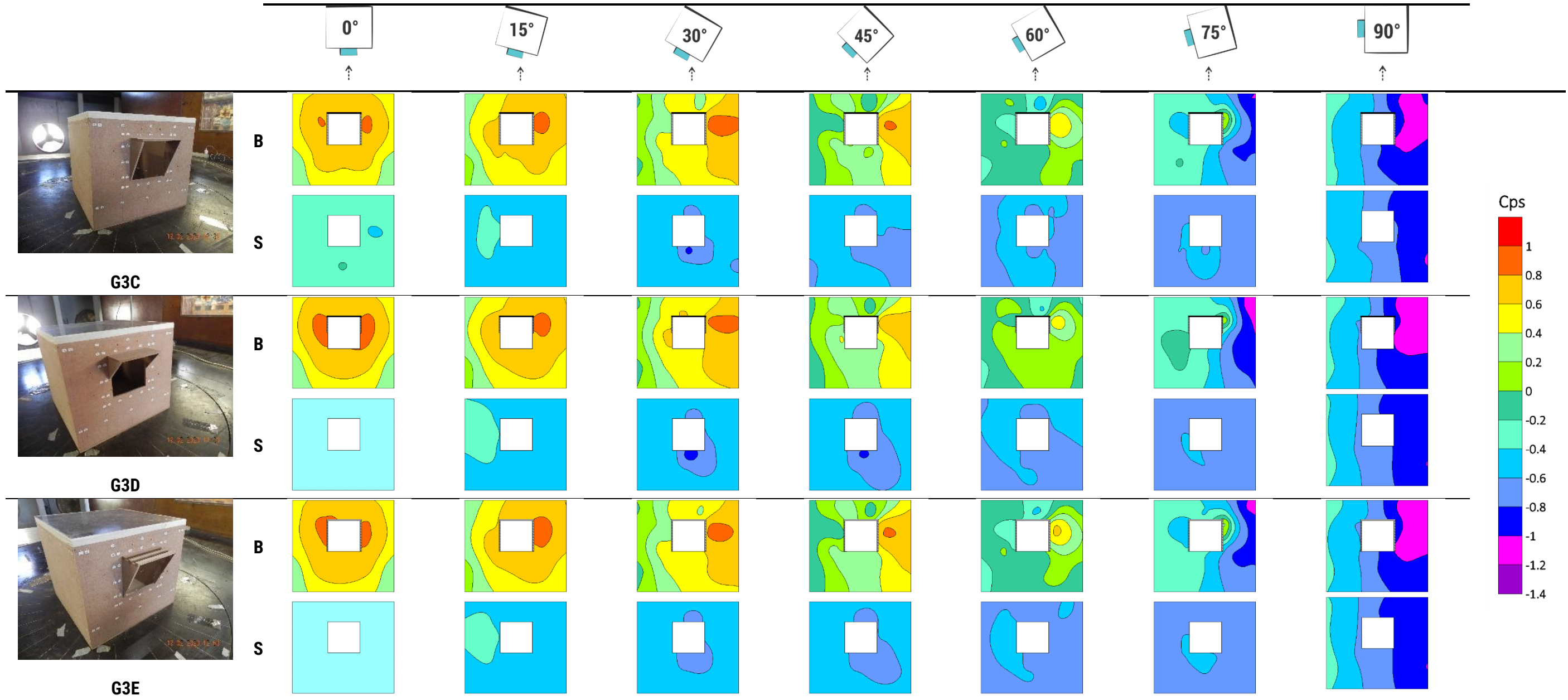
Fonte: A Autora (2020).

Tabela 55: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Simétricas (G3C, G3D e G3E) ensaiadas em modelo genérico selado para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.



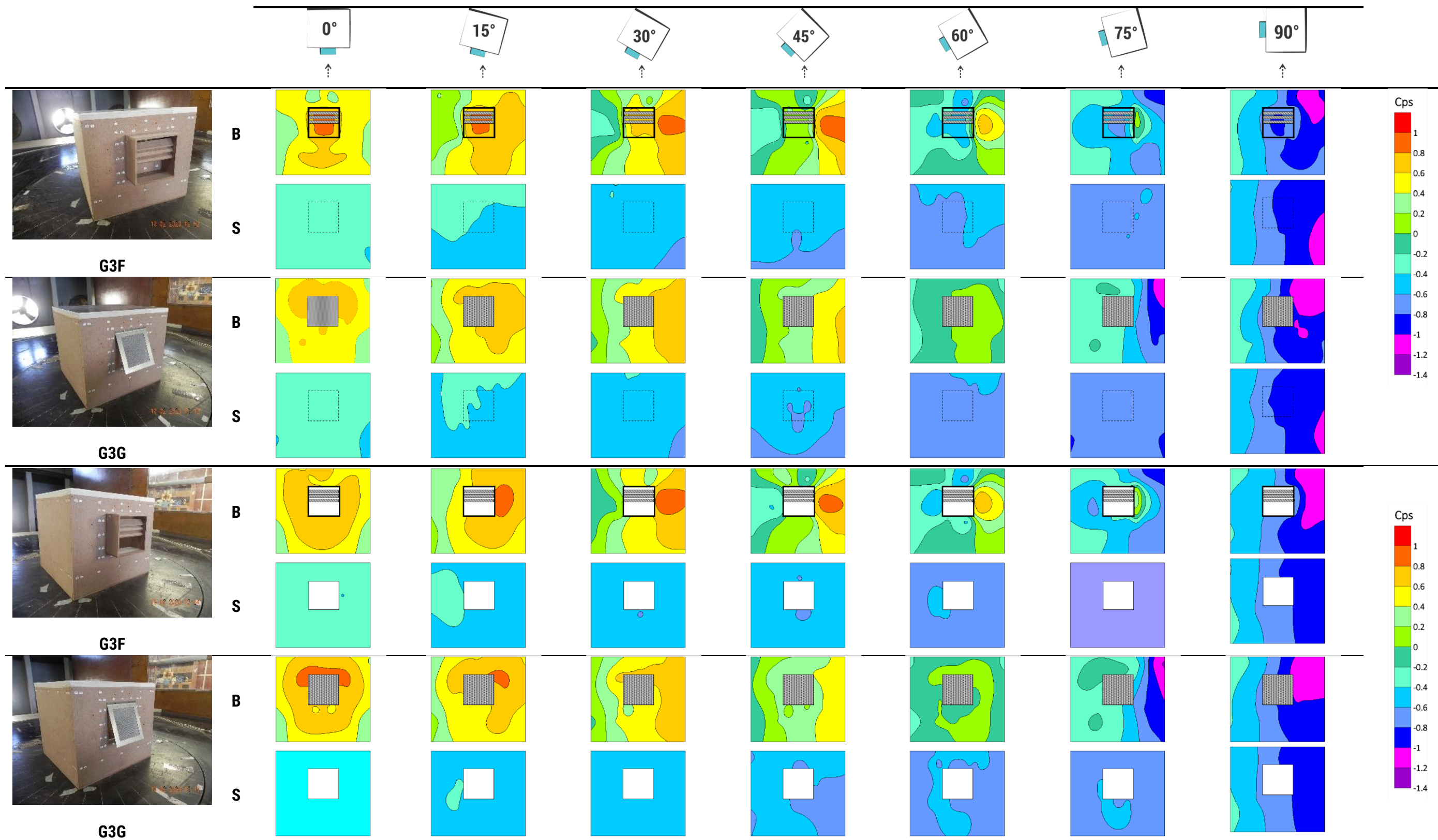
Fonte: A Autora (2020).

Tabela 56: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Simétricas (G3C, G3D e G3E) ensaiadas em modelo genérico com aberturas para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.



Fonte: A Autora (2020).

Tabela 57: Distribuição de pressão nas faces a barlavento e sotavento das tipologias do grupo G3: Complexas (G3F e G3G) ensaiadas em modelo genérico selado e com aberturas para o intervalo de ângulos de incidência de 0° a 90°.















Fonte: A Autora (2020).

APÊNDICE G

VELOCIDADES MÉDIAS RELATIVAS (U_{jan}/U_{ref}) NAS TIPOLOGIAS ENSAIADAS NO TÚNEL DE VENTO DO LNEC

Tabela 58: Valores do adimensional U_{jan}/U_{ref} e das velocidades médias aferidas na altura de referência (U_{ref}) e no centroide da abertura a sotavento (U_{jan}) em m/s para todas as tipologias ensaiadas em modelo genérico com aberturas no túnel de vento do LNEC.


TIPOLOGIAS		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
	G1B	U_{jan}/U_{ref}	0,00	0,15	0,39	0,56	0,62	0,61	0,56	0,61	0,62	0,56	0,39	0,15	0,00
		U_{jan} (m/s)							4,41	4,78	4,88	4,41	3,06	1,15	0,01
		U_{ref} (m/s)							7,84						
	G2A	U_{jan}/U_{ref}							0,68	0,71	0,63	0,47	0,26	0,14	0,06
		U_{jan} (m/s)							5,34	5,53	4,95	3,66	2,07	1,11	0,49
		U_{ref} (m/s)							7,82						
	G2B	U_{jan}/U_{ref}							0,70	0,76	0,66	0,46	0,16	0,00	0,01
		U_{jan} (m/s)							5,48	5,91	5,18	3,61	1,28	-0,02	0,11
		U_{ref} (m/s)							7,82						
	G2C	U_{jan}/U_{ref}							0,78	0,85	0,76	0,55	0,20	0,07	0,13
		U_{jan} (m/s)							6,11	6,70	6,01	4,35	1,56	0,53	1,04
		U_{ref} (m/s)							7,86						
	G2D	U_{jan}/U_{ref}							0,72	0,74	0,75	0,71	0,38	0,03	0,09
		U_{jan} (m/s)							5,65	5,79	5,93	5,59	2,98	0,23	0,70
		U_{ref} (m/s)							7,86						
	G3A	U_{jan}/U_{ref}	0,01	0,11	0,34	0,45	0,58	0,71	0,68	0,74	0,63	0,34	0,12	0,02	0,08
		U_{jan} (m/s)	0,04	0,89	2,65	3,53	4,58	5,61	5,32	5,78	4,97	2,64	0,98	0,19	0,59
		U_{ref} (m/s)							7,86						
	G3B	U_{jan}/U_{ref}	0,01	0,15	0,28	0,38	0,55	0,71	0,67	0,73	0,63	0,36	0,15	0,08	0,09
		U_{jan} (m/s)	0,11	1,16	2,17	2,98	4,35	5,54	5,26	5,71	4,94	2,87	1,19	0,62	0,69
		U_{ref} (m/s)							7,86						
	G3C	U_{jan}/U_{ref}							0,71	0,76	0,71	0,49	0,27	0,12	0,09
		U_{jan} (m/s)							5,55	5,97	5,55	3,85	2,12	0,95	0,71
		U_{ref} (m/s)							7,86						
	G3D	U_{jan}/U_{ref}							0,62	0,70	0,69	0,51	0,32	0,11	0,05
		U_{jan} (m/s)							4,90	5,57	5,48	4,03	2,53	0,84	0,42
		U_{ref} (m/s)							7,92						
	G3E	U_{jan}/U_{ref}							0,65	0,71	0,65	0,45	0,21	0,06	0,06
		U_{jan} (m/s)							5,15	5,65	5,12	3,55	1,68	0,46	0,45
		U_{ref} (m/s)							7,92						
	G3F	U_{jan}/U_{ref}							0,49	0,58	0,59	0,38	0,19	0,05	0,13
		U_{jan} (m/s)							3,90	4,58	4,67	3,01	1,48	0,36	1,00
		U_{ref} (m/s)							7,88						
	G3G	U_{jan}/U_{ref}							0,45	0,58	0,54	0,37	0,30	0,14	0,11
		U_{jan} (m/s)							3,54	4,54	4,26	2,95	2,39	1,14	0,87
		U_{ref} (m/s)							7,88						

Fonte: A Autora (2020).

APÊNDICE H


CÁLCULO DA VAZÃO DE AR NAS DIVERSAS TIPOLOGIAS ENSAIADAS

Tabela 59: Valores dos diferenciais de pressão (ΔC_p), coeficientes de descarga (C_d), e velocidade média na altura de referência (U_{ref} em m/s) utilizados para a determinação da vazão (m^3/s) na tipologia de referência (G1A).

REFERÊNCIA [G1A]	ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE VENTO [°]												
	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
ΔC_p	-0,01	0,56	0,89	1,07	1,19	1,20	1,13	1,20	1,19	1,07	0,89	0,56	-0,01
C_d	0,6												
U_{ref}	7,41 m/s												

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 60: Valores dos coeficientes de descarga (C_d) utilizados para a determinação das vazões (m^3/s) nas tipologias e cenários avaliados.

Cd												
	SEM DISPOSITIVO	PROFUNDIDADE				AFASTAMENTO	ASSIMÉTRICAS		SIMÉTRICAS			COMPLEXAS
ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G
-90°	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
-75°	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
-60°	0,50	0,35	0,35	0,60	0,60	0,50	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25	0,35
-45°	0,60	0,50	0,50	0,60	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,45	0,40
-30°	0,60	0,60	0,60	0,70	0,65	0,60	0,60	0,60	0,65	0,60	0,60	0,50
-15°	0,60	0,65	0,65	0,75	0,65	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,50
0°	0,60	0,65	0,60	0,70	0,65	0,65	0,65	0,65	0,60	0,60	0,50	0,45
15°	0,60	0,65	0,65	0,75	0,65	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,50
30°	0,60	0,60	0,60	0,70	0,65	0,60	0,60	0,60	0,65	0,60	0,60	0,50
45°	0,60	0,50	0,50	0,60	0,65	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,40
60°	0,50	0,35	0,35	0,60	0,60	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25	0,35
75°	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
90°	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

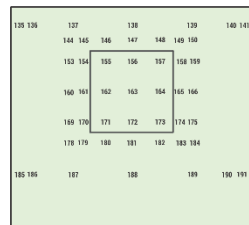
Fonte: A Autora (2021).

Tabela 61: Valores e indicação da forma de obtenção dos diferenciais de pressão (ΔC_p) utilizados para a determinação das vazões (m^3/s) nas tipologias e cenários avaliados.

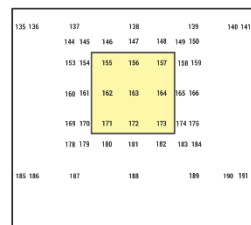
ΔC_p												
	SEM DISPOSITIVO	PROFUNDIDADE			AFASTAMENTO	ASSIMÉTRICAS		SIMÉTRICAS			COMPLEXAS	
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G
ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO												
-90°	0,00	-0,05	0,02	0,21	-0,03	0,00	-0,01	0,10	0,04	0,06	0,08	-0,07
-75°	0,24	0,17	0,13	0,22	0,05	0,23	0,25	0,23	0,24	0,21	0,06	0,39
-60°	0,66	0,59	0,33	0,12	0,40	0,52	0,55	0,59	0,69	0,48	0,55	0,72
-45°	0,92	0,86	0,79	0,79	1,09	0,67	0,73	0,94	1,04	0,87	0,73	0,88
-30°	1,09	1,07	1,23	1,25	1,37	0,95	0,88	1,30	1,17	1,10	0,96	1,07
-15°	1,13	1,19	1,37	1,35	1,31	1,04	0,95	1,36	1,18	1,18	0,92	1,16
0°	1,02	1,15	1,31	1,27	1,16	1,09	1,07	1,23	1,08	1,09	0,99	0,98
15°	1,13	1,19	1,37	1,35	1,31	1,11	1,09	1,36	1,18	1,18	0,92	1,16
30°	1,09	1,07	1,23	1,25	1,37	1,13	1,06	1,30	1,17	1,10	0,96	1,07
45°	0,92	0,86	0,79	0,79	1,09	0,52	0,74	0,94	1,04	0,87	0,73	0,88
60°	0,66	0,59	0,33	0,12	0,40	0,05	0,31	0,59	0,69	0,48	0,55	0,72
75°	0,24	0,17	0,13	0,22	0,05	-0,04	0,18	0,23	0,24	0,21	0,06	0,39
90°	0,00	-0,05	0,02	0,21	-0,03	0,12	-0,07	0,10	0,04	0,06	0,08	-0,07

LEGENDA:

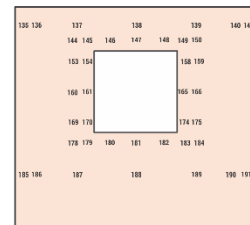
POSSIBILIDADES DE CÁLCULO DO ΔC_p (C_p barlavento – C_p sotavento)



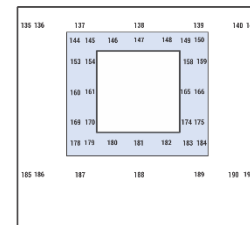
ΔC_p FF



ΔC_p FJ



ΔC_p AF



ΔC_p AA

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 62: Valores das vazões (m³/s) nas tipologias e cenários avaliados.


G [m ³ /s]													
	REFERÊNCIA	SEM DISPOSITIVO	PROFUNDIDADE			AFASTAMENTO	ASSIMÉTRICAS		SIMÉTRICAS			COMPLEXAS	
	G1A	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G
-90°	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
-75°	0,06	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
-60°	0,07	0,06	0,04	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04
-45°	0,08	0,08	0,06	0,06	0,07	0,09	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05
-30°	0,09	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11	0,08	0,08	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07
-15°	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12	0,10	0,10	0,09	0,11	0,10	0,10	0,08	0,08
0°	0,08	0,08	0,10	0,09	0,11	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,07	0,06
15°	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,08	0,08
30°	0,09	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07
45°	0,08	0,08	0,06	0,06	0,07	0,09	0,05	0,05	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05
60°	0,07	0,06	0,04	0,03	0,03	0,05	0,01	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04
75°	0,06	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
90°	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Fonte: A Autora (2021).

APÊNDICE I


APLICAÇÃO PROJETUAL: CÁLCULO DAS TAXAS DE RENOVAÇÃO DE AR

Tabela 63: Parâmetros utilizados para o cálculo das velocidades médias de referência (Uref) por meio das equações de BRE e da NBR 6123.

APLICAÇÃO Uref (m/s)	Equação (BRE)		V = Vm . k . z ^a				
	Valores adotados		SUBÚRBIO	k: 0,35	a: 0,25		
	Vm estação meteorológica (h = 10m)		2,6 m/s		5,0 m/s		
V (h = 2,7 m)		1,2 m/s		2,2 m/s			
	Equação (NBR 6123)		V _k = V ₀ .S ₁ .S ₂ .S ₃				
	Valores adotados		S ₁ = 1,0			S ₃ = 1,0	
			S ₂ = b, Fr _{II} , (z/10) ^p			S ₂ = S ₂ IV / S ₂ II	
			S ₂ II	b = 1,0	Fr _{II} = 0,65	p = 0,16	z = 10 m
			S ₂ IV	b = 0,68		p = 0,25	z = 2,7 m
	V ₀ estação meteorológica (h = 10m)		2,6 m/s			5,0 m/s	
V _k (h = 2,7 m)		1,3 m/s			2,5 m/s		

Fonte: Adaptado de BRE (1978) e ABNT (1988).

Tabela 64: Taxas de renovação de ar considerando uma velocidade média de referência (Uref) de 1,3 m/s para diversos cenários avaliados.

Ren U=1,3 m/s												
	SEM DISPOSITIVO	PROFUNDIDADE				AFASTAMENTO	ASSIMÉTRICAS		SIMÉTRICAS			COMPLEXAS
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G
-90°	1,8	16,0	8,8	23,4	9,0	4,0	7,1	15,9	10,8	12,6	14,8	13,2
-75°	34,8	29,3	25,2	24,0	11,8	34,3	35,4	24,3	25,1	24,0	12,8	32,0
-60°	82,5	54,6	40,6	41,8	77,4	73,5	53,0	54,8	59,9	50,8	38,1	60,8
-45°	117,1	94,2	90,4	108,8	138,8	100,2	87,4	99,1	105,0	97,5	78,8	76,7
-30°	127,6	126,1	135,5	159,8	155,2	119,2	115,2	139,8	144,5	131,6	120,3	105,7
-15°	130,0	144,1	154,9	177,8	152,1	145,7	139,1	154,8	145,6	147,7	117,7	110,3
0°	123,2	141,7	139,5	161,4	143,0	138,4	137,2	147,3	128,5	131,4	101,7	91,3
15°	130,0	144,1	154,9	177,8	152,1	150,8	149,5	154,8	145,6	147,7	117,7	110,3
30°	127,6	126,1	135,5	159,8	155,2	130,2	126,5	139,8	144,5	131,6	120,3	105,7
45°	117,1	94,2	90,4	108,8	138,8	66,6	78,8	99,1	105,0	97,5	78,8	76,7
60°	82,5	54,6	40,6	41,8	77,4	16,7	39,8	54,8	59,9	50,8	38,1	60,8
75°	34,8	29,3	25,2	24,0	11,8	9,9	21,4	24,3	25,1	24,0	12,8	32,0
90°	1,8	16,0	8,8	23,4	9,0	17,7	13,8	15,9	10,8	12,6	14,8	13,2

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 65: Taxas de renovação de ar considerando uma velocidade média de referência (U_{ref}) de 2,5 m/s para diversos cenários avaliados.

Ren U=2,5 m/s													
	SEM DISPOSITIVO	PROFUNDIDADE				AFASTAMENTO	ASSIMÉTRICAS		SIMÉTRICAS			COMPLEXAS	
	G1B	G2A	G2B	G2C	G2D	G3A	G3B	G3C	G3D	G3E	G3F	G3G	
ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO	-90°	3,4	30,7	17,0	45,0	17,3	7,8	13,7	30,6	20,7	24,3	28,5	25,4
	-75°	67,0	56,4	48,4	46,1	22,7	66,0	68,1	46,6	48,2	46,1	24,5	61,6
	-60°	158,6	104,9	78,1	80,4	148,9	141,4	101,9	105,3	115,3	97,7	73,3	116,9
	-45°	225,1	181,2	173,8	209,1	267,0	192,6	168,0	190,6	201,9	187,4	151,5	147,5
	-30°	245,4	242,6	260,6	307,3	298,5	229,3	221,5	268,9	277,8	253,0	231,4	203,4
	-15°	250,0	277,1	297,8	342,0	292,4	280,2	267,6	297,7	280,0	284,0	226,3	212,1
	0°	237,0	272,5	268,4	310,4	275,0	266,1	263,9	283,2	247,0	252,7	195,6	175,5
	15°	250,0	277,1	297,8	342,0	292,4	290,0	287,5	297,7	280,0	284,0	226,3	212,1
	30°	245,4	242,6	260,6	307,3	298,5	250,4	243,2	268,9	277,8	253,0	231,4	203,4
	45°	225,1	181,2	173,8	209,1	267,0	128,1	151,6	190,6	201,9	187,4	151,5	147,5
	60°	158,6	104,9	78,1	80,4	148,9	32,2	76,5	105,3	115,3	97,7	73,3	116,9
	75°	67,0	56,4	48,4	46,1	22,7	19,1	41,1	46,6	48,2	46,1	24,5	61,6
90°	3,4	30,7	17,0	45,0	17,3	34,0	26,6	30,6	20,7	24,3	28,5	25,4	

Fonte: A Autora (2021).

INSTITUIÇÕES ENVOLVIDAS



FAU USP



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

AGÊNCIA DE FOMENTO



Print