Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações

Marieli Azoia Lukiantchuki

Orientadora: Profa. Dra. Rosana Maria Caram

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

***SHEDS* EXTRATORES E CAPTADORES DE AR PARA INDUÇÃO DA VENTILAÇÃO
NATURAL EM EDIFICAÇÕES**

MARIELI AZOIA LUKIANTCHUKI

Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Área: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosana Maria Caram

Apoio: Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP

São Carlos

2015

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

Ls LUKIANTCHUKI, Marieli Azoia
Sheds extratores e captadores de ar para indução da
ventilação natural em edificações / Marieli Azoia
LUKIANTCHUKI; orientador Rosana Maria Caram. São
Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo,
2015.

1. Ventilação natural. 2. Sheds. 3. Simulação
computacional CFD. 4. Túnel de vento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Arquiteta e Urbanista **Marieli Azoia Lukiantchuki**

Título da tese: **"Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações"**.

Data da defesa: **06/02/2015**

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. **Rosana Maria Caram (Orientadora)**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo - USP)

Profa. Dra. **Kelen Almeida Dornelles**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo - USP)

Profa. Dra. **Alessandra Rodrigues Prata Shimomura**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)

Prof. Dr. **Fernando Vítor Marques da Silva**
(Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC-Lisboa)

Prof. Dr. **Leonardo Bittencourt**
(Universidade Federal de Alagoas - UFAL)

Resultado:

Aprovada

APROVADA

Aprovado

Aprovado

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Prof. Dr. **Márcio Minto Fabrício**

Dedico esse trabalho às pessoas mais importantes da minha vida: meus amados pais: Mario e Maria Alice e minhas amadas irmãs: Layla, Juliana e Marlice.

Meu TUDO!

AGRADECIMENTOS

“Eu sou parte de uma equipe. Então, quando venço, não sou eu apenas quem vence. De certa forma, termino o trabalho de um grupo enorme de pessoas” (Ayrton Senna).

Agradeço primeiramente a Deus, o grande responsável por tudo! Obrigada pela sua presença constante na minha vida, pelo conforto nos momentos mais difíceis e por me fornecer fé, paciência e saúde para concluir essa importante etapa. Devo a ele todas as oportunidades que me fizeram chegar aonde cheguei.

A minha família espetacular, que é à base de tudo. Agradeço ao meu amado pai Mario, que com seu forte e doce exemplo me ensinou os maiores valores dessa vida, sempre com muito amor e dedicação. A sua ausência física não consegue diminuir jamais a sua presença em minha vida. Quanta honra ser sua filha! A minha amada mãe Maria Alice, que na sua simplicidade sempre me incentivou a alcançar todos os meus objetivos. Sua incansável disposição é um forte exemplo na busca por alcançar todos os meus objetivos. Saibam que não há conhecimento científico que supere tudo que vocês dois me ensinaram. As minhas amadas irmãs Layla, Juliana e Marlice pelo constante incentivo e pelos incontáveis momentos de tanto amor, carinho e diversão. Me sinto realmente muito abençoada por ter as melhores irmãs desse mundo todo! Vocês são a melhor parte de mim! Aos pequeninos Mario, Caio e Pedro que chegaram pra completar a nossa felicidade, invertendo totalmente as prioridades dessa vida. A simplicidade e a alegria de vocês transformam a tia “Mali”. A todos vocês, que eu amo tanto, minha eterna gratidão. Se eu cheguei até aqui foi por vocês e pra vocês.

Ao querido Mayko, por ser essa pessoa tão especial e tão ímpar na minha vida. Não tenho palavras para expressar o meu agradecimento por tanto apoio, carinho, cumplicidade e amor ao longo desses anos. Obrigada por ter aguentado firme os finais de semanas menos

arejados, por conseguir estar sempre ao meu lado apesar da distância física e, principalmente, por ter o dom surreal de transformar as dificuldades em momentos leves e alegres. Saiba que você foi meu ponto de equilíbrio durante todo esse período. Minha vida!

Aos meus queridos “irmãos” Cassi, Fran e Zé pelas inúmeras mensagens de descontração, pelo apoio e torcida ao longo de todos esses anos e, principalmente, na fase de conclusão desse trabalho. Vocês moram no meu coração!

Agradeço imensamente a querida Prof^a. Dra. Rosana Maria Caram por ser muito mais que uma orientadora, mas uma grande amiga. Obrigada pela parceira sempre de uma forma muito leve e alegre, pelo incentivo constante e pela confiança tão sincera depositava nesse trabalho. Ro, foi uma honra imensurável trabalhar com você durante esse 8 anos e partilhar da sua sabedoria. Toda minha admiração pela professora e pelo ser humano Rosana. “Muitíssimo” obrigada!

A querida Prof^a. Dra. Alessandra Prata (Ale) que tanto me incentivou ao longo desses anos, mostrando que minha capacidade está muito além do que eu imaginava. Obrigada pela valiosa co-orientação e pela enorme paciência em solucionar minhas dúvidas. Ale, saiba que assim como o vento você trouxe uma importante semente que está nesse trabalho!

Ao estimado Eng. Dr. Fernando Marques da Silva por ter sido um supervisor tão presente, pelo apoio decisivo no planejamento e execução dos ensaios no túnel de vento, pela incansável disposição em solucionar minhas dúvidas e por compartilhar comigo seus valiosos conhecimentos. Obrigada também pela prazerosa amizade durante todo esse período e pelos cafezinhos, cujas soluções para os problemas de ventilação sempre surgiam. Me sinto grandemente privilegiada por tamanha supervisão e por isso é tão difícil expressar em palavras o meu agradecimento. Muito, muito, muito “agradecida”!

Ao respeitado Prof. Dr. Jorge Gil Saraiva, pela atenção dada a este trabalho e pelas valiosas conversas que tanto me orientaram. Obrigada pela oportunidade única de poder compartilhar do seu imensurável conhecimento. Uma grande referência pra mim!

Ao grande exemplo de genialidade Prof. Dr. Maurício Roriz que sempre me recebeu em sua casa para longas conversas sobre ventilação natural com tanta simpatia. Obrigada pela brilhante oportunidade de poder compartilhar dos seus ricos conhecimentos. Saiba que todos os seus questionamentos me fizeram crescer muito. Meus sinceros agradecimentos!

Ao grande mestre da ventilação natural Prof. Dr. Leonardo Bittencourt pela oportunidade única de adquirir um pouco do seu valioso conhecimento e por transmitir de uma forma tão natural sua paixão pela ventilação. Uma das minhas principais referências.

À Prof. Dr^a. Kelen Dornelles, pela valiosa contribuição, não somente durante o exame de qualificação, mas ao longo de toda esta jornada. Agradeço também à querida amiga Kelen, pela amizade tão importante ao longo desses anos, pelo ombro amigo, pelas longas conversas e por saber que posso contar com isso pra sempre! O carinho por “Ti” é enorme!

Ao Prof. Dr. Victor Roriz, que apesar da grandeza do seu conhecimento é uma pessoa tão simples e acessível. Obrigada pelo auxílio nessa pesquisa e pelas importantes contribuições em todas as reuniões. Saiba que os incontáveis “post-its” no meu exemplar da qualificação me trouxeram um importante crescimento. Muito, muito, muito obrigada!

Ao pesquisador e amigo Dr. Edson Matsumoto, o responsável pelos meus primeiros conhecimentos sobre o túnel de vento. Obrigada pela incansável disposição em me ajudar e por transmitir de forma tão simples um conhecimento tão grande. A sua inteligência é coroada com uma humildade que faz de você um ser humano incrível! Obrigada por tudo!

Ao eterno Mestre João Filgueiras Lima, Lelé, fonte de inspiração do meu trabalho de mestrado que culminou nessa pesquisa de doutorado. Obrigada pela colaboração com esse trabalho através das entrevistas e dos materiais do seu acervo, que foram fundamentais e por ser um grande exemplo para uma arquitetura mais técnica, humana e confortável. Faz muita falta! Agradeço também ao arquiteto José Fernando Minho e ao Eng. Roberto Vitorino, pelas brilhantes entrevistas concedidas. É tão bom ouvir vocês. Muito obrigada!

Aos queridos amigos que Deus na sua infinita bondade fez com que cruzassem o meu caminho nesse período: Aos queridos “bruacos” Dri, Paulinha, Ariel, Pedrão, Ro Jabur e Tássia (Bruuuu) pela amizade tão intensa durante todo esse período. Obrigada pelos incontáveis momentos de descontração, pelo companheirismo tão especial e pelo apoio nos momentos mais difíceis. Saibam que essa amizade foi essencial para tornar a estadia em São Carlos muito mais agradável e suportar toda a saudade que eu sentia de casa. Vocês tem um lugar muito especial no meu coração... sempre!! “amizade para sempre e ainda é muito pouco”... As queridas amigas do ArqTema: Ana Paula, Carol, Kamila, Mari Ferreira, Mari Goulart, Michele e Rosilene, pela presença tão agradável no dia a dia, e por nos momentos de dificuldade vocês pararem tudo pra me ouvir! Podem ter toda a certeza que vou sentir muita falta da nossa rotina na USP. Eu adoro vocês!! Às amigas especiais da pós-graduação da USP: à grande amiga “mito” Cris Bueno que é um ser humano incrível! Obrigada pela compreensão tão verdadeira, pelas conversas tão acolhedoras e por ser sempre essa fonte de alegria e incentivo! A querida Lara pelos almoços tão descontraídos e acolhedores. A Michele Caixeta (Mi) uma amiga que levo pra sempre no coração. Obrigada pela amizade tão verdadeira e pelas inúmeras parcerias que tem dado tão certo! À Carolzinha (Carol Fróes) por me acolher tão bem em sua casa, por ter sempre um olhar sincero e uma palavra amiga. Saiba que isso fez muita diferença nesse período tão longe de casa. Agradeço à querida Nice (Helenice Sacht), pela parceria que me enriquece tanto, pelas correções do texto, pelo incentivo e pela amizade tão especial. À Ferzinha, que jamais vou esquecer as longas viagens para o Paraná e quão divertido era a sua presença aqui em Sanca. A Jô, que pra mim é um exemplo de amiga, mãe, mulher e pesquisadora. Obrigada por ser tão compreensiva sempre! Saibam que levo comigo todos esses momentos tão bons.

À querida Raquel Fonseca pela convivência “bué da fixe” ao longo de todo o período que estive em Lisboa. Obrigada por compartilhar comigo seu gabinete, pela recepção tão calorosa, pelo auxílio nos ensaios no túnel de vento, pelos passeios maravilhosos, pelos agradáveis almoços, pelas frutas tão saborosas e pelas conversas tão acolhedoras. O meu estágio em Lisboa me presenteou com uma amiga pra toda vida! Muito obrigada!

Aos queridos Isabel, Daniel, Lili, Daniel e ao pequeno Rodrigo. Vocês foram fundamentais para que eu suportasse a saudade que senti do Brasil durante os 3 meses de Lisboa. Obrigada pela recepção tão verdadeira, pelo enorme carinho transmitido, pelas inúmeras caronas, pelos jantarezinhos tão “giros”, pelas “ginjinhas”, pelo melhor pastel de Belém, pelos melhores tremoços, pelas corridinhas domingo de manhã, pelas construções de milhares de casas no lego... Vocês foram minha “família” fora de casa. Agradeço também a Cris por ter feito milagre em um dia de Coimbra e pelo fado mais especial de todos; à Ermelinda e ao Cristiano pelo carinho e almoçinho de domingo tão especial; e ao Marco e Sarah pelas conversas de arquitetura e acolhida ao longo desses meses.

Agradeço a querida Leticia Neves que pacientemente respondeu todas as minhas dúvidas. Obrigada por tudo. Agradeço também ao Daniel Cóstola que tanto me ajudou através de incontáveis e-mails e reuniões de Skype. Obrigada por toda troca de conhecimento.

A todos os técnicos do Laboratório de Construção Civil do IAU - USP: Sérgio, Tico, Paulão, Célio, Donizete e Odinei pela convivência tão prazerosa todos os dias. Agradeço em Especial ao Dibo, pela incansável ajuda e enorme disposição na execução das maquetes.

O percurso para o aprendizado da Mecânica dos Fluidos Computacional e do software CFX foi longo e difícil e isso jamais seria possível sem a ajuda de “mestres” do CFX. Agradeço ao Prof. Dr. Paulo Celso Greco, que desde o primeiro dia me recebeu em sua sala com a maior boa vontade. Ao Marcos V. Ribeiro da Aeronáutica da USP de São Carlos, ao João Lameu da FEQ/UNICAMP e ao Dorival Neto do SET/USP, pela enorme paciência que me recebiam todas as vezes que as simulações não convergiam... e olha que foram muitas. Aos queridos Juliana Moraes e Renan Cid pelos longos e-mails trocados e pelas conversas desesperadas que no final terminavam em um alívio indescritível. Meus sinceros agradecimentos.

Ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo (IAU/USP) e a todos os professores dessa instituição, que muito contribuíram para meu

crescimento e aprendizado. Agradeço em especial ao Prof. Dr. Marcio Minto Fabrício pela parceira nos trabalhos paralelos a esse que tanto enriquecem minha formação e à Prof. Dr. Karina Maria Chvatal pela contribuição tão importante ao longo de todos esses anos.

A todos os funcionários do IAU - USP, em especial: Andréia, Alessandro, Debora, Evandro, Fátima, Felipe, João, Lessandro, Osvaldo, Paulo, Sérgio e Zanardi, pela assistência nesses anos. Aos queridos Geraldo, Marcelinho e Mara pela paciência, atenção e momentos de descontração. Sem a ajuda de vocês, tudo ficaria muito mais difícil. Muito Obrigada!

Ao Laboratório de Conforto Ambiental da USP por todo o suporte técnico e ao Pedro Mattia pela ajuda sempre tão prestativa e essencial, principalmente nessa etapa final. Obrigada!

Ao Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Lisboa por disponibilizar toda a sua estrutura física para a realização do estágio de pesquisa no exterior e dos ensaios no túnel de vento. Agradeço em especial ao Cláudio e ao Armênio pela enorme paciência e ajuda com a montagem dos modelos físicos reduzidos. Vocês são verdadeiros artistas!

À Universidade Estadual de Maringá (UEM), que foi essencial na minha formação intelectual. Agradeço também a todos os professores da UEM, em especial: César Imai, meu primeiro orientador e que foi tão fundamental para o meu aprendizado, Gisela Barcellos de Souza, orientadora cujos ensinamentos ainda ecoam na minha vida e Paulo Fernando Soares, que fez com que eu olhasse para a área de conforto ambiental e não quisesse mais sair dela.

Ao Departamento de Aeronáutica da Escola de Engenharia de São Carlos (DEA – USP) por possibilitar a licença do Software CFX.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela Bolsa de Doutorado, pela Bolsa de Estágio de Pesquisa no exterior e por todo o apoio financeiro.

E, finalmente, a todos que colaboraram e participaram desta pesquisa de forma direta ou indireta, os meus sinceros agradecimentos.

"Desistir... eu já pensei seriamente nisso, mas nunca me levei realmente a sério; é que tem mais chão nos meus olhos do que o cansaço nas minhas pernas, mais esperança nos meus passos, do que tristeza nos meus ombros, mais estrada no meu coração do que medo na minha cabeça"

(Cora Coralina)

LUKIANCHUKI, M. A. ***Sheds* extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações**. 2014. 362p. Tese (Doutorado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

RESUMO

A ventilação natural é uma das estratégias mais eficientes para o condicionamento térmico passivo de edificações, ocorrendo por ação dos ventos, por efeito chaminé ou pela combinação de ambos. Em áreas densamente ocupadas, a velocidade do vento é reduzida pelos diversos obstáculos locais, tornando o efeito chaminé e a captação pela cobertura as alternativas mais viáveis para indução da ventilação natural em edificações. Dentre as estratégias de ventilação, destacam-se os *sheds*, aberturas no telhado, que funcionam como captadores ou extratores de ar, dependendo de sua localização em relação aos ventos dominantes. Apesar de terem um grande potencial, são pouco utilizados devido à falta de dados técnicos acessíveis ao projetista. Além disso, muitas vezes são utilizados para captação ou para extração do ar de forma aleatória, sem uma análise da influência dos parâmetros projetuais na ventilação natural. Essa pesquisa parte da hipótese que existe diferença nesses parâmetros para um *shed* extrator e para um *shed* captador de ar e que é possível otimizar a ventilação natural através desses dispositivos. O objetivo geral foi avaliar o impacto de diferentes parâmetros projetuais e climáticos no desempenho de *sheds* captadores e extratores de ar e propor diretrizes para o projeto desses dispositivos. A metodologia foi composta de estudos paramétricos, a fim de investigar a interdependência de diferentes parâmetros projetuais na ventilação natural por *sheds* e realizar análises comparativas. O processo baseou-se em análises numéricas através de simulações CFD e a verificação desses resultados por meio de ensaios experimentais em túnel de vento. As análises mostraram uma boa compatibilidade entre os resultados numéricos e experimentais, obtendo uma diferença de no máximo 10% entre as duas ferramentas para a maioria dos pontos monitorados. Com relação às simulações computacionais, constatou-se que o desempenho de *sheds* é fortemente influenciado pela velocidade e pelos ângulos de

incidência dos ventos externos. Além disso, notou-se que existem diferenças nos parâmetros projetuais para um *shed* extrator e para um captador, sendo que alguns casos apresentaram bons desempenhos em ambas as situações. Por fim, conclui-se que é possível otimizar o uso da ventilação natural através desses dispositivos, sendo que esses resultados auxiliam a prática do projeto arquitetônico na determinação de configurações adequadas.

Palavras-chaves: Ventilação natural. *Sheds*. Simulação computacional CFD. Túnel de vento.

LUKIANCHUKI, M. A. **Air extracting and capturing *sheds* for natural ventilation induction in buildings.** 2014. 362p. Thesis (Doctorate) - Architecture and Urban Design Institute of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2014.

ABSTRACT

Natural ventilation is one of the most important strategies for passive cooling of indoor environments. It can occur by wind forces, stack effect or a combination of both strategies. In urban areas the wind speed is reduced due to several obstacles. Stack effect and air intake by the roof can be viable alternatives to induce natural ventilation in buildings. Among the ventilation strategies, *sheds* can be highlighted. These structures consist of roof openings that work as collectors or extractors of air, depending on their location in relation to the prevailing wind directions. Although they have great potential, they are seldom used by Brazilian architecture, due to lack of technical data available to the designer. Besides, sometimes the *sheds* are used for air intake or exhaustion without any detailed analysis on the influence of different building design parameters on natural ventilation. The starting hypothesis of this research is that there is a difference in construction parameters for an exhaustion and intake *sheds* and it is possible to optimize the use of natural ventilation through these devices. The research aims to investigate the potential of air extracting and capturing *sheds* to promote indoor natural ventilation and proposes guidelines for the design of these devices. The applied methodology consists on parametric studies to investigate the interdependence of different design parameters for natural ventilation in *sheds* and perform comparative analyzes. The procedure was based on CFD simulations and the verification of such results through experimental tests using wind tunnel. The analyses showed a good compatibility between the numerical and experimental results, obtaining a maximum difference of 10% between the two tools for most of the monitored points. The computer simulations showed that *sheds* performance is strongly influenced by the external wind speed and its incidence angles. In addition, it was noted that there are differences in design

parameters for air extracting and capturing *sheds* and some cases showed a good performance in both situations. Finally, it was concluded that it is possible to optimize the use of natural ventilation through these devices, and these results support the practice of architectural design in determining appropriate settings.

Key-words: Natural ventilation. *Sheds*. Computational Fluid Dynamic simulation. Wind tunnel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área equivalente para o cálculo de ventilação cruzada em edifícios térreos.....	45
Figura 2: Movimento do ar pelo efeito chaminé para $t_i > t_e$	47
Figura 3: Perfis do vento em diferentes terrenos	49
Figura 4: Modificações no perfil da velocidade do vento para diferentes tipos de terreno.....	53
Figura 5: Campos de pressão em um cubo.	54
Figura 6: Vena contracta	61
Figura 7: Peitoril ventilado	64
Figura 8: Diferentes formatos do peitoril ventilado	64
Figura 9: Captadores de vento no Oriente Médio	65
Figura 10: Captadores de vento adaptados às caixas d'água	65
Figura 11: Funcionamento da chaminé solar	66
Figura 12: Funcionamento da parede trombe	67
Figura 13: Riola Parish Church – Alvar Aalto.....	68
Figura 14: <i>Sheds</i> ortogonais, conhecidos como “dente de serra”	69
Figura 15: Exemplos dos <i>sheds</i> aerodinâmicos nos edifícios de Lelé	69
Figura 16: <i>Sheds</i> na Disbrave, hospital de Taguatinga e Sede do Planalto de Automóveis.....	70
Figura 17: <i>Sheds</i> (a) clínica DAHER e (b) escolas.....	71
Figura 18: (a) Convento de Brotas e (b) Creches.....	71
Figura 19: (a) Hospital de Taguatinga e (b) <i>Sheds</i> - entrada de ar atrás.....	72
Figura 20: Vista geral do CIAC de Brasília	72
Figura 21: (a) Hospital de Brasília - DF e (b) Sarah de São Luís – MA	73
Figura 22: (a) Corte e (b) <i>sheds</i> do Sarah - Salvador.....	73
Figura 23: (a) Corte e (b) <i>sheds</i> do Sarah – Fortaleza.....	74
Figura 24: Tribunal em Natal - RN.....	74
Figura 25: Tribunal em Aracajú - SE.....	75
Figura 26: Tribunal Regional Eleitoral, Salvador - BA.....	75
Figura 27: Hospital Sarah do Rio de Janeiro.....	76
Figura 28: Localização do shed em relação ao centro do edifício.....	78
Figura 29: modelo analisado na pesquisa de Stathopoulos e Saathoff	78
Figura 30: Pátio com cobertura em <i>sheds</i>	79
Figura 31: <i>Sheds</i> : Salvador, Fortaleza e Tribunal Eleitoral da Bahia.....	80
Figura 32: Modelos avaliados (a) Sarah de Salvador e (b) Sarah Rio	81
Figura 33: Modelos de edifícios com <i>sheds</i> presentes no código europeu	82
Figura 34: Modelo analisado	84
Figura 35: (a) túnel de vento da Unicamp; (b) maquete do Sarah Rio dentro do túnel.....	88
Figura 36: Placa de tubos de PVC para simular a turbulência no túnel de vento.....	89
Figura 37: (a) ensaio de fumaça e b) erosão.....	89
Figura 38: Módulos do CFX com as respectivas atividades	93
Figura 39: Domínio retangular e octogonal com as dimensões exigidas.....	94
Figura 40: RMS de (a) momento e massa e (b) turbulência na simulação	101
Figura 41: Estrutura metodológica das etapas da pesquisa.....	108
Figura 42: Território brasileiro dividido em 8 zonas bioclimáticas.....	110

Figura 43: Ângulos de incidência dos ventos externos analisadas	113
Figura 44: Caso de referência com as dimensões (a) planta baixa e (b) corte	114
Figura 45: Perspectiva do caso de referência	114
Figura 46: Fluxograma resumido com os parâmetros avaliados	124
Figura 47: Construção da geometria no AutoCAD	125
Figura 48: Dimensões adotadas para o domínio retangular.....	126
Figura 49: Definição das <i>Parts</i> do modelo no Icem - CFX.....	127
Figura 50: Vista geral da malha gerada para o caso de referência.....	127
Figura 51: Detalhes da malha gerada para o caso de referência.....	128
Figura 52: Domínio retangular com a determinação das condições de contorno.....	128
Figura 53: Critério de convergência do momento, massa e turbulência na simulação.....	131
Figura 54: Planos vertical e horizontal utilizados nas análises	132
Figura 55: Localização dos pontos para medição da velocidade do ar.....	133
Figura 56: Pontos de medição dos Cps e da velocidade do ar nas aberturas do modelo ...	133
Figura 57: Vistas externas e interna do túnel de vento do LNEC	134
Figura 58: Peças cortadas na cortadora a laser ULS – IAU/USP	136
Figura 59: Modelo do caso de referência– sem escala.....	136
Figura 60: Geometria quatro: caso base	137
Figura 61: Geometria quatro: caso 01	137
Figura 62: Geometria quatro: caso 02.....	137
Figura 63: Dimensão dos pináculos utilizados no ensaio I da CLA	139
Figura 64: Elementos de rugosidade no túnel de vento (a) planta e (b) corte.....	140
Figura 65: Elementos de rugosidade no túnel de vento	140
Figura 66: Medições de pressão dinâmica para registrar a camada limite.....	141
Figura 67: Equipamentos utilizados nas medições da CLA)	141
Figura 68: Tomadas de pressão no caso de referência inicial.....	142
Figura 69: Tubo de pitot no interior do túnel.....	142
Figura 70: Micromanômetro de pressão	142
Figura 71: Modelo instrumentado dentro do túnel de vento	143
Figura 72: medição dos Cps nas aberturas do modelo	143
Figura 73: Sistema de aquisição de dados dedicado DTC Initium.....	143
Figura 74: Processo de calibração.....	144
Figura 75: Anemômetro de fio quente	145
Figura 76: Medições de velocidade do ar	146
Figura 77: Ensaio qualitativos com fios de lã (.	148
Figura 78: Fluxograma dos parâmetros testados.....	150
Figura 79: Perfis da Camada Limite Atmosférica (CLA) nas simulações CFD.....	157
Figura 80: Trajetória do fluxo de ar no CR para 0° (a) CFX e (b) túnel de vento	159
Figura 81: Trajetória do fluxo de ar no CR para 45° (a) CFX e (b) túnel de vento	160
Figura 82: Trajetória do fluxo de ar no CR para 90° (a) CFX e (b) túnel de vento	160
Figura 83: Trajetória do fluxo de ar no CR para 180° (a) CFX e (b) túnel de vento	161
Figura 84: Distribuição do fluxo de ar no ambiente interno e ao redor dos <i>sheds</i>	171
Figura 85: Velocidade do ar para 0° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.....	176
Figura 86: Velocidade do ar para 45° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.....	176
Figura 87: Vetores de velocidade do ar para o CR, G01, G02, G03 e G04 - 0°.....	178
Figura 88: Vetores de velocidade do ar (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03, (e) G04 e (f) detalhe da recirculação de ar – ângulo de 45°	179
Figura 89: Velocidade do ar para 90° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.....	181

Figura 90: Velocidade de ar para 180° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.....	182
Figura 91: Velocidade para 135° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.....	182
Figura 92: Vetores de velocidade do ar (a) CR e (b) G01 - ângulo de 180°	184
Figura 93: Vetores de velocidade do ar (a) G02 e (b) G04 - ângulo de 180°	184
Figura 94: Vetores de velocidade do ar G03 - ângulo de 180°	185
Figura 95: Vetores de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 0° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.....	192
Figura 96: Contorno de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 45° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.	192
Figura 97: Contorno de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 90° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.	193
Figura 98: Contorno de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 135° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.	194
Figura 99: Vetores de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 135° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.	194
Figura 100: Vetores de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 180° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.	195
Figura 101: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 0°.	201
Figura 102: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 45°. ...	202
Figura 103: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 90°. ...	203
Figura 104: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 135°. ...	204
Figura 105: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 180°. ...	205
Figura 106: Vetores de velocidade do ar para o CR - 0° (a) CS, (b) CS5 e (c) CS7	210
Figura 107: Vetores de velocidade do ar para G03 - 0° (a) CS, (b) CS5 e (c) CS7	211
Figura 108: Vetores de velocidade do ar para G04 - 0° (a) CS, (b) CS5 e (c) CS7	212
Figura 109: vetores de velocidade do ar para 90° (a) CA, (b) CS5 e (c) CS7	213
Figura 110: Vetores de velocidade do ar para CR - 180° (a) CS, (b) CS5 e (c) CS7	214
Figura 111: Vetores de velocidade do ar para G03 - 180° (a) CS, (b) CS5 e (c) CS7	215
Figura 112: Vetores de velocidade do ar para G04 - 180° (a) CS, (b) CS5 e (c) CS7	216
Figura 113: Vetores de velocidade no CR, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d)CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 0°	222
Figura 114: Vetores de velocidade na G03, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d)CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 0°	223
Figura 115: Vetores de velocidade na G04, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d)CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 0°	224
Figura 116: Vetores de velocidade no CR, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d)CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 90°	226
Figura 117: Vetores de velocidade no CR, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d)CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 180°	228
Figura 118: Vetores de velocidade na G03, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d)CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 180°	229
Figura 119: Vetores de velocidade na G04, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d)CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 180°	230
Figura 120: Vetores velocidade do ar para 0° (a) CB, (b) C01 e (c) C02	237
Figura 121: Velocidade do ar para 90° (a) CB, (b) C01 e (c) C02 para o CR, G03 e G04	238
Figura 122: Vetores velocidade para 180° (a) CB, (b) C01 e (c) C02 para o CR, G03 e G04.....	240

Figura 123: Vetores de velocidade no meio das aberturas dos sheds para o caso de referência, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 0°	247
Figura 124: Vetores de velocidade no meio das aberturas dos <i>sheds</i> para a geometria três, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 0°	248
Figura 125: Vetores de velocidade no meio das aberturas dos <i>sheds</i> para a geometria quatro, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 0°	249
Figura 126: Vetores de velocidade no meio das aberturas dos <i>sheds</i> para o caso de referência, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 90°	251
Figura 127: Vetores de velocidade no meio das aberturas dos <i>sheds</i> para a geometria três, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 90°	252
Figura 128: Vetores de velocidade no meio das aberturas dos <i>sheds</i> para a geometria quatro, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 90°	253
Figura 129: Vetores de velocidade no meio das aberturas dos <i>sheds</i> para o caso de referência, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 180°	255
Figura 130: Vetores de velocidade no meio das aberturas dos <i>sheds</i> para a geometria três, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 180°	256
Figura 131: Vetores de velocidade no meio das aberturas dos <i>sheds</i> para a geometria quatro, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 0°	257
Figura 132: Resultados numérico e experimental do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar no CS7 para os ângulos de (a) 0° e (b) 45°	261
Figura 133: Resultados numérico e experimental do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar no CAD2 para os ângulos de (a) 0° e (b) 45°	262
Figura 134: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída do CAD3 de ar para os ângulos de incidência de (a) 0° e (b) 45°	263
Figura 135: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar para o ângulo de incidência de 90° (a) CS7, (b) CAD2 e (c) CAD3.	264
Figura 136: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar do CS7 para os ângulos de (a) 135° e (b) 180°	265
Figura 137: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar do CAD2 para os ângulos de incidência de (a) 135° e (b) 180°	266
Figura 138: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar do CAD3 para os ângulos de incidência de (a) 135° e (b) 180°	267
Figura 139: Malha fina gerada para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10	350
Figura 140: Valores de y^+ para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - malha fina	350
Figura 141: Níveis de convergência para refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10	350
Figura 142: Malha média gerada para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10.	350
Figura 143: Valores de y^+ para refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - média	350
Figura 144: Níveis de convergência para refinamentos (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - média.	351
Figura 145: Malha básica gerada para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10.	351
Figura 146: Valores de y^+ para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - básica	351
Figura 147: Níveis de convergência para refinamentos (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - básica.	351
Figura 148: Corte da malha básica com elementos prismáticos no edifício	353
Figura 149: Níveis de convergência para a malha básica tetraédricas com prismas	353
Figura 150: Valores de y^+ para a malha básica tetraédricas prismáticas	353
Figura 151: Níveis de convergência e valores do y^+ para a malha média com prismas	353

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Efeitos da velocidade do ar sobre os seres humanos	42
Tabela 2: Coeficientes de acordo com as características do terreno	51
Tabela 3: Comprimento de rugosidade segundo o meio	51
Tabela 4: Altura da rugosidade e classe	52
Tabela 5: Parâmetros que afetam a distribuição dos Cps	56
Tabela 6: Valores propostos para C_d	63
Tabela 7: Síntese dos resultados das simulações	83
Tabela 8: Resumo de pesquisas desenvolvidas sobre <i>sheds</i>	86
Tabela 9: Entrevistas realizadas	109
Tabela 10: Recomendações do uso da ventilação natural pela NBR 15220-3	110
Tabela 11: Cidades representativas do zoneamento bioclimático brasileiro	111
Tabela 12: Dados climáticos médios das cidades selecionadas de 2002 a 2011	111
Tabela 13: Velocidade dos ventos para as cidades selecionadas	112
Tabela 14: Configuração do caso de referência utilizado na análise paramétrica	114
Tabela 15: Parâmetros da simulação inseridos no CFX-Pre	129
Tabela 16: Dados do modelo original e do modelo reduzido	135
Tabela 17: Dados definitivos de dimensionamento dos pináculos	139
Tabela 18: Pressão dinâmica média (Pa) e velocidade média correspondente (m/s) para cada altura z (cm) da camada limite atmosférica gerada no túnel de vento	156
Tabela 19: Cps médios nas aberturas do CR, no túnel de vento e nas simulações CFD	162
Tabela 20: Velocidade média do fluxo de ar interno na zona de ocupação dos usuários em relação à velocidade dos ventos externos (U/U_{ref}) para todas as geometrias analisadas ..	170
Tabela 21: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> extratores e captadores de ar	187
Tabela 22: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> extratores de ar	196
Tabela 23: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> captadores de ar	197
Tabela 24: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> extratores de ar	206
Tabela 25: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> extratores de ar	207
Tabela 26: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> extratores de ar	217
Tabela 27: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> extratores de ar	218
Tabela 28: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> captadores de ar	232
Tabela 29: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> extratores de ar	233
Tabela 30: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> captadores de ar	241
Tabela 31: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> extratores de ar	242
Tabela 32: Vazão mássica em função das áreas das aberturas e dos Cps, para CR	250
Tabela 33: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> extratores de ar	258
Tabela 34: Desempenho da ventilação natural de <i>sheds</i> captadores de ar	259
Tabela 35: Casos do grupo 01: geometria dos <i>sheds</i>	279
Tabela 36: Casos do grupo 02: variação das aberturas de entrada e saída de ar	280

Tabela 37: Casos do grupo 03: abertura, distância e alinhamento dos <i>sheds</i>	281
Tabela 38: Limites de aceitabilidade da velocidade do ar nos ambientes internos	284
Tabela 39: Estratégias projetuais e limites de aceitabilidade da velocidade interna do ar ..	291
Tabela 40: Diferentes parâmetros projetuais analisados para extração/captação	303
Tabela 41: Rosa dos ventos para as cidades selecionadas	339
Tabela 42: Resumo dos dados climáticos das cidades selecionadas nos últimos 10 anos	341
Tabela 43: Parâmetros recorrentes nos edifícios de Lelé	343
Tabela 44: Proporções dos edifícios com <i>sheds</i> _Arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé	344
Tabela 45: Síntese dos testes com as malhas tetraédricas	349
Tabela 46: Síntese dos testes com as malhas tetraédricas com elementos prismáticos.....	352
Tabela 47: Informações sobre as malhas geradas para cada geometria analisada	355
Tabela 48: Dados de convergência e y^+ da simulação do caso de referência	356
Tabela 49: Resumo de normas de ventilação	361

LISTA DE GRÁFICOS

Gráficos 1 e 2: Fluxo de ar em função da diferença de temperatura entre o ar interno e externo e das distâncias verticais entre as aberturas de entrada e saída de ar.....	48
Gráfico 3: Gráfico de calibração do anemômetro de fio quente Airflow™ TA5	145
Gráfico 4: Valores de y^+ em função dos parâmetros da malha computacional	151
Gráfico 5: Nível de convergência atingido em cada teste realizado	151
Gráfico 6: Variação dos valores dos Cps nas aberturas do caso de referência em relação à alteração dos elementos da malha e ao aumento do valor de y_{plus}	153
Gráfico 7: Comparação do perfil da Camada Limite Atmosférica (CLA) obtida nesse trabalho com o de Castanho (2012) e o estabelecido pela literatura especializada	157
Gráfico 8: Perfis da Camada Limite Atmosférica (CLA) nas simulações CFD – ângulo de 0°.	158
Gráfico 9: Comparação dos Cps nas aberturas do caso de referência, em função dos ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°, adquiridos através de ensaios no túnel de vento e simulações CFD.	163
Gráfico 10: Cps nas aberturas do CR, adquiridos através de ensaios no túnel de vento e simulações CFD. As linhas pontilhadas indicam a porcentagem de erro de 10%.	164
Gráfico 11: Variações nas taxas de renovação de ar em função dos ângulos de incidência dos ventos, entre os resultados adquiridos no túnel de vento e no CFX.	165
Gráfico 12: Velocidade do fluxo de ar ao longo do espaço interno para diferentes velocidades (a) 1,5m/s, (b) 3,0m/s e (c) 7,0m/s e ângulos de incidência do vento externo.	169
Gráfico 13: Taxas de renovação de ar/hora em função da velocidade dos ventos externos, para os diferentes ângulos de incidência dos ventos em todas as geometrias analisadas.	172
Gráfico 14: Taxas de renovações de ar/hora em função dos ângulos de incidência dos ventos externos, para cada geometria analisada.....	173
Gráfico 15: Variação da taxa de renovação de ar/hora (%) para cada geometria	173
Gráfico 16: Cps nas aberturas de entrada e saída de ar em função dos ângulos de incidência dos ventos, para cada geometria (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.	174
Gráfico 17: Taxa de renovação de ar/hora em função do aumento de A_1 , para CR, G03 e G04, nos cinco ângulos de incidência analisados.....	189
Gráfico 18: Variação da taxa de renovação de ar, em função de CA, para CR, G03 e G04 e para os cinco ângulos de incidência dos ventos.....	189
Gráfico 19: Coeficientes de pressão (C_p) médios nas aberturas de entrada e saída de ar para CR, G03 e G04, em função do aumento da abertura A_1 , para os cinco ângulos de incidência dos ventos externos analisados.	190
Gráfico 20: Taxa de renovação/hora em função do aumento de S1, S2 e S3, para CR, G03 e G04, para os ângulos de incidência analisados.....	198
Gráfico 21: Variação da taxa de renovação de ar, em função de CA, para CR, G03 e G04 e para os cinco ângulos de incidência dos ventos.....	198
Gráfico 22: C_p nas aberturas de entrada e saída de ar para CR, G03 e G04, em função do aumento das aberturas S1, S2 e S3, para os diferentes ângulos de incidência dos ventos....	199
Gráfico 23: Taxa de renovação de ar/hora em função do aumento do número de <i>sheds</i> , para diferentes ângulos de incidência analisados.	208
Gráfico 24: Variação da taxa de renovação de ar/hora em função de CA (03 <i>sheds</i>), para diferentes ângulos de incidência dos ventos externos, em cada geometria analisada.	208
Gráfico 25: Coeficientes de pressão nas aberturas em função do aumento do número de <i>sheds</i> , para diferentes ângulos de incidência dos ventos	209

Gráfico 26: Taxa de renovação de ar/hora em função do aumento da distância entre os <i>sheds</i> , para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada..	220
Gráfico 27: Variação da taxa de renovação de ar em função do aumento da distância entre <i>sheds</i> , para diferentes ângulos de incidência dos ventos	220
Gráfico 28: Coeficientes de pressão médio nas aberturas em função do aumento da distância entre os <i>sheds</i> para diferentes ângulos de incidência dos ventos	221
Gráfico 29: Taxa de renovação de ar/hora em função do aumento da distância entre os <i>sheds</i> , para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada..	234
Gráfico 30: Variação (%) da taxa de renovação de ar em função do aumento da distância entre os <i>sheds</i> , para diferentes ângulos de incidência dos ventos	234
Gráfico 31: Coeficientes de pressão médios nas aberturas em função do aumento da distância entre os <i>sheds</i> mantendo a área total das aberturas desses dispositivos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada.....	235
Gráfico 32: Taxa de renovação de ar em função do alinhamento dos <i>sheds</i> e do aumento da distância entre esses dispositivos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos.....	244
Gráfico 33: Variação (%) nas taxas de renovação de ar em função do alinhamento dos <i>sheds</i> e do aumento da distância entre esses dispositivos	244
Gráfico 34: Coeficientes de pressão nas aberturas para o CR, C01, C02, C03 e C04, para diferentes ângulos de incidência dos ventos externos analisados	245
Gráfico 35: Cps nas aberturas do CS7, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para os ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.....	268
Gráfico 36: Cps nas aberturas do CAD2, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para os ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.....	269
Gráfico 37: Cps nas aberturas do CAD3, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para os ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.....	270
Gráfico 38: Comparação entre os valores de Cp nas aberturas, medidos através de ensaios no túnel de vento e simulações CFD para (a) CS7, (b) CAD2 e (c) CAD3,.....	271
Gráfico 39: Velocidade média nas aberturas do CS7, em função da velocidade externa de referência, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.	273
Gráfico 40: Velocidade média nas aberturas do CAD2, em função da velocidade externa de referência na cota da cobertura, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.	274
Gráfico 41: Velocidade média nas aberturas do CAD3, em função da velocidade externa de referência na cota da cobertura, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.	275
Gráfico 42: Comparação entre os valores de U/Uref nas aberturas, medidos através de ensaios no túnel de vento e simulações CFD para (a) CS7, (b) CAD2 e (c) CAD3,	276
Gráfico 43: Velocidade média do ar no ambiente interno para o grupo 1, indicando os limites de aceitabilidade da velocidade do ar interno, em função da velocidade dos ventos externos (m/s), para os <i>sheds</i> extratores e captadores de ar.	285
Gráfico 44: Velocidade média do ar interno para o grupo 2, indicando os limites de aceitabilidade da velocidade do ar interno, em função da velocidade dos ventos externos (m/s), para os <i>sheds</i> extratores e captadores de ar.	286
Gráfico 45: Velocidade média do ar no ambiente interno para o grupo 3, indicando os limites de aceitabilidade da velocidade do ar interno, em função da velocidade dos ventos externos (m/s), para os <i>sheds</i> extratores e captadores de ar.	287
Gráfico 46: Taxas de renovação de ar para <i>sheds</i> extratores de ar	294
Gráfico 47: Variação (%) nas taxas de renovação de ar para <i>sheds</i> extratores de ar.....	295
Gráfico 48: Taxas de renovação e para <i>sheds</i> captadores de ar.....	298
Gráfico 49: Variação (%) nas taxas de renovação de a para <i>sheds</i> captadores de ar	299
Gráfico 50: Proporções das distâncias entre os <i>sheds</i> nos edifícios do arquiteto Lelé	346

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área efetiva ou equivalente do conjunto de aberturas para ventilação	m^2
A_e	Área de entrada do ar	m^2
A_s	Área de saída do ar	m^2
C_d	Coeficiente de descarga das aberturas	adimensional
C_p	Coeficiente de pressão	adimensional
ΔC_p	Diferença dos coeficientes de pressão nas aberturas	adimensional
Q_{vent}	Carga térmica transferida pela ventilação	W/h
Q	Vazão volumétrica	m^3/s
N	Taxa de renovação de ar/hora	renov/h
Δt	Diferença de temperatura do ar interno e externo	$^{\circ}C$
V	Volume do recinto	m^3
U	Velocidade do ar/vento a uma determinada altura	m/s
U_{ref}	Velocidade do vento em uma cota de referência	m/s
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
ΔZ_{NPN}	Distância entre o ponto central da entrada e o nível de pressão neutra	m
ΔPh	perda de pressão	Pa
Δh	perda de carga	mca
T_i	Temperatura do ar interno	$^{\circ}C$
T_e	Temperatura do ar externo	$^{\circ}C$
h	Altura determinada do edifício	m
h_{ref}	Altura de referência da velocidade do vento medida	m
α	Expoente de lei potencia da CLA	adimensional
k	Coeficiente segundo a rugosidade da superfície do terreno	adimensional
Z_0	Rugosidade da superfície do solo	adimensional
P_x	Pressão em um determinado ponto da envoltória do edifício	Pa

P_e	Pressão estática de referência, do fluxo de ar não perturbado	Pa
P_d	Pressão dinâmica do vento não perturbado	Pa
P_t	Pressão total	Pa
ρ	Massa específica do ar	kg/m ³
ζ	Coeficiente de perda de carga	adimensional
k	Constante de Karman	adimensional
Re	número de Reynolds	adimensional
L	comprimento característico	m
μ	viscosidade dinâmica	kg/ms

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AS	<i>Australian Standard</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers</i>
BRE	<i>Building Research Establishment</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i>
EN	<i>Norme Européenne</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
IAU	Instituto de Arquitetura e Urbanismo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NBR	Norma Brasileira
USP	Universidade de São Paulo
ZB	Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	35
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	35
1.2 OBJETIVO GERAL	37
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	37
1.4 ESTRUTURA DA TESE	38
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
2.1 VENTILAÇÃO NATURAL NAS EDIFICAÇÕES	41
2.1.1 Características gerais	41
2.1.2 As ações indutoras da ventilação natural	43
2.1.2.1 Ventilação natural por ação dos ventos	44
2.1.2.2 Ventilação natural pelo efeito chaminé	46
2.1.2.3 Camada Limite Atmosférica (CLA)	48
2.1.3 Parâmetros para estimativa da Ventilação natural	53
2.1.3.1 Coeficientes de pressão (C_p)	54
2.1.3.2 Coeficientes de perda de carga	58
2.1.3.3 Coeficientes de descarga	61
2.2 ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE VENTILAÇÃO NATURAL	63
2.2.1 Peitoril ventilado	63
2.2.2 Torres de vento	64
2.2.3 Chaminé solar	66
2.2.4 Parede trombe	67
2.3 VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES: O USO DE <i>SHEDS</i>	68
2.3.1 Os <i>sheds</i> no trabalho do arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé	69
2.3.1.1 Os primeiros <i>sheds</i>	70
2.3.1.2 <i>Sheds</i> aerodinâmicos	72
2.3.2 Pesquisas desenvolvidas sobre <i>sheds</i>	77
2.4 FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL	88
2.4.1 Túnel de vento	88
2.4.2 Softwares de dinâmica dos fluídos computacional (CFD)	90
2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: O SOFTWARE ANSYS CFX	91
2.5.1 A estrutura do Ansys CFX	92
2.5.2 Icem CFX	93

2.5.2.1 Construção da geometria.....	93
2.5.2.2 Definição das Parts	94
2.5.2.3 Determinação da malha	95
2.5.3 CFX - PRE	96
2.5.3.1 Condições iniciais.....	96
2.5.3.2 Condições de contorno.....	97
2.5.3.3 Controle de solução: convergência	99
2.5.4 CFX – SOLVER (EQUATION SOLVING)	101
2.5.5 CFX – Post	101
2.5.6 RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS: CFD E TÚNEL DE VENTO	102

3. METODOLOGIA

3.1 ETAPA DE PREPARAÇÃO	108
3.1.1 Levantamento de dados.....	108
3.1.2 Seleção dos dados climáticos	110
3.1.3 Definição do caso de referência	113
3.1.4 Parâmetros de projetos analisados	115
3.2 ETAPA NUMÉRICA.....	124
3.2.1 Confecção do modelo	125
3.2.2 Definição das parts	126
3.2.3 Geração da malha computacional.....	127
3.2.4 Definição das condições iniciais e de contorno.....	128
3.2.5 Resolução das simulações	131
3.2.6 Traamento dos resultados	132
3.3 ETAPA EXPERIMENTAL	133
3.3.1 A construção do modelo físico reduzido	134
3.3.2 Técnica experimental de simulação da camada limite atmosférica.....	138
3.3.3 Ensaios quantitativos para determinação de coeficientes de pressão	142
3.3.4 Calibração dos equipamentos.....	144
3.3.5 Ensaios quantitativos para determinação da velocidade do ar.....	145
3.3.6 Ensaios qualitativos: trajetória do ar por fumaça e fios de lã	146

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 SIMULAÇÕES CFD: ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DA QUALIDADE DA MALHA	149
4.2 ETAPA DE VERIFICAÇÃO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E TÚNEL DE VENTO	154
4.2.1 Técnica experimental de simulação da camada limite atmosférica.....	155
4.2.2 Verificação qualitativa: análises dos fluxos de ar.....	158
4.2.3 Verificação quantitativa: coeficientes de pressão nas aberturas.....	162

4.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	168
4.3.1 Variação na geometria dos <i>sheds</i>	168
4.3.1.1 Desempenho sob diferentes velocidades dos ventos externos	168
4.3.1.2 Desempenho sob diferentes ângulos de incidência dos ventos	172
4.3.1.2.1 <i>Sheds</i> extratores de ar.....	174
4.3.1.2.2 Situação neutra.....	180
4.3.1.2.3 <i>Sheds</i> captadores de ar.....	181
4.3.1.2.4 Análise geral.....	185
4.3.2 Variação na dimensão da abertura A1	188
4.3.2.1 <i>Sheds</i> extratores de ar	191
4.3.2.2 Situação neutra.....	192
4.3.2.3 <i>Sheds</i> captadores de ar	193
4.3.2.4 Análise geral	195
4.3.3 Variação nas aberturas dos sheds.....	197
4.3.3.1 <i>Sheds</i> extratores de ar	200
4.3.3.2 Situação neutra.....	202
4.3.3.3 <i>Sheds</i> captadores de ar	203
4.3.3.4 Análise geral	205
4.3.4 Variação no número de sheds.....	207
4.3.4.1 <i>Sheds</i> extratores de ar	210
4.3.4.2 Situação neutra.....	213
4.3.4.3 <i>Sheds</i> captadores de ar	213
4.3.5 Variação na distância entre os sheds alterando a área total das aberturas na cobertura.....	219
4.3.5.1 <i>Sheds</i> extratores de ar	219
4.3.5.2 Situação neutra.....	225
4.3.5.3 <i>Sheds</i> captadores de ar	227
4.3.5.4 Análise geral	231
4.3.6 Variação na distância entre os sheds mantendo a área total das aberturas na cobertura.....	233
4.3.6.1 <i>Sheds</i> extratores de ar	236
4.3.6.2 Situação neutra.....	237
4.3.6.3 <i>Sheds</i> captadores de ar	238
4.3.7 Variação na distância e no alinhamento entre os sheds.....	243
4.3.7.1 <i>Sheds</i> extratores de ar	246
4.3.7.2 Situação neutra.....	250
4.3.7.3 <i>Sheds</i> captadores de ar	254

4.3.7.4 Análise geral.....	258
4.4 MODELOS OTIMIZADOS: RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS	260
4.4.1 Análise qualitativa: Trajetória do fluxo de ar interno	261
4.4.2 Análise quantitativa: Cps e velocidade do ar nas aberturas	268
5. DIRETRIZES PROJETUAIS: SHEDS EXTRATORES E CAPTADORES DE AR	279
5.1 ESTRATÉGIAS DE PROJETO E O CONFORTO ADAPTATIVO	283
5.1.1 <i>Sheds</i> extratores de ar	288
5.1.2 <i>Sheds</i> captadores de ar	289
5.2 RECOMENDAÇÕES DO USO DE SHEDS EXTRATORES E CAPTADORES DE AR	293
5.2.1 <i>Sheds</i> extratores de ar	293
5.2.2 <i>Sheds</i> captadpres de ar	297
5.2.3 <i>Sheds</i> extratores e captadores de ar	302
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	307
6.1 O USO DE SOFTWARES CFD EM ANÁLISES DE VENTILAÇÃO NATURAL	307
6.2 VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS COM OS EXPERIMENTAIS	308
6.3 SHEDS EXTRATORES E CAPTADORES DE AR PARA VENTILAÇÃO NATURAL	308
6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	312
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	313
8. APÊNDICES	325
8.1 EDIFÍCIOS COM <i>SHEDS</i> PROJETADOS PELO ARQUITETO LELÉ.....	325
8.2 LEVANTAMENTO NO CTRS: DETALHAMENTO DOS PROJETOS DE LELÉ	335
8.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS CLIMÁTICOS.....	338
8.4 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DOS EDIFÍCIOS DO ARQUITETO LELÉ.....	343
8.5 FLUXOGRAMA GERAL COM OS PARÂMETROS ANALISADOS	347
8.6 SIMULAÇÕES CFD: ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DE QUALIDADE DA MALHA.....	349
8.7 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS NO CFX: PARÂMETROS DA MALHA	355
8.8 TAXAS DE VENTILAÇÃO DE NORMAS INTERNACIONAIS	361

Introdução

capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A ventilação natural consiste no deslocamento de ar através do edifício, pela disposição de aberturas em suas fachadas, originado por diferenças de pressão entre as áreas externas e internas. Essa estratégia pode ocorrer de duas formas distintas: o movimento do ar produzido pela ação dos ventos ou pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior (efeito chaminé). Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014) o Brasil, devido ao seu imenso território e por se localizar entre dois trópicos, possui um clima bastante variado. Cândido et al. (2010) destaca que grande parte do território brasileiro é classificado como tendo um clima quente e úmido, onde a ventilação natural é uma eficiente estratégia para a obtenção de conforto térmico, reduzindo o consumo de energia elétrica. No entanto, apesar desses aspectos favoráveis, o número de edifícios utilizando sistemas de ar condicionado para o resfriamento tem crescido drasticamente.

O uso dessa estratégia é, muitas vezes, prejudicado em regiões onde não há ventos externos. Isso ocorre em regiões com ventos de fraca intensidade ou pela falta de espaços adequados para a circulação de ar dentro da malha urbana, devido à existência de obstáculos externos que os bloqueiam. Isso pode ser melhorado de duas formas: 1) ventilação pelo efeito chaminé, que consiste na formação de uma coluna ascendente de ar e sua exaustão pela cobertura, devido à diferença de temperatura entre o interior e o exterior; 2) uso de captadores de ar acima do plano da cobertura, cujas obstruções à circulação do vento são menores, possibilitando correntes de ar com maior velocidade.

Uma das soluções de ventilação natural ao nível do telhado são os *sheds* que funcionam como captadores ou extratores de ar, dependendo de sua localização em relação aos ventos dominantes. No entanto, apesar de terem um grande potencial, são pouco explorados pela arquitetura nacional (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006). Segundo Lôbo e Bittencourt (2003), isso provavelmente ocorre devido ao pouco conhecimento científico sobre o funcionamento dos *sheds* e à falta de dados técnicos acessíveis aos projetistas,

induzindo ao erro ou ao não uso desse dispositivo. Além disso, nota-se que na maioria dos casos, os *sheds* são utilizados para extração ou para captação de forma aleatória, sem uma análise da influência dos diferentes parâmetros projetuais na ventilação natural.

Apesar desse cenário, destaca-se o trabalho do arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé¹, cujos *sheds* como captadores ou extratores estão presentes na maioria dos seus projetos. A disposição desses dispositivos em seus edifícios não possui uma regra básica. Baseado nas suas experiências e nos fatores climáticos locais, em determinados momentos ele prioriza a extração do ar através do efeito chaminé e em outros, a entrada dos ventos naturais.

Lelé projeta *sheds* há quase 50 anos² e buscando melhorar a eficiência desses dispositivos, com relação à ventilação natural, a cada novo edifício, parâmetros projetuais, como a geometria dos *sheds*, foram modificados. Essas alterações foram realizadas através de estudos empíricos, o que é válido diante da enorme experiência que ele foi adquirindo ao longo dos anos, com relação ao uso de *sheds* para a ventilação (LUKIENTCHUKI, 2010). No entanto, para um maior conhecimento do desempenho desses dispositivos é importante o conhecimento de parâmetros quantitativos como os coeficientes de pressão (C_p).

Segundo Yang (2004), os valores de C_p s disponíveis na literatura são para um número limitado de configurações geométricas de edifícios. Em geral, somente formas muito simples, como cubos e paralelepípedos com telhado plano ou em declive, podem ser encontrados. Edifícios reais com geometrias complexas, como os *sheds*, que fazem muita diferença nos valores de C_p s, não são considerados. Além disso, geralmente os dados apresentados se referem a valores médios de C_p nas fachadas, o que, segundo Cóstola e Alucci (2007), podem ocultar importantes informações. Sobre isso, Hien (2000) coloca que paredes com C_p s médios geralmente não possuem a precisão necessária para modelos de fluxo multi-zona, o que reforça a necessidade da mensuração dos valores desse parâmetro em edifícios de geometrias diferenciadas.

Através do levantamento bibliográfico realizado, notou-se que a grande maioria das publicações encontradas sobre o assunto são estrangeiras e referem-se apenas ao *shed*

¹ Desde o início de sua trajetória profissional, Lelé incorpora fortemente a ventilação natural em seus projetos através de estratégias criativas e sofisticadas, atuando, principalmente, em regiões de clima quente-úmido.

² O primeiro edifício de Lelé onde esses dispositivos apareceram foi em 1965, na Sede da Disbrave em Brasília.

com formato ortogonal, sem considerar diferentes variações geométricas. Grande parte desses trabalhos está relacionada ao uso de *sheds* para incorporar a iluminação natural nos ambientes internos e poucas pesquisas investigam o potencial desse dispositivo para extração e para a captação do ar. Além disso, a maioria das pesquisas relacionadas à análise dos ventos nesses dispositivos e, que envolvem a aferição dos Cps, está relacionada à análise estrutural das cargas dos ventos e não ao potencial do uso da ventilação natural. Diante desse cenário, evidencia-se a demanda por pesquisas sobre *sheds* para ventilação natural em climas quentes e úmidos, como ocorre na maior parte do território brasileiro.

Este trabalho contribui no aprofundamento da investigação de estratégias de ventilação natural nos edifícios. Possui como tema central a análise do potencial de uso dos *sheds* extratores e captadores de ar, para promover a ventilação natural em edificações. A pesquisa parte da hipótese que existe diferença nos parâmetros projetuais para um shed extrator e para um shed captador de ar e que é possível otimizar o uso da ventilação natural através desses dispositivos.

1.2 OBJETIVO GERAL

Essa pesquisa tem como objetivo geral avaliar o impacto de diferentes parâmetros projetuais e climáticos no desempenho de *sheds* captadores e extratores de ar e propor diretrizes para o projeto desses dispositivos. Através dessa nova abordagem, pretende-se avaliar em que condições ele extrai e capta melhor os ventos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o impacto que o uso de *sheds* captadores e extratores de ar proporciona na ventilação natural em ambientes internos.
- Determinar parâmetros projetuais e climáticos que influenciam no desempenho de *sheds* extratores e captadores de ar e selecionar as configurações que apresentam melhor desempenho para a ventilação natural.

- Verificar a compatibilidade entre os resultados numéricos e experimentais, a fim de comparar diferentes ferramentas metodológicas com relação à ventilação natural.
- Elaborar diretrizes para o projeto de *sheds* extratores e captadores de ar e fornecer informações técnicas sobre esses dispositivos, ainda não disponíveis na literatura.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho de pesquisa está estruturado em cinco partes distintas. A primeira é constituída pelos capítulos 1 e 2. No capítulo 1 tem-se a introdução, motivação pela pesquisa, hipótese da tese, objetivos gerais e específicos e a estrutura do trabalho. No capítulo seguinte apresenta-se a revisão bibliográfica com os conceitos gerais e principais tópicos sobre a ventilação natural. Posteriormente, foram listadas pesquisas nacionais e estrangeiras desenvolvidas sobre *sheds*, abordando o trabalho do arquiteto Lelé. Em seguida, as ferramentas de avaliação da ventilação natural são apresentadas, destacando os ensaios no túnel de vento e as simulações computacionais por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) com o *software* CFX. Por fim, discutem-se os resultados encontrados em trabalhos desenvolvidos sobre a validação das simulações CFD por meio de ensaios experimentais em túnel de vento.

A segunda parte, que é constituída pelo capítulo 3, refere-se à metodologia adotada para o desenvolvimento desta pesquisa. Apresentam-se o levantamento de dados realizado; a definição do caso de referência e dos parâmetros de projeto avaliados; a simulação computacional através do uso do *software* CFX e os procedimentos adotados para a realização dos ensaios no túnel de vento.

Na terceira parte, que é constituída pelo capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados, dividido nos seguintes subcapítulos: análise de sensibilidade da qualidade da malha computacional; etapa de verificação das simulações CFD do caso de referência com ensaios experimentais no túnel de vento; análise paramétrica através de simulações computacionais e verificação dos resultados numéricos com os experimentais dos modelos otimizados.

A quarta parte se refere ao capítulo 5, onde são apresentadas e discutidas as diretrizes e recomendações para o projeto de *sheds* extratores e captadores de ar. Por fim, a quinta parte é constituída pelos capítulos 6, 7 e 8, que se referem às considerações finais, as referências bibliográficas e aos apêndices, respectivamente.

Revisão bibliográfica

capítulo 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VENTILAÇÃO NATURAL NAS EDIFICAÇÕES

2.1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A ventilação natural é uma importante estratégia de resfriamento passivo das edificações, cujas principais funções são: 1) manter a qualidade do ar sobre certos níveis mínimos, substituindo o ar interno alterado pela ocupação e por uso de equipamentos, pelo ar fresco do exterior. Nessa situação tem-se a ventilação higiênica e deve ser garantida em todas as condições climáticas; 2) promover o conforto térmico dos usuários dissipando o calor do corpo humano por convecção e evaporação, principalmente quando as temperaturas e as taxas de umidade relativa são elevadas. Nesse caso, tem-se a ventilação térmica; 3) resfriar a estrutura do edifício quando a temperatura interna é maior que a externa. A importância de cada uma delas depende das características climáticas nas diferentes estações e regiões, e os projetos devem satisfazer esses requisitos (GIVONI, 1976).

A ventilação natural como recurso para alcance do conforto térmico tem uma importância fundamental principalmente em regiões de clima quente e úmido, uma vez que as correntes de ar aumentam as trocas de calor por convecção proporcionando o resfriamento fisiológico com perda de calor pela evaporação do suor. A eficácia do resfriamento fisiológico depende da velocidade e da temperatura do ar, de forma que altos valores de temperatura podem ser amenizados com o aumento dessa velocidade. No entanto, existe uma velocidade do ar ótima, sendo que após esse valor, um incremento pouco afeta na sensação térmica do usuário. Essa velocidade ideal não é constante e depende da temperatura, umidade, taxa metabólica e do vestuário (GIVONI, 1976). Freixanet e Viqueira (2004) apresentam os efeitos do vento sobre os usuários de um espaço e a sensação de resfriamento provocada (tabela 1).

Tabela 1: Efeitos da velocidade do ar sobre os seres humanos³

Velocidade do ar (m/s)	Efeito sobre os seres humanos	Efeito de esfriamento (°C)
0,1m/s	Pode-se sentir sufocação.	0,0
0,25m/s	Há movimento imperceptível exceto com baixas temperaturas do ar.	0,7
0,5m/s	Sensação de frescor a temperaturas confortáveis, porém incomoda a baixas temperaturas.	1,2
1,0m/s	Agradável, geralmente quando o clima é confortável ou quente, porém causa sensação de movimento constante. É o nível máximo aceitável de conforto noturno.	2,2
1,5m/s	Incômodo a temperaturas confortáveis. Limite máximo de conforto para atividades internas.	3,3
2,0m/s	Aceitável só em condições muito quentes e úmidas, quando nenhum outro alívio ambiental está disponível.	4,2

Fonte: Freixanet e Viqueira (2004)

A ventilação natural também possibilita a renovação do ar interno, garantindo a salubridade dos ambientes e de seus ocupantes, removendo os vários tipos de poluentes. Além disso, retira o calor da edificação reduzindo a temperatura do ar, as temperaturas superficiais e a radiação térmica emitida para os usuários no espaço interno.

Outro benefício da ventilação natural é a redução do consumo de energia elétrica, diminuindo diretamente o uso de sistemas de ventilação mecânica e ar condicionado. De acordo com Alloca et al. (2003) o consumo de energia de um edifício ventilado naturalmente é 40% menor do que de um edifício com ar condicionado. Apesar de todas essas vantagens, quando se trabalha com a ventilação, deve-se levar em consideração inconvenientes como a poluição do ar externo e o excesso de ruído. Sendo assim, as aberturas devem ser alvo de uma atenção especial no projeto arquitetônico.

A ventilação natural é induzida por um diferencial de pressão gerado através de dois processos físicos: térmico (efeito chaminé que ocorre pela diferença de temperatura entre o ar interno e externo) e eólico (ocorre pela ação dos ventos através da conversão da energia cinética do vento em pressão estática sobre a envolvente do edifício). Essas formas podem atuar separadas, juntas ou em oposição (MARQUES DA SILVA, 2010).

³ Tradução da autora. Dados referentes à pele úmida, a 30°C.

2.1.2 AS AÇÕES INDUTORAS DA VENTILAÇÃO NATURAL

Os principais critérios de ventilação dos ambientes se baseiam nos requisitos básicos de exigências humanas (suprimento de oxigênio e a concentração máxima de gás carbônico no ar) e na remoção do excesso de calor dos ambientes. A renovação do ar pode proporcionar ganho ou perda de calor, sendo função dos valores das temperaturas externa e interna, taxa de ventilação e da capacidade térmica do ar. Segundo Frota e Schiffer (2000), a carga térmica transferida pela ventilação é dada pela equação 1:

$$Q_{\text{vent}} = 0,35.N.V.\Delta t \text{ (W/h)} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Q_{vent}	Carga térmica transferida pela ventilação (W)
0,35	Calor específico x densidade do ar (W/m ³ °C)
N	Taxa de renovação de ar/hora do ambiente (renov/h)
V	Volume do ambiente (m ³)
Δt	Diferença de temperatura do ar interno e externo (°C)

A taxa de renovação de ar/hora é uma maneira de estipular a massa de ar movimentada substituída em um espaço. É definida como a taxa volumétrica na qual o ar entra ou sai de um espaço, dividido pelo volume desse mesmo ambiente, em determinado período de tempo. Segundo Bittencourt e Cândido (2006) o cálculo das taxas de renovação de ar por hora de um determinado ambiente pode ser expresso pela equação 2:

$$N = \frac{3600Q}{V} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

N	Taxa de renovação de ar/hora do ambiente (renov/h)
Q	Vazão do ar (m ³ /s)
V	Volume do ambiente (m ³)

De acordo com Bittencourt e Cândido (2006) a taxa de renovação de ar/hora serve para estimar a carga de ventilação para aquecimento ou refrigeração, através de sistemas de ar condicionado, ventilação mecânica e ventilação natural. O cálculo desse parâmetro é bastante empregado em regiões de clima temperado e frio. Para clima quente e úmido, onde a ventilação natural é de grande importância para o conforto no interior dos espaços, é útil apenas como indicadores da qualidade do ar em um determinado ambiente.

2.1.2.1 Ventilação natural por ação dos ventos

A ventilação por ação dos ventos depende da forma do edifício, do ângulo de incidência dos ventos e das características de seu entorno, como a proximidade de obstáculos e a rugosidade do terreno onde a edificação está implantada. Esse processo ocorre em função das diferenças de pressão entre as aberturas de entrada e saída do ar. As pressões distribuídas sobre a envolvente, em relação a pressão atmosférica de referência, geram uma pressão positiva (barlavento) na face de incidência dos ventos e nas outras é gerada uma pressão negativa (sotavento). Esse tipo de ventilação pode ser classificado como unilateral ou cruzada.

A ventilação é unilateral quando existe apenas uma abertura para troca de ar, ou quando as aberturas de entrada e saída se encontram na mesma fachada. No entanto, segundo Kleiven (2003) esse tipo de ventilação possui poucos benefícios para a qualidade do ar interno e para o conforto, pois apresenta pequenos valores de renovação de ar. À medida que o usuário se afasta da abertura, a ventilação se torna pouco perceptível, ressaltando uma baixa eficiência para resfriamento em períodos quentes.

Já a ventilação cruzada ocorre em edifícios com aberturas em paredes opostas ou adjacentes. Segundo Santamouris e Wouters (2006) as pressões nas fachadas variam em função da posição e do tempo⁴ e Marques da Silva (2010) destaca que a variação da distribuição de pressão nas envolventes é a questão central neste processo. Como a ventilação por ação dos ventos é proporcional à intensidade, à direção do vento no meio

⁴ Posição é pelos efeitos aerodinâmicos da geometria da edificação e tempo é pela turbulência do ar

externo e, portanto, à diferença de pressão entre as aberturas, as taxas da ventilação podem ser significativamente reduzidas em períodos de calmarias⁵. O algoritmo proposto pelo *Building Research Establishment* (BRE) e apresentado por Frota (2000) e Santamouris e Asimakopoulos (2001) para estimar a taxa de ventilação devido à ação dos ventos pode ser expressa pela equação 3.

$$Q = C_d . A . U_{ref} . \sqrt{\Delta C_p} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

- Q Vazão volumétrica (m³/s)
- C_d Coeficiente de descarga do conjunto de aberturas (adimensional)⁶
- A Área efetiva ou equivalente das aberturas para ventilação (m²)
- U_{ref} Velocidade do vento em uma cota de referência (m/s)
- ΔC_p Diferença dos coeficientes de pressão nas aberturas de entrada e saída do ar (adimensional)⁷

A área efetiva ou equivalente da abertura é considerada como a área livre das mesmas para a entrada do ar e é função das áreas das aberturas de entrada e de saída do ar. Em edifícios com muitas aberturas, a área global equivalente é calculada adicionando, aritmeticamente, as aberturas em paralelo. No entanto, para as aberturas em série, essa área deve ser obtida pela adoção do inverso dos quadrados, conforme apresentado por Bitencourt e Cândido (2006) e Santamouris e Asimakopoulos (2001) (figura 1 e equação 4).

Figura 1: Esquema representando a área equivalente para o cálculo de ventilação cruzada em edifícios térreos

Fonte: Adaptado de Bittencourt e Cândido (2006).

⁵ A ventilação cruzada pode ser classificada em: a) direta: quando atravessa apenas um cômodo e b) indireta: quando vento atravessa dois ou mais cômodos antes de sair no ambiente externo.

⁶ Ver item 2.1.3.3

⁷ Ver item 2.1.3.1

$$\frac{1}{A^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2} \quad (\text{Equação 4})$$

2.1.2.2 Ventilação natural pelo efeito chaminé

O processo de ventilação natural por efeito chaminé tem sua origem na diferença de temperatura entre o ar externo e interno do edifício, que ocasiona gradientes verticais nas densidades das massas de ar e, portanto, nas pressões. Frequentemente, a temperatura no interior dos edifícios tende a ser mais elevada do que a do exterior, devido às fontes internas de calor e ao aquecimento da envoltória pela absorção da radiação solar (TOLEDO, 1999). Assim, o ar quente, menos denso, se eleva e sai pelas aberturas existentes na parte superior do recinto, sendo substituído por um ar fresco, mais denso, que entra pelas aberturas localizadas na parte inferior.

Segundo Toledo (1999) quando não há vento, o efeito chaminé torna-se o único responsável pela renovação do ar nas edificações e representa a situação mais simples da ventilação natural. Essa alternativa é muito interessante nas situações de grande adensamento urbano, cuja velocidade dos ventos é muito baixa ou inexistente devido aos obstáculos à circulação dos ventos. No entanto, esse tipo de ventilação é prejudicada quando há pouca diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar e quando as temperaturas interna e externa são similares. Nesses casos, Neves (2012) destaca que uma forma de favorecer o movimento do ar pelo efeito chaminé é através do uso de energia solar, visando incrementar o diferencial de temperatura e intensificar a exaustão do ar aquecido. Isso pode ser obtido através do uso da chaminé solar⁸.

Considerando um ambiente com temperatura interna (T_i) superior à externa (T_e), com uma abertura inferior e uma superior, haverá uma sobrepressão na parte superior e subpressão na inferior. Nessas condições, o ar penetrará no ambiente pela abertura mais baixa e será eliminado pela mais alta, estabelecendo um fluxo ascendente de ar. A passagem da região de sobrepressão para subpressão, onde ocorre a inversão de sentido do fluxo de ar, é denominada nível de pressão neutra (NPN), definida como a altura onde

⁸ A estratégia da chaminé solar está descrita detalhadamente no subcapítulo 2.2 – Estratégias passivas de ventilação natural.

não existe diferença de pressão entre os ambientes interno e externo. Deste modo, se existir uma abertura nesse ponto, não haverá fluxo de ar. Sua localização é determinada pela distribuição das aberturas na envoltória (FEUSTEL; SHERMAN, 1989) sendo que quando as aberturas de entrada e saída possuem dimensões iguais, localiza-se no ponto central (figura 2a). Marques da Silva (2010) ressalta que o plano neutro desloca-se no sentido da abertura de maior dimensão, sendo praticamente independente da relação de temperaturas.

A ventilação por efeito chaminé também pode ocorrer em edifícios com uma única abertura, sendo que esta serve tanto como entrada, quanto como saída de ar. As pressões interna e externa serão iguais no nível da abertura, ou seja, não ocorre circulação de ar, aumentando à medida que se afasta desta. Para essa situação as taxas de ventilação são menores e o ar não penetra no interior em grande profundidade (figura 2b).

Figura 2: Movimento do ar pelo efeito chaminé para $t_i > t_e$ (a) aberturas em diferentes alturas e (b) uma única abertura inferior

Fonte: Adaptado de Bittencourt e Cândido (2010)

A equação 5 é apresentada pela ASHRAE (2005) para determinar a vazão do ar pelo efeito chaminé, quando a temperatura interna for superior à temperatura externa.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta Z_{NPN} (T_i - T_e)}{T_i}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

- Q Vazão volumétrica (m^3/s)
- C_d Coeficiente de descarga do conjunto de aberturas (adimensional)
- A Área efetiva da abertura de entrada ou saída do ar, consideradas iguais (m^2)
- g Aceleração da gravidade ($9,807 \text{m/s}^2$)

Δz_{NPN} Distância entre o ponto central da abertura de entrada do ar e o nível de pressão neutra (m)⁹.

T_i Temperatura do ar interno (°C)

T_e Temperatura do ar externo (°C)

De acordo com a equação, observa-se que a intensidade do efeito chaminé depende das relações entre os seguintes fatores: diferença das temperaturas do ar interno e externo, diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar e a área efetiva das aberturas. O fluxo de ar é mais intenso quando as aberturas de entrada e saída de ar possuem a mesma dimensão, quanto maior a distância vertical entre elas e maior a diferença entre as temperaturas do ar interno e externo (ALLOCCA et al., 2003; HEISELBERG et al., 2004; MAZON et al., 2006; TOLEDO, 1999;), conforme mostram os gráficos 1 e 2.

Gráficos 1 e 2: Fluxo de ar pela diferença de temperatura entre o ar interno e externo e pelas distâncias verticais entre as aberturas de entrada e saída de ar, respectivamente

Fonte: Adaptado de Allard (1998)

É importante ressaltar que se há incidência de vento, esta ação deve ser conjugada ao efeito chaminé, de forma que seus resultados se somem e resulte numa ventilação mais eficiente. Para isto, é fundamental que ambos os fluxos tenham o mesmo sentido.

2.1.2.3 Camada Limite Atmosférica (CLA)

O vento é um fenômeno físico altamente variável e irregular ao longo do tempo, devido a sua turbulência. Quando o vento flui sobre uma superfície sofre uma redução de

⁹ Informações detalhadas sobre a altura do nível neutro, para diferentes situações, podem ser encontradas em Allard (2002), Santamouris e Asimakopoulou (2001) e Santamouris e Wouters (2006).

sua velocidade em função de uma força de atrito que é imposta pela rugosidade do terreno (Z_0) e pela viscosidade do fluido. Esse efeito ocorre na região próxima da superfície gerando a Camada Limite Atmosférica (CLA).

A principal característica da CLA é a variação vertical da velocidade do fluxo de ar, gerando um gradiente da velocidade: seu valor é nulo junto ao solo, aumentando à medida que a cota da altura aumenta até atingir a intensidade máxima em uma zona livre da influência do atrito com a superfície (ALLARD, 2002; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006; MARQUES DA SILVA, 2010). Este gradiente é função das diferentes rugosidades do terreno atingindo-se mais rapidamente a velocidade máxima (não perturbada) em áreas próximas de grandes superfícies de água (baixa rugosidade). Em áreas urbanizadas a CLA se desenvolve mais lentamente, atingindo a velocidade máxima a cotas mais altas, uma vez que a elevada densidade construtiva torna-se um obstáculo à circulação dos ventos. Deste modo, a velocidade do ar é menor dentro da malha urbana do que na área rural (figura 3).

Figura 3: Perfis do vento em diferentes terrenos
Fonte: Adaptado de Jackman (1980)

Para estimar os fluxos de ventilação no nível das edificações, é necessário dispor de um valor de referência da velocidade dos ventos externos. Segundo Cóstola (2006) os dados do vento são coletados na altura padrão de 10m acima do solo e em estações localizadas em áreas abertas e, portanto, livre de interferência de obstáculos vizinhos. Essas condições são diferentes daquelas encontradas em um determinado terreno urbano. Os aeroportos, onde ficam boa parte das estações meteorológicas, são em geral planos e possuem uma rugosidade baixa e uniforme ($Z_0 = 0,01$). Ao longo de seu percurso, o vento vai

sofrendo alterações devido à topografia e às mudanças na rugosidade da superfície terrestre, que alteram o seu perfil de velocidade e turbulência, assim como a sua direção.

Diante disso, os dados de vento utilizados nas análises ao nível das edificações necessitam de correções uma vez que o efeito produzido pelas diferentes características do entorno no qual se encontra o edifício, influencia significativamente na distribuição do fluxo de ar dentro da edificação. Além disso, essas correções, permitem a mensuração de valores mais adequados de Cps, velocidades e taxas de renovação de ar, deixando-os mais próximos da realidade. Segundo Liddament (1986) a não correção da velocidade do vento talvez seja uma das causas mais comuns de erro nos cálculos dos parâmetros quantitativos.

Com base nos valores de referência para a velocidade dos ventos externos e nas condições do entorno do edifício, existem diferentes equações que fornecem as velocidades na altura da edificação. Segundo Marques da Silva (2010), o perfil das velocidades médias de uma CLA pode ser descrito, de forma aproximada e simples, por uma lei do tipo potencial, dependendo do expoente (α), que é relacionado à rugosidade do terreno (equação 6). Essa mesma equação foi utilizada no trabalho de Kim et al. (2010).

$$\frac{U}{U_{ref}} = \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{\alpha} \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

- U Velocidade media do vento em certa altura h (m/s)
- U_{ref} Velocidade do vento medida na altura de referência (m/s)
- h Altura da edificação que se deseja avaliar a velocidade do vento (m)
- h_{ref} Altura de referência da velocidade do vento medida (10m em geral)
- α Expoente de lei de potencia da camada limite atmosférica (tabela 2).

O *Building Research Establishment* - BRE¹⁰ (1978 *apud* BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006), a partir da transposição das medidas adquiridas em estações meteorológicas e com base na variação da rugosidade de diversos tipos de terreno, define a equação 7 para determinar a velocidade do ar a uma determinada altura.

¹⁰ BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. Principles of natural ventilation. BRE Digest n. 210. BRE, Garston, 1978.

$$U = U_{ref} \cdot k \cdot z^a \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

- U Velocidade média do vento à determinada altura (m/s);
- U_{ref} Velocidade média do vento na estação registrada a 10m (m/s);
- k, a Coeficientes segundo a rugosidade da superfície do terreno (tabela 2)

Tabela 2: Coeficientes de acordo com as características do terreno

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

Fonte: BRE¹¹ (1978 *apud* BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006)

Gasch (1996) propõe que a velocidade do vento em uma determinada altura é dada pela relação da equação 8. A tabela 3 apresenta valores de rugosidades para diferentes áreas, a fim de traçar o perfil de velocidade para o local estudado.

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

Onde:

- h_{ref} Altura de referência de medição da veloc. do vento (10 ou 30m, em geral);
- U_{ref} Velocidade do vento medida nesta altura de referência (m/s);
- z_0 Rugosidade do terreno (tabelas 3 e 4)

Tabela 3: Comprimento de rugosidade segundo o meio

Tipo de terreno	Z_0 (m)
Lagos, mar aberto	0,0001
Superfície com areia (lisa)	0,0003
Superfície com neve (lisa)	0,001
Pradaria, campo	0,01
Vegetação rasteira	0,1
Muitas árvores e/ou arbustos	0,2
Subúrbios	0,5
Cidade, floresta	1,0

Fonte: Carvalho (2003)

¹¹ BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. Principles of natural ventilation. BRE Digest n. 210. BRE, Garston, 1978.

Para Allard (2002), a velocidade média do vento é uma função logarítmica da altura acima do solo (equação 9) e a tabela 4 a seguir apresenta uma gama de valores experimentais obtidas em terrenos homogêneos de grandes extensões horizontais.

$$U = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

- U Velocidade média do vento (m/s);
- u^* Escala de velocidade chamada de velocidade de fricção
- k Constante de Karman
- z_0 Rugosidade (característica da superfície do solo - adimensional).

Tabela 4: Altura da rugosidade e classe

Tipo de superfície	Altura da rugosidade	Classe da rugosidade
Mar, neve, areia	0,0005	I
Mar com vento muito forte	0,005	II
Grama curta	0,01	III
Campos abertos cultivados	0,05	IV
Plantas altas, campos abertos	0,10	V
Campo e habitat semeado	0,25	VI
Zona urbana periférica	0,50	VII
Centro da cidade, floresta	1,00	VIII
Centro metropolitano, floresta tropical	4,00	IX

Fonte: Wieringa (1991, traduzido pela autora)

Todas as equações apresentadas possuem um grande potencial de uso para correção da velocidade no nível das edificações. Nesse trabalho, optou-se por utilizar a equação 6, pois durante os ensaios de geração da CLA no túnel de vento, foi adquirido o valor do expoente de lei de potencial da CLA (α) para ambientes suburbanos, facilitando assim, essas correções nas simulações computacionais.

A rugosidade é uma característica aerodinâmica da superfície do solo relacionada à geometria dos obstáculos existentes no entorno. Para idênticas velocidade de referência e altura acima do solo, a velocidade média pode ser reduzida com o aumento dessa rugosidade (ALLARD, 2002). Allard, Ghiaus e Mansouri (2003) compararam o mesmo edifício implantado em um meio urbano e em um local sem obstruções. Os resultados mostraram que a redução na velocidade dos ventos, a mudança nos padrões do fluxo de ar e a

estratificação térmica em *canyons* urbanos ocasionam uma redução de até 90% no potencial de uso da ventilação natural.

Além disso, a figura 4 apresenta modificações no perfil de ventos em dois tipos de terrenos com diferentes rugosidades. Nota-se que a velocidade na cidade é aproximadamente a metade da velocidade em campo aberto, ressaltando novamente a grande influência dos efeitos de rugosidade para a ventilação natural.

Figura 4: Modificações no perfil da velocidade do vento para diferentes tipos de terreno
Fonte: Adaptado de Cóstola (2006)

2.1.3 PARÂMETROS PARA ESTIMATIVA DA VENTILAÇÃO NATURAL

Qualquer edifício imerso em um escoamento constitui um obstáculo ao seu percurso livre e o resultado dessa interação são complexos escoamentos tridimensionais que dependem das características da camada de ar incidente (MARQUES DA SILVA, 2010). Segundo Bittencourt e Cândido (2006), uma corrente de ar pode apresentar um escoamento laminar ou turbulento. O laminar ocorre quando as moléculas de ar movem-se em linhas paralelas sem mistura lateral ou radial. Já o escoamento turbulento ocorre com altas velocidades ou quando a mesma colide ao encontrar um obstáculo.

O escoamento que contorna o edifício forma zonas de estagnação e recirculação que proporcionam diferenças de pressão (positivas e negativas) nas distintas fachadas. Em um corpo não aerodinâmico, como um edifício, o escoamento separa-se nas quinas do

mesmo, causando pressões negativas nas laterais e na face localizada a sotavento. As pressões positivas ocorrem a barlavento. Esses campos de pressões nas superfícies do corpo determinam as forças de pressão normais a essa superfície, tais como as forças de arraste e sustentação (figura 5). A geometria do edifício, a direção de incidência dos ventos, os tipos de aberturas, entre outros aspectos, influenciam no comportamento do escoamento.

Figura 5: Campos de pressão em um cubo
Fonte: Adaptado de Givoni (1976)

Para um maior entendimento da ventilação natural nos espaços internos de um edifício, é importante definir parâmetros como coeficiente de pressão, coeficiente de perda de carga e coeficiente de descarga, que serão detalhados a seguir.

2.1.3.1 Coeficiente de pressão (C_p)

A ação dos ventos sobre um edifício exerce diferentes forças nas aberturas provocando o movimento do ar no espaço interno. Essa ação traduz-se em forma de pressões distribuídas sobre as envoltórias do edifício e são usadas como parâmetro que indica o potencial de uma abertura para insuflar (pressão positiva) ou extrair (pressão negativa) o ar em determinado ambiente. Conhecer a distribuição dessas pressões nas superfícies do edifício é importante para avaliar as cargas de vento e as estimativas do fluxo de ventilação da componente eólica, sendo influenciadas por uma ampla gama de fatores, incluindo as condições do fluxo, do entorno urbano, da geometria do edifício e da direção dos ventos (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013).

A ação dos ventos na envoltória de uma edificação é avaliada através dos coeficientes de pressões (C_p) que são variáveis de ponto a ponto nas superfícies do edifício. Segundo Marques da Silva (2010), Santamouris e Wouters (2006) e Santamouris e Asimakopoulou (2001), os C_p s são definidos como o quociente adimensional da pressão total em um determinado ponto da envoltória menos a pressão estática de referência (ambiente), divididos pela pressão dinâmica do fluxo de ar não perturbado (equação 10).

$$C_p = \frac{P_x - P_e}{P_d} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

- C_p Coeficiente de pressão (adimensional)
- P_x Pressão em um determinado ponto da envoltória do edifício (Pa)
- P_e Pressão estática de referência, do fluxo de ar não perturbado (Pa)
- P_d Pressão dinâmica do vento não perturbada (Pa)

A pressão estática é a pressão exercida por um fluido nas superfícies adjacentes do edifício. A sua ação é causada pela atmosfera e pela diferença de densidade entre o ar interno e externo às edificações (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006). Já a pressão dinâmica da corrente de ar não perturbada é a força pela unidade de área devido à inércia do vento, em um plano ortogonal à direção do vento. Segundo Bittencourt e Cândido (2006), essa pressão representa a energia cinética total do ar que atinge um corpo e é função da velocidade do vento e da densidade do ar, conforme apresentado pela equação 11. Algumas vezes é nomeada de pressão de estagnação nos pontos onde a velocidade é levada a zero e a energia cinética é transformada em pressão. Segundo Marques da Silva (2010), como a velocidade do vento varia com a altura, a pressão dinâmica deve ser referida a uma dada cota que, usualmente é a da cobertura do edifício.

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

- P_d Pressão dinâmica do vento não perturbada (Pa)
- V Velocidade do fluxo (m/s), medida na cota da cobertura do edifício.

ρ Massa específica do ar (kg/m^3) – À temperatura de 15°C e pressão de 1atm , esse valor é de $1,225\text{kg/m}^3$.

A soma das pressões estática e dinâmica é definida como pressão total (equação 12), e valores positivos e negativos se referem à sobrepressões e a subpressões, respectivamente, em relação à pressão ambiente.

$$P_t = P_e + P_d \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

P_t Pressão total (Pa)

P_e Pressão estática (Pa)

P_d Pressão dinâmica (Pa)

Sendo o fluxo de ar laminar e a velocidade uniforme, os Cps com valores positivos podem ser no máximo iguais a 1, ou seja, 100% da pressão dinâmica do ar incidente. Já os valores negativos absolutos dos Cps, podem ser maiores que 1 (TOLEDO, 1999).

Esses valores variam em função da orientação da envoltória do edifício, da geometria e da porosidade da edificação, do entorno e da direção do vento (ASHRAE, 2005). Além disso, Santamouris e Wouters (2006) destacam que esses coeficientes são sensíveis a pequenos detalhes da edificação, o que torna imprescindível a aquisição desses valores para cada caso específico. Allard (2002) destaca a necessidade de uma investigação mais aprofundada sobre essa variável, principalmente em relação ao aumento da turbulência, as diferentes formas das construções e os efeitos dos edifícios vizinhos. Para este autor, os principais parâmetros que afetam a distribuição dos Cps nas superfícies do edifício são três, conforme especificado na tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros que afetam a distribuição dos Cps

Vento	Ambiente	Geometria do edifício
Expoente do perfil da velocidade do vento	Densidade, em planta, da área	Razão de aspecto frontal
		Razão de aspecto lateral
Ângulo de incidência dos ventos externos	Altura do edifício em relação ao entorno	Coordenadas da posição dos elementos
		Inclinação do telhado

Fonte: Allard (2002)

Segundo diversos trabalhos disponíveis na literatura (BLOCKEN; STATHOPOULOS; CARMELIET, 2007; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011; LEITE; FROTA, 2011; MARUYAMA, 1999), a pressão do fluxo incidente sobre os edifícios é influenciada pelas diferentes classes de rugosidade do entorno. De acordo com Cóstola (2006) a determinação dos C_p s para predição da ventilação natural deve ser feita para intervalos na incidência dos ventos de 5° ou 10° no máximo. No entanto, diversas fontes de valores de C_p apresentam resultados para intervalos de 30° ou mais, o que indica que o uso de dados genéricos deve ser evitado. Atualmente existem diversos estudos que fornecem bancos de dados de valores de C_p , como os fornecidos pela ASHRAE (2005) e pela ABNT (1988), que apresentam valores típicos para determinadas proporções de comprimento, largura e altura das edificações. No entanto, esses estudos não consideram a presença de possíveis obstáculos no entorno. Já os experimentos realizados por Linddament (1986) consideraram construções de baixa altura com geometria simples, várias direções dos ventos, inclinações do telhado e diferentes entornos. Valores de C_p referentes a edifícios de geometrias simples podem ser encontrados em diversas referências bibliográficas como em Chandra (1988), Marques da Silva et al. (1993, 1994), Santamouris et al (1996), Saraiva (1983), Swami (1988), Wiren (1985), entre outros. Existem também algoritmos simplificados para o cálculo de valores médios de C_p sobre as faces dos edifícios submetidos à ação dos ventos, como o programa *Cp generator* e o aplicativo desenvolvido pela *Tokyo Politechnic University*. No entanto, esses dados também são limitados, devido à geometria da edificação e os obstáculos adjacentes.

A distribuição da pressão nas superfícies do edifício e o escoamento interno são difíceis de serem estimados em edifícios complexos. Hensen (1991) e Wit (2001) destacam que o C_p é uma das principais fontes de incerteza nos modelos e a avaliação desse parâmetro de forma precisa é um dos aspectos mais difíceis da modelagem de infiltração do ar. Até o momento, não é possível realizar essa análise somente pelos meios teóricos.

Para Cóstola (2006), a definição desses coeficientes é fundamental para o correto dimensionamento das aberturas e a adoção de valores aproximados somente se justifica durante a fase de estudo preliminar, sendo impossível se omitir desta análise nas etapas posteriores. O desafio em um projeto que considere a ventilação por ação dos ventos é o

posicionamento das aberturas em áreas com Cps que apresentem as maiores diferenças. O ideal é identificar as áreas de maior diferença de pressão no edifício, ou criá-las pelo uso de dispositivos arquitetônicos que modifiquem os seus valores. Isto é possível através da aquisição de dados confiáveis da distribuição das pressões nas envoltórias do edifício.

Segundo Jreijiry (2003) os valores de Cps podem ser mensurados a partir de ferramentas com bastante precisão, como experimentos em túnel de vento (STATHOPOULOS; SAATHOFF, 1992) ou simulações numéricas com *softwares* de dinâmica dos fluidos computacional (MONTAZERI; BLOCKEN, 2013). No caso de ensaios no túnel de vento, Marques da Silva (2010) ressalta que se deve assegurar um regime turbulento no interior do túnel, para que as características do escoamento em torno do edifício sejam independentes do número de Reynolds ($Re > 10^5$). As condições de semelhança ficam, então, garantidas unicamente pela escala geométrica do modelo. No caso de ser utilizado um fluxo laminar, qualquer variação na velocidade causaria grandes variações na pressão. Já no caso de simulação por dinâmica dos fluidos computacional, Cóstola e Alucci (2011) garantem que dentro de condições apropriadas de refinamento e parametrização da malha, com a adoção de um modelo de turbulência adequado e com a sistematização das etapas de simulação, é possível determinar valores de Cp confiáveis para estudos de ventilação.

2.1.3.2 Coeficientes de perda de carga

Segundo Marques da Silva (2003), as perdas de carga se referem às resistências por ação do atrito e da turbulência que ocorrem em um escoamento de fluido real, ou seja, de viscosidade não nula. Essas resistências fazem com que parte da energia do escoamento seja convertida em calor, ocasionando a redução da velocidade. A perda de carga da ventilação é proporcional ao tamanho das aberturas, forma e tipo das esquadrias, layout interno e a quantidade de ambientes que o escoamento atravessa. Em virtude disso, são importantes para determinar a vazão mássica de um sistema. A equação de Bernoulli descreve o balanço de energia de um fluido em movimento ao longo de um duto e pode ser escrita incluindo a perda de carga do escoamento (Δh), conforme a equação 13.

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \Delta Ph \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

P_1 e P_2	pressão nos pontos 1 e 2 do escoamento (Pa)
ρ	massa volúmica do fluido (Kg/m ³)
V_1 e V_2	velocidade do fluido nos pontos 1 e 2 do escoamento (m/s)
g	aceleração da gravidade (m/s ²)
z_1 e z_2	cota nos pontos 1 e 2 do escoamento (m)
ΔPh	perda de pressão (Pa)

A perda de pressão (ΔPh) pode ser quantificada através da equação 14 e a perda de carga pode ser expressa também através de um coeficiente adimensional, denominado coeficiente de perda de carga (ζ) (equação 15). Seu valor depende da geometria das aberturas, da região de passagem do ar, da rugosidade das superfícies, da contração do fluxo de ar nas aberturas e do regime do escoamento (laminar ou turbulento).

$$\Delta Ph = \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad (\text{Equação 14})$$

$$\zeta = \frac{\Delta h}{\frac{U^2}{2 \cdot g}} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

Δh	perda de carga (mca)
U	velocidade do fluido (m/s)
ρ	massa volúmica do fluido (Kg/m ³)
g	aceleração da gravidade (m/s ²)

Os escoamentos internos são limitados por superfícies e podem ser classificados em laminares ou turbulentos. Segundo Incropera e Dewitt (1992), o escoamento é laminar quando o movimento do fluido é altamente ordenado, sendo possível identificar as linhas de

corrente ao longo dos quais as partículas do fluido se movem. Já o escoamento turbulento ocorre quando o movimento do fluido é altamente irregular, sendo caracterizado pelo movimento tridimensional aleatório de grandes parcelas do fluido.

O regime do escoamento é caracterizado através de um parâmetro adimensional denominado número de Reynolds (Re), representando a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas. As forças de inércia estão associadas à velocidade e as forças viscosas resultam da viscosidade do fluido. Segundo Incropera e Dewitt (1992) o Re classifica o tipo de escoamento em função de sua massa específica, viscosidade cinemática, velocidade média e dimensão característica da geometria do edifício (equação 16).

$$Re = \frac{Forçainercial}{Forçaviscosa} = \frac{\rho U^2 L^2}{\mu UL} = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

Re número de Reynolds (adimensional)

ρ massa volúmica do ar (kg/m^3) – sob pressão atmosférica de 101mb e temperatura do ar entre 20°C e 30°C, pode-se adotar $\rho = 1,18 \text{ kg/m}^3$.

U velocidade média do fluido (m/s)

L comprimento característico (m)

μ viscosidade dinâmica (kg/ms) - sob pressão atmosférica de 101 mb e temperatura do ar entre 20°C e 30°C, pode-se adotar $\mu = 18,4 \times 10^{-6} \text{ kg/ms}$.

Para escoamentos internos e incompressíveis, verifica-se experimentalmente que o regime de escoamento laminar, onde as forças de fricção são reduzidas, é caracterizado por números de Reynolds menores que 2000. Já para números maiores que 2400, considera-se o escoamento como turbulento e as forças de fricção aumentam. O intervalo entre 2000 e 2400 é denominado como regime de transição ou transiente. Segundo Massey (1989), para correntes de ar no interior do espaço arquitetônico o Re crítico varia de 2000 a 4000.

2.1.3.3 Coeficientes de descarga

A geometria das aberturas e sua relação com o escoamento são determinantes para o cálculo da vazão da ventilação natural por ação dos ventos. Em uma janela ideal, toda a pressão exercida pelo vento se converte em fluxo de ar na abertura. No entanto, em janelas reais, uma parte da energia deste escoamento é dissipada e essa perda varia em função da forma e da posição da janela no escoamento. Um exemplo é a vena contracta, caracterizada pela constrição que o escoamento sofre ao passar pela abertura, de forma que a área ocupada pelo escoamento não corresponde à área total da abertura, conforme apresentado na figura 6 (CÓSTOLA, 2006).

Figura 6: Vena contracta
Fonte: Adaptado de Munson et al. (1997)

Da energia que atinge a abertura, uma parte é dissipada e uma parte é utilizada para promover a ventilação. Essa parcela útil de energia varia entre 100% (quando não há perdas) e quase 0% (no caso de uma abertura dotada de telas, por exemplo). Para estudos específicos de ventilação natural, utiliza-se frequentemente outro coeficiente adimensional, denominado coeficiente de descarga (C_d), que representa as resistências por ação do atrito e da turbulência que ocorrem em um escoamento de fluido real. Essas resistências fazem com que parte da energia do escoamento seja convertida em calor, ocasionando uma redução na velocidade do fluido. Para o caso de edificações, Cóstola (2006) define

esse coeficiente como o parâmetro que permite descrever o comportamento da abertura e das obstruções junto dela e relaciona-se com o coeficiente de perda de carga pela equação 17:

$$Cd = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

ζ Coeficiente de perda de carga (adimensional)

O valor de Cd depende do número de Reynolds (Re), da geometria das aberturas, do canal de passagem do ar e do regime de escoamento externo (laminar ou turbulento) junto à abertura, podendo variar entre 0 e 1 (CÓSTOLA, 2006; MARQUES DA SILVA, 2003; KURABUCHI, 2004). Existe ainda muita incerteza sobre os valores a serem atribuídos a essa variável. Um valor comumente utilizado para Cd é 0,6, mas segundo Cóstola (2006) a importância na correta definição do valor do coeficiente de descarga é a mesma que definir a área de abertura, uma vez que ele afeta linearmente a quantidade de energia disponível nesse orifício. Sobre isso, Marques da Silva (2003) destaca a relevância de se adotar um valor apropriado de Cd a cada situação. Segundo Heiselberg e Sandberg (2006), é difícil determinar o coeficiente de descarga e não se deve considerar um valor constante para os diferentes casos. No entanto, isso não ocorre na maioria das situações, que assumem um valor próximo de 0,6, independente do detalhamento das aberturas e do canal para passagem do ar. A necessidade de adotar um valor de Cd apropriado para cada situação é ilustrada pela tabela 6 que apresenta valores de Cd propostos por diversos autores. Isso contraria claramente a prática corrente de assumir um valor próximo de 0,6, independente da situação (MARQUES DA SILVA, 2010).

Outra pesquisa, desenvolvida por Neves e Roriz (2012), também ressaltou a importância da escolha do coeficiente de descarga das aberturas. Os resultados adquiridos através de simulações computacionais e do modelo matemático mostraram o grande impacto causado pela escolha adequada do Cd .

Tabela 6: Valores propostos para Cd

Referência	Cd	Observações
Allard et al. (1992)	0,6	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 (1997)	$0,5 < Cd < 0,6$	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] (c) $0,5 < \Delta T < 13,0$
	$0,22 < Cd < 0,6$	
Kiel (1989)	$0,4 + 0,0045\Delta T$	Protótipo (c) ¹²
	0,6	Modelo (c)
Van der Maas et al. (1989)	$0,6 < Cd < 0,75$	$\Delta T = 1,5 + 1,5Z$ (a)
Allard et al. (1998)	0,78	Autor: Santamouris, M. (c)
	$0,21H$; $1,5m < H < 2,0m$	Autor: Pelleret et al. (b)
	$0,6 < Cd < 0,75$	Autor: Limam et al.. (c)
	0,311	Autor: Daziel et al.. (c)
	$0,87$; $0,9m < H < 2,0m$	Autor: Khodr. (b, c)
Peppes et al. (2011)	$0,147 (\Delta T/T) - 0,2$	Caixa de escada (d)
Linden (1999)	0,6	Bordas retas
	0,8	Conduas curtas
	0,98	Bordas arredondadas

Fonte: Adaptado de Marques da Silva (2010)

2.2 ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE VENTILAÇÃO NATURAL

Como mencionado anteriormente, a ventilação natural pode ocorrer por ação dos ventos ou por efeito chaminé. Existem diversos elementos arquitetônicos que podem exercer uma influência significativa no desempenho da ventilação natural nos ambientes internos. A seguir, destacam-se algumas dessas estratégias para uso da ventilação natural.

2.2.1 PEITORIL VENTILADO

O peitoril ventilado é um dispositivo geralmente em formato de "L" invertido, que sobrepõe uma abertura localizada no peitoril da esquadria principal, cuja finalidade é complementar o movimento de ar no ambiente interno (figura 7). Segundo Bittencourt e

¹² a) Considera a estratificação a incluir em $U(z) = \sqrt{2g(h-h_{pn})\Delta T/T}$; b) H – altura da abertura; c) Com aberturas interiores; d) $0,34 < Cd < 0,48$ para $0,2 < \Delta T < 6,2$; $-0,0025 < \Delta T/T < 0,025$.

Cândido (2006), esse dispositivo permite a passagem dos ventos sem a penetração das chuvas nem da radiação solar direta. Além disso, a localização e a dimensão reduzida permitem sua abertura à noite, sem comprometer a segurança do ambiente. O uso dessa estratégia é muito interessante para ambientes de trabalho e dormitórios, pois direcionam o fluxo de ar para a altura das pessoas sentadas ou deitadas. Por fim, ressalta-se que o seu desempenho depende do tamanho das janelas e da sua geometria, sendo que os formatos inclinados ou curvos captam melhor o ar, devido à redução da perda de carga (figura 8).

Figura 7: Peitoril ventilado

Fonte: Adaptado de Bittencourt et al. (2007)

Figura 8: Diferentes formatos do peitoril ventilado

Fonte: Adaptado de Bittencourt e Cândido (2006)

2.2.2 TORRES DE VENTO

As torres de vento são elementos arquitetônicos constituídos por dutos verticais cujas aberturas estão situadas acima do nível da cobertura. Segundo Lechner (1991), esses dispositivos já vêm sendo empregados há muitos anos e com bastante sucesso em edificações do Oriente Médio (figura 9a). Araújo (2011) destaca que em casas localizadas em Hyderabad, no Paquistão, torres de vento existem há pelo menos 500 anos.

Esse dispositivo pode funcionar como entrada ou como saída do ar, dependendo da orientação dos mesmos em relação aos ventos dominantes (LÔBO; BITTENCOURT, 2003). Como captador é efetivo para aumentar a velocidade do ar nos ambientes situados no lado oposto aos ventos dominantes. Segundo Kleiven (2003), eles podem ser multidirecionais, aproveitando o vento de várias direções, ou fixos. Geralmente possui no seu interior um defletor ou são divididas por paredes que direcionam o fluxo de ar para os ambientes internos. Nesses casos, os diferenciais de pressão nas diferentes faces favorecem a entrada do ar por um dos lados e a exaustão do ar quente pelo outro lado (figura 9b).

Figura 9: Captadores de vento (a) vista externa e (b) vista interna, respectivamente

Fonte: ENCYCLOPAEDIA Iranica (2009)

Em tecidos urbanos densos, as torres captam os ventos em uma altura cuja densidade das obstruções à circulação do ar é menor e possuem maior velocidade. Além disso, são eficientes na redução da poeira, frequente em períodos secos, uma vez que o fluxo de ar acima da cobertura contém menos material sólido do que no nível da superfície (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006). Ressalta-se que o seu uso deve considerar a incidência de chuvas e a redução no fluxo de ar causada por diferentes fechamentos das aberturas. Apesar de apresentarem um interessante potencial para incorporar os ventos nos edifícios, segundo Lôbo e Bittencourt (2003) não são muito empregados no Brasil, devido à falta de conhecimento sobre o seu funcionamento. Embora muitas construções possuam caixas d'água elevadas, captadores não são incorporados nesses reservatórios (figura 10).

Figura 10: Captadores de vento adaptados às caixas d'água

Fonte: Lobo e Bittencourt (1993)

2.2.3 CHAMINÉ SOLAR

O Brasil possui um grande potencial de aproveitamento da radiação solar que pode ser utilizado a favor da ventilação natural através do uso de chaminés solares. Esse sistema utiliza a energia da radiação solar para aquecer o ar e induzir o efeito chaminé, incrementando as diferenças de pressão e da temperatura entre o ar interno e o externo, intensificando a exaustão do ar. Segundo Neves e Roriz (2012), o uso dessa estratégia se torna muito necessário quando há pouca diferença de temperatura entre as aberturas de entrada e saída do ar, o que é frequente em edificações de baixa altura e de acordo com Cavalcanti e Roriz (2011), a otimização do sistema é alcançada através do máximo aproveitamento da incidência dos raios solares, de acordo com a latitude do local.

O sistema é composto por um coletor solar com duas superfícies paralelas, sendo uma cobertura de vidro na face superior e uma placa negra absorvedora com isolamento térmico na face inferior (ONG; CHOW, 2003). A chaminé funciona como um coletor, onde os raios solares de onda curta atravessam o vidro e aquecem a placa metálica preta. Aquecida, a placa emite calor de ondas longas para a qual o vidro é opaco, gerando o efeito estufa. Diante disso, no interior da estrutura, o ar aquecido se torna mais leve e tende a subir, succionando o ar dos ambientes e substituindo-o pelo ar exterior, mais fresco (figura 11). É um processo de ventilação provocado por diferenças de temperatura e de pressão, sendo eficiente para promover o conforto térmico em áreas urbanas densamente ocupadas, onde os obstáculos prejudicam o uso dos ventos externos (NEVES; RORIZ, 2012).

Figura 11: Funcionamento da chaminé solar

Fonte: Neves e Roriz (2011)

Bassiouny e Korah (2008) destacam a influência que parâmetros como: profundidade do canal de ar, diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar e inclinação do coletor, exercem no desempenho do fluxo de ar interno. Pesquisas desenvolvidas em diferentes países têm comprovado a eficiência dessa estratégia para incrementar a ventilação natural nos espaços internos (AFONSO; OLIVEIRA, 2000; DING et al., 2005; MAEREFAT; HAGHIGHI, 2010; WAEWSAK et al., 2003). Além disso, a pesquisa de Neves (2012) destaca a eficiência do uso desse dispositivo em países tropicais como o Brasil.

2.2.4 PAREDE TROMBE

A parede trombe consiste em uma vedação de espessura moderada orientada ao sol, com uma abertura inferior e outra superior. O lado externo deve ser coberto por um painel de vidro, com um espaço de separação de 5 a 10 cm (CAVALCANTI et al. 2011). Segundo Elsadig (2005) o sistema possui um grande potencial para o conforto térmico, utilizando a ventilação natural e a inércia térmica para resfriar e aquecer a edificação, respectivamente. No entanto, a utilização no Brasil ainda é pouco investigada.

A radiação solar de onda curta atravessa o vidro e aquece a face externa da parede com alta inércia térmica, produzindo o efeito estufa, semelhante ao que ocorre na chaminé solar. Assim, a parede vai acumulando calor, que é liberado para o interior da habitação, quando utilizada para aquecimento, ou para o exterior, promovendo ventilação do espaço interno através do efeito chaminé (SHEN et al., 2007) A figura 12 ilustra o funcionamento do sistema para o inverno (aquecimento) e para o verão (ventilação).

Figura 12: Funcionamento da parede trombe (a) aquecimento para o inverno (b) ventilação para o verão

Fonte: Chel et al., 2008, adaptado por Cavalcanti et al. (2011)

2.3 VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES: O USO DE *SHEDS*

Os *sheds* são elementos arquitetônicos dispostos na cobertura cujas aberturas promovem a iluminação e a ventilação naturais. Segundo Spadafora (2010) o uso desses elementos para melhorar a iluminação não é uma estratégia recente. Durante a revolução industrial eles foram utilizados por séculos em fábricas visando à iluminação das áreas mais profundas do edifício. Em países estrangeiros, devido ao clima frio e à necessidade do aproveitamento da luz natural e da radiação solar, os *sheds* têm como função principal a incorporação desse recurso natural nos espaços internos. Exemplos da aplicação desses dispositivos nesses países são os edifícios projetados pelo arquiteto finlandês Alvar Aalto, que incorporam com abundância a luz natural nos espaços internos (figura 13).

(a)

(b)

Figura 13: Riola Parish Church projetada pelo arquiteto Alvar Aalto - Riola, Itália

Fonte: ARCH DAILY (2012)

Além da incorporação da luz natural, em países tropicais como o Brasil, onde grande parte do clima é classificado como quente e úmido, esses dispositivos podem ser utilizados para a ventilação natural dos espaços internos. Dependendo da orientação e da configuração de suas aberturas em relação à direção dos ventos dominantes, os *sheds* podem ser utilizados tanto para a captação quanto para a extração do ar.

Os exemplos mais comuns desses dispositivos são os conhecidos “dentes de serra”, cujo formato é ortogonal e sem muitas variações (figura 14). No Brasil, destaca-se o trabalho do arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé, cujos *sheds* como captadores e extratores de ar caracterizam sua arquitetura, estando presentes na maioria dos seus projetos. A disposição desses dispositivos nos seus edifícios não possui uma regra básica sempre a ser seguida.

Baseado nas suas experiências e nos fatores climáticos locais, em determinados momentos ele prioriza a extração do ar e em outros a entrada dos ventos. Além disso, ao longo dos anos Lelé foi desenvolvendo *sheds* com diversas geometrias aerodinâmicas (figura 15), buscando melhorar a ventilação e a iluminação naturais. A preocupação com o formato desses dispositivos é importante, pois para Hoof et al. (2011) um dos principais parâmetros que influem na ventilação natural é a geometria do edifício.

Figura 14: *Sheds* ortogonais, conhecidos como “dente de serra”

Figura 15: Exemplos dos *sheds* aerodinâmicos nos edifícios de Lelé

A seguir, apresenta-se a análise cronológica dos *sheds* desenvolvidos por Lelé, avaliando a evolução desses dispositivos com relação ao conforto ambiental. Embora o objetivo tenha sido o estudo do desempenho dos *sheds* na ventilação natural, é impossível desmembrar os efeitos ocasionados na iluminação, uma vez que esses dois aspectos estão relacionados e são indissociáveis na evolução proposta por Lelé.

2.3.1 OS *SHEDS* NO TRABALHO DO ARQUITETO JOÃO FILGUEIRAS LIMA, LELÉ

A preocupação com o conforto ambiental sempre foi recorrente nas obras de Lelé, desde o início de sua trajetória profissional. Os *sheds* eram utilizados pelo arquiteto há pelo menos 50 anos, buscando edifícios, principalmente, mais agradáveis e humanos.

Quando eu comecei a projetar *sheds* não havia o problema econômico. O que me moveu a fazê-los foi a questão da humanização dos ambientes através da luz e da ventilação natural. Eu sempre achei que isso era mais sadio para o ser humano do que a iluminação artificial e o ar condicionado. Então, eu não fui movido pela preocupação com a economia de energia ou com a sustentabilidade, mas pela humanização (informação verbal)¹³.

É difícil realizar essa análise cronológica de forma retilínea, pois alguns projetos foram executados simultaneamente e as soluções foram incorporadas ao longo do processo. Para

¹³ Entrevista realizada pela autora com o arquiteto Lelé, no dia 18 de novembro de 2008, Salvador – BA.

essa análise foi considerado o ano do projeto dos edifícios, uma vez que foi nessa etapa que esses dispositivos foram concebidos. O desenho dos primeiros *sheds* não possuíam geometrias curvas, devido aos materiais e técnicas construtivas disponíveis na época. No entanto, através de suas experiências profissionais esses elementos arquitetônicos foram constantemente modificados alcançando os formatos aerodinâmicos.

2.3.1.1 Os primeiros *sheds*

O primeiro edifício onde esses dispositivos surgiram foi na Sede da Disbrave em Brasília (1965). O formato das vigas *sheds* em “Y”, prioriza a iluminação zenital e evita a incidência direta da radiação solar nos ambientes internos. Além disso, entre os *sheds* existe uma passagem para a saída do ar pela cobertura e a ventilação dos espaços internos (figura 16a). No entanto, devido à sua pequena dimensão, a extração do ar é dificultada.

Em 1968 essa solução foi repetida no hospital de Taguatinga (figura 16b), e em 1972, na Sede do Planalto de automóveis Ford, esses elementos foram invertidos e dotados de protetores horizontais para reduzir a penetração do sol nos espaços internos (figura 16c). No entanto, novamente, a pequena dimensão das aberturas prejudica a passagem de ar.

Fonte: Latorraca (1999).

Em 1977, na clínica DAHER, o *shed* surge como um elemento separado da cobertura (figura 17a). Nessa mesma linha, na década de 80, Lelé desenvolve o projeto de inúmeras escolas. Com um sistema construtivo em ferro-cimento, os *sheds* possuem geometria ortogonal e fechamento em plástico translúcido para a entrada da luz. Segundo Freire

(2000) esse formato evita a incidência da radiação solar direta a ângulos acima de 60° e a proteção tem um fator de sombra elevado, que obstrui um grande trecho da abóbada celeste, possibilitando um aproveitamento reduzido das superfícies como refletoras e difusoras da luz solar. A pequena abertura dificulta a extração do ar quente (figura 17b).

Figura 17: Sheds (a) clínica DAHER e (b) escolas
Fonte: Latorraca (1999)

Os *sheds* em arcos aparecem pela primeira vez em 1980, no convento de Brotas e posteriormente em 1987, nas creches MAIS, ambos em Salvador - BA. No primeiro caso, o *shed* é a própria cobertura (figura 18a), ao contrário das creches, cujos *sheds* são separados, conforme as escolas projetadas anteriormente (figura 18b). Essas geometrias se aproximam dos *sheds* aerodinâmicos, que surgem posteriormente.

(a)

(b)

Figura 18: (a) Convento de Brotas e (b) Creches
Fonte: Latorraca (1999)

Em 1988, no hospital de Taguatinga, apesar desses dispositivos apresentarem um formato ortogonal semelhante aos anteriores, o seu desenho permite a entrada de ar pela parte posterior do *shed*, formando uma corrente de ar que impulsiona a retirada do ar quente do ambiente (figura 19). Isso foi aperfeiçoado mais tarde nos Tribunais de contas e no hospital Sarah - Rio, cujo princípio foi de ter uma ventilação contínua pela cobertura.

(a) (b)
Figura 19: (a) Hospital de Taguatinga e (b) *Sheds* - entrada de ar atrás
Fonte: Latorraca (1999)

Na década de 90 surgem os Centros Integrados de Ensino (CIACs), cujos *sheds* apresentaram uma evolução das escolas da década de 80. Nos edifícios anteriores, esses dispositivos eram utilizados ou para extração ou para captação do ar. Nesse caso, têm-se as duas situações: nas salas localizadas a barlavento os *sheds* são extratores, enquanto nas salas localizadas a sotavento estes funcionam como captadores, auxiliando no incremento da velocidade do ar nos ambientes internos (figura 20).

Figura 20: Vista geral do CIAC de Brasília
Fonte: Latorraca (1999)

2.3.1.2 *Sheds aerodinâmicos*

Nos tribunais de contas da união e nos hospitais da Rede Sarah, os *sheds* aparecem completamente diferentes dos anteriores. A estrutura pesada do concreto é substituída pelo aço que possibilita o uso de formas curvas com maior leveza. No entanto, os dois primeiros edifícios da rede (Sarah-Brasília e Sarah-São Luís), diferente dos hospitais que surgiram posteriormente, apresentam *sheds* com formatos ortogonais, semelhantes aos desenvolvidos anteriormente, em função das técnicas construtivas utilizadas (figura 21).

(a) (b)
Figura 21: (a) Hospital de Brasília - DF e (b) Sarah de São Luís – MA
Fonte: Latorraca (1999) e Leão (2011), respectivamente

O formato dos *sheds* muda com proposta do Sarah de Salvador. O clima quente e úmido da cidade indica a ventilação natural como uma das estratégias mais adequadas para reduzir o problema do desconforto térmico. Surgem os *sheds* aerodinâmicos com a face interna e externa pintadas de branco, possibilitando múltiplas reflexões da luz e tornando-a mais difusa (figura 22). Além disso, o aumento nas dimensões das aberturas e suas disposições na face oposta aos ventos dominantes incrementa a ventilação natural nos espaços internos através da extração do ar quente pela cobertura (efeito chaminé).

(a) (b)
Figura 22: (a) Corte e (b) *sheds* do Sarah - Salvador
Fonte: Acervo CTRS (2008) e acervo da autora (2010), respectivamente

Em 1992 os *sheds* do Sarah – Fortaleza apresentam a forma de um meio arco em função do clima local. Fortaleza se encontra em uma posição totalmente tropical, apresentando temperaturas médias mais elevadas que Salvador (INMET, 2011). Em função disso, Lelé desenhou um *shed* cujo formato aumentou o pé-direito do edifício até 7m, possibilitando um efeito de convecção mais acentuado (figura 23). Assim, o ar adquire uma velocidade maior e a sua extração pelo efeito chaminé é facilitada (informação verbal)¹⁴.

¹⁴ Entrevista realizada pela autora com o arquiteto Lelé no dia 25 de novembro de 2011, Salvador – BA.

Além disso, a forma côncava de Salvador se transformou em uma superfície convexa reduzindo as reflexões da radiação solar direta nas aberturas e a entrada de calor nos ambientes internos.

[...] Mas se eu tivesse repetido o shed de Salvador em Fortaleza não teria aprimorado nada. Através das pesquisas que fiz e da sua justa aplicação, hoje tenho uma consciência maior sobre como funciona o *shed*. O princípio da cobertura em *shed* é recorrente, mas o desenho da cobertura não é o mesmo. Tem sempre uma novidade, algum aperfeiçoamento (LIMA, 2007, *apud* MENDONÇA, 2007)¹⁵.

Figura 23: (a) Corte e (b) *sheds* do Sarah – Fortaleza

Fonte: Acervo CTRS (2008) e acervo da autora (2010), respectivamente

Em 1996, foi desenvolvido o Tribunal de contas da união em Natal. A geometria do *shed*, igual ao hospital de Fortaleza, é desenhada com base no clima local, que também apresenta características quentes e úmidas. A tipologia desse edifício apresenta salas de ambos os lados e um corredor central, o que pode prejudicar a ventilação dos ambientes localizadas a sotavento. Diante disso, a solução foi o uso de *sheds* extratores nas salas a barlavento e *sheds* captadores nas salas a sotavento (figura 24), semelhante aos CIAC'S.

Figura 24: Tribunal em Natal - RN

Fonte: Acervo CTRS (2011).

Ainda nesse mesmo ano, desenvolve-se o Tribunal de Aracajú, com um sistema que é um avanço do que foi desenvolvido no hospital de Taguatinga. Os *sheds* são interligados entre si, criando uma estrutura fluida que abrange todo o edifício. As aberturas são

¹⁵ Entrevista realizada por Adriano de Mendonça com Lelé, em 18 de janeiro de 2007, Salvador – BA.

localizadas a barlavento e a sotavento permitindo a passagem permanente do ar pela cobertura, que impulsiona a retirada do ar quente do ambiente (figura 25).

Figura 25: Tribunal em Aracajú - SE
Fonte: Acervo CTRS (2011).

Nesse mesmo ano, com o Tribunal Regional Eleitoral, em Salvador, observa-se novamente uma grande evolução, resultado da combinação das diversas experiências anteriores. Os *sheds* se interligam, como se um fosse à continuação do outro. (figura 26).

Figura 26: Tribunal Regional Eleitoral, Salvador - BA
Fonte: Acervo CTRS (2008).

Em 2009 surge o último edifício da rede Sarah, fruto da experiência adquirida ao longo de 30 anos. Lelé atinge o ápice nesse edifício, apresentando as soluções de conforto mais evoluídas de toda a rede. Diferente dos hospitais anteriores, em que os *sheds* são limitados por ambientes, nesse caso, eles são totalmente soltos e independentes dos espaços internos, formando um grande espaço de ar ventilado. Com essa estrutura, perde-se aquele caráter de *sheds* individuais, tornando-se um único elemento sobre o edifício, vencendo vãos de até 15 metros e com pé-direito variável e superior a 8m. É a geometria dos *sheds* que apresenta maior flexibilidade (figura 27).

O desenho de sua cobertura é totalmente diferente das outras. O hospital da Rede Sarah, no Rio de Janeiro, que foi aberto em 2009, representa o estágio mais avançado da minha carreira, então é o meu preferido hoje. Ele tem as mesmas experiências que os outros hospitais da rede, mas houve um ganho maior (LIMA, 2010, *apud* OLIVEIRA, 2010)¹⁶.

Os *sheds* são orientados a barlavento e a sotavento permitindo a renovação contínua do ar pela cobertura. Essa camada de ar ventilada de cerca de 4m, funciona como uma proteção térmica ao edifício, auxiliando na dissipação do calor vindo pela

¹⁶ Entrevista realizada com Lelé por Lila de Oliveira, no jornal iG São Paulo, no dia 19 de julho de 2010

incidência da radiação solar sobre a cobertura (figura 27). O desenho do *shed* no hospital de Taguatinga foi aperfeiçoado no Tribunal de Aracajú e atinge seu ápice nesse hospital.

Figura 27: Hospital Sarah do Rio de Janeiro
Fonte: Acervo CTRS (2008)

O estudo cronológico dos edifícios de Lelé mostra a evolução que esses dispositivos sofreram ao longo dos anos. Os primeiros *sheds* não possuíam geometrias aerodinâmicas, devido aos materiais utilizados na época. À medida que as técnicas construtivas foram evoluindo, alcançaram-se *sheds* mais flexíveis. A eficiência desses elementos arquitetônicos melhora com a proposta do Sarah - Salvador e no hospital de Fortaleza e nos tribunais de Natal e Aracajú nota-se a forte relação da geometria dos *sheds* com o clima do local onde o edifício será implantado. São nos projetos dos tribunais que se percebem ainda desenhos mais soltos que são resultantes das várias formas anteriores. Destaca-se o projeto do Tribunal de Aracajú, onde os *sheds* são interligados entre si, possibilitando a passagem permanente de ar, que foi um avanço do sistema do hospital de Taguatinga. Por fim, todas essas experiências têm seu desdobramento final no hospital do Rio de Janeiro, onde os *sheds* são completamente flexíveis e independentes do edifício, atingindo seu ápice.

A geometria dos *sheds* não está condicionada apenas a valores de ordem estética. O resultado de suas formas está relacionado à potencialidade das técnicas construtivas e dos materiais, a funcionalidade, e, principalmente, às condições climáticas específicas de cada local, buscando melhorar a eficiência da ventilação e da iluminação naturais.

Isso tudo é estudado em função da montagem, do material, do que você tem disponível de equipamentos na obra, do custo e logicamente do conforto, se a geometria é propícia para barrar a insolação e se permite a saída do ar de maneira conveniente. Tudo isso está aliado. No trabalho dele, tudo tem uma razão de ser. Não é uma questão de formalismo, da forma pela forma, do desenho rebuscado. Tem a ver com a funcionalidade (informação verbal)¹⁷

¹⁷ Entrevista realizada pela autora com José Fernando Minho, no dia 24/ 11/2011, em Salvador – BA.

2.3.2 PESQUISAS DESENVOLVIDAS SOBRE *SHEDS*

Apesar do grande potencial dos *sheds* para incrementar a ventilação natural nos espaços internos, esses dispositivos não tem sido muito explorados pela arquitetura. Isso ocorre em virtude da falta de conhecimento sobre o seu funcionamento, comprovada pelo pequeno número de pesquisas, no Brasil e no mundo, sobre a eficiência desses dispositivos para a ventilação natural, principalmente para a extração e para a captação de ar.

Internacionalmente, houve uma produção de trabalhos sobre *sheds* desde a década de 1980. Os métodos de pesquisas incluem ensaios em túnel de vento, simulações computacionais e monitoramentos experimentais, sendo que os primeiros são os dominantes na literatura. Holmes (1983, 1984 e 1987) conduziu diversas pesquisas sobre a análise de cargas de ventos em edifícios com coberturas em *sheds* através de ensaios no túnel de vento. O pesquisador analisou a distribuição das pressões médias e máximas em edifícios com 5 *sheds* ortogonais de inclinação de 20°, para 5 direções dos ventos externos (0°, 45°, 90°, 135° e 180°). A maior pressão de sucção registrada foi de -7,3 no canto mais alto do shed a barlavento e o C_p médio e máximo observado foi de -1,7 e -3,9, ambos no canto mais alto dos *sheds* para o ângulo de 45°. Os resultados foram incorporados na *Australian Standard AS 1170.2* (1989), que fornece valores de C_p para edifícios com *sheds* ortogonais.

Stathopoulos e Mohammadian (1985) conduziram estudos no túnel de vento para edifícios com telhados de 4,8° de inclinação, avaliando os efeitos da largura e da altura do edifício nos valores de C_p s. O maior C_p negativo foi de -6,3 no canto mais alto da cobertura e -4,7 no canto mais baixo. Notou-se que os C_p s médios diminuem no beiral inferior e aumentam no superior, à medida que a inclinação é aumentada. Blackmore (1986) também investigou a influência da largura do edifício na distribuição da pressão média em coberturas em *sheds* com dupla inclinação. No entanto, as pressões de pico não foram medidas, o que limitou o uso dos resultados no processo de codificação.

Gandemer et al. (1989) desenvolveram uma pesquisa para avaliar as diferentes localizações de *sheds* ortogonais como extratores ou captadores de ar. Os parâmetros analisados foram: área do *shed*, área da seção transversal do edifício e localização do *shed*

em relação ao eixo central da construção. Os resultados apontam que o *shed* captador tem maior eficiência quando está na primeira metade do telhado, no sentido dos ventos dominantes. Já o *shed* extrator, tem maior eficiência quando está na segunda metade. O aumento da velocidade interna foi de 50% e 30% com o dispositivo como extrator e captador, respectivamente. Além disso, notou-se que a área do *shed* deve ser maior que 20% da área da seção transversal do edifício, no sentido perpendicular ao vento. Segundo os autores, dependendo do desenho dos *sheds*, a média da velocidade interna do ar pode ser aumentada em torno de 40%, para o *shed* como saída e 15%, como entrada de ar. A figura 28 apresenta a média da velocidade interna em relação à velocidade do vento livre.

Figura 28: Localização do *shed* em relação ao centro do edifício
Fonte: Gandemer et al. (1989)

Algumas pesquisas sobre C_p em *sheds* foram desenvolvidas por Stathopoulos (STATHOPOULOS, 1979; STATHOPOULOS; MOHAMMADIAN, 1991; STATHOPOULOS; SAATHOFF, 1992). Stathopoulos e Saathoff (1992) ensaiaram no túnel de vento modelos com 1, 2 e 4 *sheds* com 15° de inclinação, para diferentes ângulos de incidência dos ventos (0°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150° e 180°), conforme apresentado na figura 29.

Figura 29: Modelo analisado
Fonte: Stathopoulos e Saathoff (1992)

Os resultados mostraram que na maioria das regiões da cobertura, os valores obtidos para os modelos com 2 e 4 *sheds* foram similares aos obtidos no modelo com 1 *shed*. No entanto, as medidas próximas a borda do telhado dos modelos com 2 e 4 *sheds* foram 50% superiores que os no modelo de 1 *shed*. O máximo valor negativo de C_p foi de -10 na região da borda mais alta do modelo com 1 *shed* e nos primeiros *sheds* dos outros modelos. Valores máximos de C_p negativos nos cantos mais baixos foram de -7,9; -6,0 e -4,7 nos *sheds* a barlavento, a sotavento e no modelo com um único *shed*, respectivamente. Nota-se que o C_p máximo registrado no canto superior dos *sheds* nesse estudo (-10,0) foi maior ao registrado por Holmes (-8,2). Além disso, os valores máximos de C_p no canto superior do modelo com um *shed* se aproximam dos valores correspondentes ao dispositivo localizado a barlavento dos modelos com 2 e 4 *sheds*, apresentando uma diferença de 30% menor que nos *sheds* a barlavento para os outros casos. Os resultados de C_p em coberturas com *sheds* foram incluídos na norma americana ASCE 7 de 1995.

Heras et al. (2005) desenvolveram um estudo no prédio da Universidade de Almería, na Espanha, cujo objetivo era remodelar um pátio existente para otimizar o desempenho energético e reduzir os ganhos de calor. A cobertura do pátio foi dividida em duas zonas: a passiva, composta por 5 *sheds* ortogonais e a ativa, com uma chaminé solar de 5m de altura com sistemas fotovoltaicos (figura 30).

Figura 30: Pátio com cobertura em *sheds*
Fonte: Adaptado de Heras et al. (2005)

A metodologia adotada foi o monitoramento in loco das variáveis ambientais temperatura, umidade relativa, velocidade e direção dos ventos e radiação solar, no período de um ano, para avaliar o desempenho térmico das soluções construtivas

adotadas. Os resultados mostraram que durante o inverno, a temperatura interna do pátio foi superior que a externa na maior parte do período monitorado, registrando um conforto térmico satisfatório. Já no período de verão, foram registradas temperaturas internas elevadas, indicando períodos de superaquecimento. Nesse caso, o desempenho pode ser melhorado através da ventilação ou pela melhoria do comportamento da chaminé solar.

Posteriormente, foram realizadas simulações utilizando o *software* PASSPORT PLUS¹⁸ de 4 diferentes tipos de coberturas em *sheds* ortogonais: 1) *sheds* atuais (22°S, com inclinação e protetores horizontais); 2) *sheds* modificados, orientados a 22°S, com inclinação e protetores horizontais; 3) *sheds* convencionais, orientados para norte; 4) cobertura horizontal com vidro. Os resultados indicaram que o pátio com os *sheds* convencionais tem maior necessidade de aquecimento e resfriamento do que com os *sheds* modificados. Após a remodelação do espaço, a carga necessária para obter a mesma temperatura interna foi menor, sendo que esses valores permaneceram mais próximos das condições de conforto.

Perén et al. (2007) avaliaram a velocidade do vento em três modelos de *sheds* desenvolvidos por Lelé para os hospitais Sarah de Salvador, Fortaleza e para o Tribunal Eleitoral da Bahia (figura 31). A metodologia utilizada foi simulações CFD e o objetivo foi analisar a influência das mudanças nos formatos desses dispositivos para a ventilação natural. Os resultados apontaram para um melhor desempenho do modelo do Tribunal, devido a sua superfície mais suave. *Sheds* com geometrias mais aerodinâmicas não apresentam interrupções à circulação do ar, aumentando assim a velocidade dos ventos.

Figura 31: *Sheds*: Salvador, Fortaleza e Tribunal Eleitoral da Bahia

Fonte: Perén et al. (2007)

Lukiantchuki (2010) também avaliou o desempenho dos *sheds* projetados por Lelé com relação à ventilação natural, iniciando estudos do potencial de uso desses dispositivos

¹⁸ O PASSPORT PLUS é uma ferramenta de projeto para análises térmicas, desenvolvida pelo Programa de Pesquisa Europeu PASCOOL (PASSPORT PLUS, 1996).

para extração e para captação de ar. Os edifícios avaliados foram dos hospitais Sarah de Salvador e do Rio de Janeiro (figura 32) e a metodologia adotada foi ensaios no túnel de vento. Através desses experimentos, notou-se que a enfermaria do Sarah - Rio atinge uma velocidade interna do ar maior do que a do Sarah de Salvador em 17%. Isso ocorreu pelo conjunto de aberturas que se apresentam em maiores quantidades e dimensões no edifício do Rio. Além disso, os edifícios de Salvador e do Rio tiveram um desempenho maior quando esses dispositivos funcionaram como extratores e captadores de ar, respectivamente. Com os *sheds* do Sarah Rio como extratores e os de Salvador como captadores, as velocidades no ambiente interno apresentaram uma redução de 43% e 70%, respectivamente. Os *sheds* de Salvador, que possuem as mesmas dimensões ao longo de todo o edifício, não possibilitam uma boa captação do ar. Já no Sarah – Rio, as aberturas e dimensões desuniformes dos *sheds* e o maior espaçamento entre eles favorecem a entrada dos ventos.

Figura 32: Modelos avaliados (a) Sarah de Salvador e (b) Sarah Rio
Fonte: Lukiantchuki (2010)

Prevatt et al. (2010) analisaram a influência de diferentes números de *sheds* ortogonais em coberturas, nos valores e na distribuição dos Cps médios na cobertura. Foram avaliados modelos com 1, 2, 3, 4 e 5 *sheds* com inclinação de 21°. Os experimentos também incluíram três diferentes alturas dos edifícios: 7; 11,6 e 16,1m. Os resultados se limitaram a comparar os Cps nos modelos com diferentes números de *sheds* para a altura de 16,1m. O efeito da distância entre esses elementos e da influência de diferentes entornos nas pressões na cobertura foram discutidos em outros artigos. A motivação para este estudo foi identificar a discrepância dos valores de distribuição de cargas de vento para coberturas em *sheds* ortogonais entre as normas americana e australiana.

Os resultados apontaram que para todos os casos analisados, os C_{ps} negativos mais altos foram registrados no canto superior dos *sheds* a barlavento e esses valores são significativamente reduzidos do meio para a região à sotavento. Como esperado, na região mais baixa do *shed*, os valores máximos de C_p negativos nos edifícios com vários *sheds*, são maiores (aproximadamente 150%) que na cobertura com 1 único dispositivo. Além disso, os resultados são concordantes com os encontrados por Saathoff e Stathopoulos (1992) e foram maiores que os obtidos por Holmes (1987).

Segundo Prevatt et al. (2010), diversos estudos em túnel de vento foram conduzidos em edifícios com *sheds* ortogonais (HOLMES, 1983, 1984 e 1987; SAATHOFF e STATHOPOULOS, 1992) que proporcionaram a base de dados para o desenvolvimento das normas de cargas de vento australiana (Standards Austrália 2002) e americana (ASCE/SEI 2006). Para os autores, os códigos atuais relacionados aos ventos não contém muitas informações sobre edifícios com *sheds* ortogonais e qual deve ser a distância entre esses elementos.

A parte 1 do código europeu de ações nas estruturas “ações gerais – ações dos ventos” de 2010 aborda a relação dos valores de C_{ps} para coberturas com múltiplos *sheds*, para as direções de 0° , 90° e 180° . No entanto, não aborda esses C_{ps} para diferentes proporções das dimensões dos edifícios e inclinação dos *sheds* (figura 33).

Figura 33: modelos de edifícios com *sheds* presentes no código europeu
Fonte: EUROCODE (2010)

Araújo (2011) avaliou o desempenho de 5 diferentes captadores de vento e o caso base sem esse dispositivo através de simulações computacionais com o *software Design Builder CFD*. A tabela 7 a seguir apresenta a síntese dos resultados deste trabalho.

Tabela 7: Síntese dos resultados das simulações de diferentes captadores de vento

Caso	Resultado		Observações
CB			- Ventilação na região mais próxima à abertura - Parte posterior do ambiente sem circulação do ar.
C01		C01_2	<p>- Distribuição do ar semelhante nos captadores</p> <p>- Velocidades do ar similares, maiores que no CB, com pequenas variações entre os casos.</p> <p>O elemento não capta o ar na maioria dos casos. Funciona para exaustão considerando a geometria específica analisada. Provavelmente se o elemento tivesse altura maior, o ar entraria pela abertura.</p> <p>- Formação de zonas turbulentas quando o captador está voltado para a ventilação predominante.</p> <p>- Quanto maior a altura do captador, maior a zona turbulenta formada.</p> <p>- Captadores locados para exaustão apresentam maiores velocidades e por consequência melhor desempenho.</p> <p>- C02 ao C04 casos menos indicados para áreas adensadas, sendo a variação dos casos (C02_2 ao C04_2) mais apropriada.</p> <p>- Necessidade de maior ventilação na parte posterior do ambiente: utilizar a segunda variação dos casos (C01_2 ao C04_2) ou o C05.</p> <p>- O C05 apresenta a maior média de velocidade e não provoca a formação de zonas turbulentas após o captador.</p>
C02		C02_2	
C03		C03_2	
C04		C04_2	
C05

Fonte: Adaptado de Araújo (2011)

Os resultados mostraram que no caso base o fluxo de ar é regular, com maiores velocidades na região próxima a abertura, deixando a parte posterior do ambiente desfavorecida. Ao acrescentar os captadores (casos 01, 02, 03, 04 e 05) verificou-se, uma distribuição do ar mais uniforme e a parte posterior do ambiente mais ventilada. Na maioria dos casos, o ar sai pela abertura, mesmo quando o captador está direcionado para os ventos dominantes. Nos casos 02, 03 e 04, ocorre a formação de vórtices na zona posterior do captador, o que pode prejudicar a ventilação de edificações nessa região.

Os melhores resultados foram para os C01 e C04, mas quando os captadores não estão voltados aos ventos dominantes (C01_2 e C04_2) e no C05, onde não há formação de vórtices de ar após esses dispositivos. Em todos os casos analisados o melhor desempenho foi

registrado com esses dispositivos funcionando como extratores. Por fim, Araújo (2011) ainda aborda a aplicação de outras soluções como: o uso de captadores sem aberturas nas fachadas, o uso de captadores com a presença de abertura na fachada oposta, e o uso de captadores em corredor central de edifícios.

Um estudo desenvolvido por Lima et al. (2011) avaliou a influência de diferentes aberturas zenitais na distribuição da luz natural e na redução do consumo de energia. Foram selecionadas seis tipologias zenitais, de acordo com as recomendações do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) para se atingir o nível A. A análise foi realizada através de simulações com os *softwares Energyplus* e *DaySim* e concluiu-se que o uso da luz natural pela cobertura é uma estratégia bastante vantajosa, uma vez que todos os casos apresentaram consumo de energia menor ou igual ao do caso sem abertura zenital.

O trabalho desenvolvido por Bhatnagar et al. (2012) analisou o efeito de diferentes ângulos de incidência dos ventos (0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° e 180°) na distribuição dos Cps na superfície de coberturas em *sheds* ortogonais de edifícios de baixa altura (figura 34), para o desenvolvimento de projetos estruturais. A metodologia adotada foi a de ensaios em túnel de vento e os resultados mostraram que a distribuição dos Cps na cobertura é altamente influenciada pelo ângulo de incidência dos ventos externos, sendo que quando esses ângulos são oblíquos, os cantos dos telhados são submetidos a uma elevada sucção. Por fim, ressalta-se a importância dos projetistas considerarem a direção mais crítica no desenvolvimento do projeto estrutural de coberturas.

Figura 34: modelo analisado

Fonte: Bhatnagar et al. (2012)

Uma pesquisa desenvolvida por Torres et al. (2013) analisou o desempenho de *sheds* captadores como estratégia de ventilação natural para casas germinadas na cidade de Maceió. A metodologia utilizada foram experimentos em mesa d'água, analisando a trajetória do escoamento do ar nos espaços internos. Os resultados mostraram que houve uma melhora significativa no fluxo do ar no interior dos ambientes através de *sheds*, reforçando que esse dispositivo é uma boa estratégia para essa tipologia de casa.

Através dessa pesquisa bibliográfica, nota-se a lacuna existente no estudo da influência de diversos parâmetros construtivos no desempenho da ventilação natural através de *sheds* e no uso desses dispositivos para captação e para extração de ar. Além disso, pesquisas sobre a influência de *sheds* com diferentes geometrias não foram aprofundadas até o momento. A falta de informações sobre qual deve ser a distância entre os *sheds* também foi pontuado no trabalho de Prevatt et al. (2010).

É importante ressaltar que para uma avaliação mais precisa dos efeitos dos ventos é necessário o conhecimento de parâmetros como coeficiente de pressão. Segundo Montazeri e Blocken (2013), embora muitos estudos de Dinâmica dos Flúidos Computacional (CFD) sobre C_p têm sido realizados, a maioria foca em edifícios de geometria simples. Outra questão é que a grande maioria das pesquisas que abordam C_p s em coberturas com *sheds* analisam a distribuição das cargas dos ventos sob o ponto de vista do projeto estrutural das coberturas e não para o desempenho da ventilação natural dos ambientes internos. Segundo Bhatnagar et al. (2012) uma revisão das pesquisas recentes indicam que poucos estudos têm sido realizados sobre a análise dos ventos em edifícios de baixa altura com coberturas em *sheds*.

A tabela 8 a seguir apresenta o resumo das pesquisas sobre *sheds* realizadas nos últimos anos e que foram discutidas nesse capítulo, incluindo localização, configuração geométrica, variáveis climáticas, parâmetros avaliados e a metodologia adotada na pesquisa. Nota-se que os trabalhos publicados apresentam lacunas importantes que essa pesquisa visa suprir.

Tabela 8: Resumo de pesquisas desenvolvidas sobre *sheds*

PESQUISA			TEMA			CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA								VARIÁVEIS CLIMÁTICAS AVALIADAS						METODOLOGIA			
Autor/Data	Nacional	Internacional	Ventilação natural	Iluminação natural	Engenharia de estruturas	Extração ou captação	Geometria	Inclinação	Altura do edifício	Área da abertura do shed	Área da seção transversal do edifício	Localização do shed /eixo central do edifício	Número de sheds	Velocidade do ar	Direção dos ventos	Coefficiente de pressão	Temperatura e umidade relativa	Radiação solar	Iluminação natural e consumo energético	Túnel de vento	Mesa d'água	Simulação computacional	Medições in loco
Holmes (1983, 1984 e 1987)		X			X	---	01 Ortogonal	20°							X	X				X			
Stathopoulos e Mohammadian (1985)		X			X	---	01 Ortogonal	4,8°								X				X			
Blackmore (1986)		X			X	---	01 Ortogonal	Dupla inclinação					X			X				X			
Gandemer et al. (1989)		X	X			Extr./capt.	01 Ortogonal	---		X	X	X		X						X			
Stathopoulos e Saathoff (1992)		X	X			Extr./capt	01 Ortogonal	X (10° a 30°)					X		X	X				X			
Heras et al. (2005)		X	X			Extr.	01 Ortogonal	X						X	X		X	X				X	X
Perén et al. (2007)	X		X			Extr.	03 Curvas							X								X	
Lukiantchuki (2010)	X		X			Extr./capt	02 Curvas							X	X					X			
Prevatt et al. (2010)		X			X		01 Ortogonal	21°	X				X			X				X			
EUROCODE (2010)		X			X	Extr./capt	01 Ortogonal								X	X							

Tabela 8 (continuação): Resumo de pesquisas desenvolvidas sobre *sheds*

PESQUISA			TEMA			CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA								VARIÁVEIS CLIMÁTICAS AVALIADAS						METODOLOGIA			
Autor/Data	Nacional	Internacional	Ventilação natural	Iluminação natural	Engenharia de estruturas	Extração ou captação	Geometria	Inclinação	Altura do edifício	Area da abertura do shed	Área da seção transversal do edifício	Localização do shed /eixo central do edifício	Número de sheds	Velocidade do ar	Direção dos ventos	Coefficiente de pressão	Temperatura e umidade relativa	Radiação solar	Iluminação natural e consumo energético	Túnel de vento	Mesa d'água	Simulação computacional	Medições in loco
Araújo (2011)	X		X			Extr./capt	05 Ortogonal e curva							X	X							X	
Lima et al. (2011)	X			X		---	06 Ortogonal												X			X	
Bhatnagar et al. (2012)		X			X	---	01 Ortogonal	X (intervalos de 30°)							X	X				X			
Torres, Adelino e Bittencourt. (2013)	X		X			Extr./capt	01 Ortogonal							X	X						X		

2.4 FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL

Existem diversos métodos de predição da ventilação natural nas edificações e sua escolha deve se basear na disponibilidade de recursos humanos e materiais (COSTA, 2009). Segundo Toledo e Pereira (2004) o uso desses métodos é importante, pois a utilização apenas de setas para descrever o desempenho da ventilação natural, pode diferir da realidade. Além disso, Araújo (2011) destaca que geralmente os projetistas se baseiam em recomendações generalistas, sem analisar detalhadamente o comportamento dos ventos.

Segundo Chen (2009), as principais ferramentas de análise do fluxo de ar no ambiente urbano e nos edifícios são: 1) túnel de vento; 2) mesas d'água; 3) medições in loco; 4) simulação computacional por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e 5) fórmulas analíticas e semi-empíricas. Cada um desses métodos possuem vantagens e desvantagens indicando qual a melhor para cada caso específico. A seguir, são detalhadas as ferramentas de túnel de vento e simulação computacional por CFD, que são as metodologias utilizadas nesse trabalho.

2.4.1 TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento (figura 35a) é uma ferramenta com grande confiabilidade para estudos da ventilação natural no edifício e no ambiente urbano através do uso de maquetes (figura 35b), sendo de importante auxílio ao projetista na concepção do projeto. No entanto, devido ao custo elevado e a dificuldade de sua operação é pouco acessível aos projetistas, encontrando-se disponíveis somente em laboratórios especializados.

(a)

(b)

Figura 35: (a) túnel de vento da Unicamp; (b) maquete do Sarah Rio dentro do túnel

Fonte: Acervo da autora (2010)

A escala do modelo físico deve respeitar o número de Reynolds, os critérios de similaridade, o tamanho da área de estudo, o tipo de ensaio, a dimensão da área da seção de ensaio do túnel (o modelo pode obstruir de 5% até 7% dessa área) e as posições que a maquete será ensaiada em relação à incidência do vento (HOOF et al., 2011; LOPES, 2003; MATSUMOTO; LABAKI, 2011). Para esses ensaios é necessária a geração da CLA através da instalação de dispositivos que gerem turbulência e rugosidade ao escoamento (figura 36).

Figura 36: Placa de tubos de PVC para simular a CLA no túnel de vento da Unicamp
Fonte: Acervo da autora (2010)

Com essa ferramenta é possível realizar análises qualitativas e quantitativas. As qualitativas ocorrem com a visualização do escoamento do ar utilizando gelo seco, óleo vegetal ou glicerina para gerar fumaça, conforme a figura 37a (MATSUMOTO, 2011). Outra opção é a técnica de figuras de erosão geradas pela movimentação de grão de areia sobre a área de ensaio (figura 37b). Nesse caso uma fina e uniforme camada de areia é espalhada sobre o piso do modelo e ao introduzir o fluxo de ar formam-se erosões que ilustram a intensidade do vento em torno dos edifícios (PRATA, 2005).

Figura 37: (a) ensaio de fumaça e b) erosão
Fonte: Matsumoto e Labaki (2011) e Prata (2005), respectivamente

Já as análises quantitativas são as medidas de grandezas físicas como velocidade e pressão através de equipamentos como anemômetros de fio quente e tubo de pitot.

2.4.2 SOFTWARES DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

O estudo do movimento dos fluidos é uma atividade que vem sendo desenvolvida há muito tempo em diversas áreas. Segundo Costa (2009), apesar de já estarem sendo exploradas há mais de 30 anos na Europa, o seu uso para a análise do desempenho de edificações e espaços urbanos é uma prática relativamente nova no Brasil. Até recentemente, estudos de fluidos em movimento estavam confinados a laboratórios, mas com o rápido avanço da capacidade de processamento do computador, programas trazem análises e soluções numéricas de problemas de fluxo de ar ao alcance do usuário.

Os softwares baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) tem se consolidado como uma importante ferramenta de análise dos efeitos da ventilação natural. Cóstola e Alucci (2009) certificam que, o uso dessas ferramentas, com condições adequadas de parametrização da malha, controle das condições iniciais e de contorno e com a organização das etapas anteriores e posteriores à simulação, é possível produzir resultados próximos à realidade. Diversas pesquisas (BURNETT et al., 2005; CHENG et al., 2008; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011; HIRANO, 2006; LAM et al., 2008; SHEN et al., 2012) reforçam a confiabilidade e a viabilidade dessas ferramentas para a obtenção de dados de C_p em estudos de ventilação, cujas vantagens são: redução de custos e do tempo de processamento, se comparado aos experimentos em túnel de vento.

Segundo Prata (2005), essa ferramenta se tornou parte integrante da concepção do projeto devido à sua capacidade de prever o desempenho de edifícios antes que estes sejam construídos, analisando as diversas estratégias projetuais até que se obtenha um resultado satisfatório. Fortuna (2000) também ressalta a facilidade do usuário em alterar parâmetros como geometria e velocidade e direção dos ventos externos, uma vez que são dados de entrada do simulador.

Esses programas permitem estudar o escoamento de fluidos, com transmissão de calor ou transporte de massa, reações químicas, movimentos mecânicos, etc., possibilitando uma análise qualitativa e quantitativa dos fenômenos (LEITE, 2010). Segundo Hoff et al., (2011) é possível um controle total das condições de contorno e não ocorrem limitações de

escala. Sobre isso Trindade et al. (2010) ressaltam que as simulações em CFD garantem a captura de detalhes geométricos que normalmente não são considerados em escalas maiores. Isso, segundo Bittencourt (1993), é uma das vantagens desses *softwares* em relação aos túneis de vento, que não conseguem capturar elementos em escala muito reduzida.

Por outro lado, Fortuna (2000) destaca que apesar de toda a flexibilidade da técnica computacional, ela ainda não resolve muitos problemas de escoamento dos fluidos pela dificuldade da modelagem e da transformação das equações para tratamento numérico. Além disso, a validação dos seus resultados, através de ensaios experimentais, é indispensável para garantir a confiabilidade dos resultados (HOFF et al., 2011).

Outras desvantagens dessas ferramentas são: o alto custo da licença comercial, a alta capacidade computacional e a complexidade da operação, pois exigem conhecimentos aprofundados de dinâmica dos fluidos. De acordo com Pedrini e Szokolay (2005), o uso da simulação vem se consolidando como uma alternativa viável, mas pouco acessível, pois exigem conhecimentos pouco difundidos na formação dos arquitetos. Além disso, segundo Trindade et al (2010) por mais que esses programas sejam acessíveis à pesquisa científica, questiona-se seu uso pelo arquiteto, que é o profissional responsável pela incorporação das soluções no projeto. Diante desse cenário, diversos autores, como Augenbroe e Maliska (2001), defendem uma melhoria na interface desses programas para que os arquitetos possam utilizar essas ferramentas durante o desenvolvimento dos projetos.

Dentre os *softwares* comerciais CFD disponíveis para estudos de ventilação natural, destacam-se o *Fluent*, o *Flowvent*, *vortex*, *Phoenix (CHAM)* e o *CFX (Ansys)*. Nesse trabalho será utilizado o *CFX* da *Ansys*, que será detalhado a seguir.

2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: O SOFTWARE ANSYS CFX

O advento do computador foi essencial para o desenvolvimento de modelos que representassem o comportamento térmico e energético de edificações uma vez que a avaliação do seu desempenho é uma tarefa complexa, com muitas variáveis e conceitos multidisciplinares. As primeiras ferramentas computacionais com esse objetivo foram

desenvolvidas na década de 70 e a partir de 1990, com a popularização dos computadores pessoais e com o avanço dos recursos computacionais, programas mais modernos e complexos foram desenvolvidos, tais como: ENERGYPLUS e os baseados na Dinâmica dos Flúidos Computacional (CFD). Com essas ferramentas, é possível conhecer o impacto que as alternativas provocam no projeto antes de sua execução (MENDES et al., 2005).

Segundo Anderson (1995) o surgimento dos programas CFD está relacionado à indústria aeroespacial nas décadas de 1960 e 1970, mas atualmente são utilizadas em diversas áreas, como a engenharia e a arquitetura. Nos último 20 anos, vê-se um grande número de pesquisas em CFD publicadas nessas áreas (EVOLA; POPOV, 2009; HEISELBERG et al.; JIANG; CHEN, 2002; 2004; KATO et al., 1992; NIKAS et al., 2010; NORTON et al., 2010; RAMPONI; BLOCKEN, 2012; SEIFERT et al., 2006; STAVRAKAKIS et al., 2008; STRAW et al., 2000).

Dentre esses *softwares* destaca-se o CFX, produzido pela ANSYS, que simula escoamentos fluidos através de métodos numéricos como elementos e volumes finitos (ANDERSON, 1995). O *software* se baseia em três leis da física (princípio de conservação de massa, momento e energia) e as equações fundamentais que descrevem a aplicação dessas leis na dinâmica dos fluidos são as de *Navier-Stokes*. Têm-se também as equações de conservação escalar (no caso de modelagem de poluição e fumaça) e a de turbulência (CÓSTOLA, 2006). É através delas que as propriedades de um fluido são solucionadas.

2.5.1 A ESTRUTURA DO ANSYS CFX

O *software* CFX é dividido em 4 módulos que executam desde a confecção do modelo até o tratamento dos resultados. O *Icem CFX*, é um pré-processador que permite a verificação da qualidade e estanqueidade da geometria, separação das *parts* e a geração da malha computacional. O *CFX-Pre* é a etapa de preparação e definição dos parâmetros para a realização da simulação. No *CFX-Solver* inicia-se o processamento da simulação e no *CFX-Post*, é realizado o tratamento dos resultados, qualitativos e quantitativos, para a análise dos fenômenos físicos. As etapas são interdependentes e, necessariamente, seguem essa ordem (figura 38).

Figura 38: Módulos do CFX com as respectivas atividades
Fonte: Adaptado de Brandão (2009)

2.5.2 ICEM CFX

2.5.2.1 Construção da geometria

A primeira etapa é a construção da geometria e do domínio computacional, que é o volume por onde o fluido escoar. O modelo pode ser confeccionado no módulo ICEM ou em algum aplicativo de CAD. Segundo Anderson (1995) a simplificação da geometria pode gerar dúvida sobre a confiabilidade dos resultados. No entanto, Cóstola (2006), Prata (2005) e Leite (2008) ressaltam que o edifício deve representar apenas o que for de interesse, pois isso diminui consideravelmente o tempo de processamento das simulações.

Segundo Cóstola (2006) e Costa (2009), o domínio é um dos principais elementos na simulação CFD, pois é o espaço onde são definidas as condições de contorno e a malha para a resolução das equações do fluido. A dimensão desse domínio deve ser definida de modo que o edifício não interfira nas suas fronteiras e seja mantida a configuração do escoamento do fluido no entorno. A maioria dos trabalhos adota o recomendado por Cost

(2004): evitar que a área de bloqueio exceda 3% de qualquer seção transversal no sentido do fluxo e as dimensões devem ser: 5 vezes a altura do edifício estudado (H) a barlavento e nas laterais, 6H na altura, e 15H a sotavento, para que o fluxo possa assumir novamente o seu perfil original. Para Straw et al. (2000) a distância a sotavento pode variar de 10 a 15H. Já Ramponi e Blocken (2012) adotaram 3H a barlavento, pois testes mostraram que a perturbação do fluxo de ar a montante, ocasionado pelo edifício, foi menor que 3H.

Com relação ao formato do domínio, Brandão (2009) destaca que este pode ser tanto retangular quanto circular ou octogonal (figura 39), sendo que cada um possui vantagens e desvantagens. O formato circular ou octogonal permite a simulação de todas as direções do vento com uma mesma malha, alterando apenas sua direção no arquivo "ccl"¹⁹. No entanto, a desvantagem deste modelo é que qualquer uma das faces pode estar a sotavento da área analisada, devendo ter uma distância de 15H da mesma. Assim, aumenta-se o tamanho do domínio e, conseqüentemente, o número de elementos da malha e o tempo de processamento da simulação. Por fim, o edifício e o domínio são unidos em um bloco único e são exportados para o Icem no formato ACIS, extensão *.sat.

Figuras 39: Domínio retangular e octogonal, respectivamente, com as dimensões exigidas
Fonte: Adaptado de Cóstola (2006).

2.5.2.2 Definição das Parts

As superfícies que receberão tratamento semelhante no pré-processamento devem ser agrupadas em *Parts*. Segundo Brandão (2009) essa seleção possibilita maior flexibilidade na atribuição das condições de contorno, sendo possível atribuir mesmas condições a *Parts* diferentes, mas não se podem atribuir condições diferenciadas a elementos da mesma *Part*.

¹⁹ ccl é o arquivo gerado no CFX-Pre que contém os dados da simulação e pode ser exportado e mesclado com outras malhas, desde que elas contenham as mesmas *parts*.

2.5.2.3 Determinação da malha

A malha é a discretização do fluido no domínio, sendo gerada automaticamente pelo programa, através de um método iterativo, onde o usuário informa o tamanho dos parâmetros globais: *maximum element size*; *natural size* e *cells in gap*²⁰. A combinação desses parâmetros resulta no número total de elementos da malha, que determina a capacidade computacional e o tempo da simulação (CÓSTOLA, 2006). Posteriormente, pode-se refinar a malha nas áreas de interesse utilizando-se prismas, que segundo Leite (2010) descrevem melhor as trocas superficiais. Diversos autores ressaltam a importância que o refinamento da malha tem na qualidade da simulação (CÓSTOLA, 2006).

Segundo Cost (2004) a realização de testes de refinamento da malha, visando encontrar a independência dos resultados, em relação à sua densidade, é de grande importância. Esses testes consistem em simular malhas mais grosseiras e, posteriormente, vai refinando-a até que não tenha alteração entre os resultados e os parâmetros da malha, indicando que o refinamento adequado foi atingido. Segundo Zhang et al. (2010) existem poucas informações disponíveis na literatura sobre a qualidade das malhas. Sobre isso, Leite e Frota (2013) complementam que os níveis aceitáveis para a sua qualidade somente são apresentados na documentação do programa. Cóstola (2006) ainda resalta que o principal indicativo que a malha não atingiu o refinamento necessário, é a dificuldade de atingir os resíduos adequados, o que ocasiona descontinuidade e assimetria no fluxo de ar.

A malha pode ser composta por tetraedros, pirâmides, prismas e hexaedros, sendo classificadas como: a) estruturadas, cujos elementos são distribuídos de forma regular e b) não-estruturadas, com elementos distribuídos de forma irregular (CÓSTOLA, 2006). Para Cost (2004) as malhas estruturadas e formadas por hexaedros são as melhores opções. Por fim, a malha gerada é exportada para o CFX-Pre em um arquivo de extensão .cfx5.

²⁰ **Maximum element size:** é o tamanho do maior elemento permitido no domínio e é determinante no número final dos elementos da malha. **Natural size:** é o tamanho do menor elemento permitido. Recomenda-se que seja uma ou duas ordens de grandeza inferior à dimensão do menor elemento no domínio. Quanto menor o seu valor, mais refinada será a malha próximo aos elementos de pequena dimensão. Este aspecto repercute, efetivamente, no refinamento da malha nos menores elementos. **Cells in gap:** é o número de células existente entre dois elementos do domínio. Quanto mais complexa a geometria, maior a influência deste parâmetro no número total de elementos. Recomenda-se que esse valor seja entre 3 e 8 (BRANDÃO, 2009; COSTA, 2009; CÓSTOLA, 2006; LEITE, 2010).

2.5.3 CFX - PRE

2.5.3.1 Condições iniciais

Nessa etapa são definidas as características do fluido, as expressões e as variáveis envolvidas na simulação, a forma de apresentação dos resultados, o regime adotado e as condições de contorno de cada *part*. Todas essas informações podem ser salvas em um arquivo único, de extensão *.ccl, que pode ser gerado no próprio CFX-Pre ou ser importado de outra simulação (LEITE, 2008). Cóstola (2006) realizou um estudo detalhado sobre essas condições para gerar resultados confiáveis, conforme apresentado a seguir.

Primeiramente, define-se o regime da simulação: permanente ou transiente²¹. Simulações de ventos normalmente são realizadas em regime permanente, uma vez que as condições de contorno são constantes. Em seguida, especifica-se o tipo de domínio: fluido ou sólido. Nesse caso o domínio é fluido, e o ar é considerado gás ideal. A pressão de referência é considerada como a atmosférica local. Posteriormente, determina-se o regime térmico. Simulações de vento em condição de estabilidade neutra normalmente desprezam as variações de temperatura, considerando que as forças mecânicas causam uma mistura efetiva do ar que se torna isotérmico. Em casos como avaliação da ventilação por efeito chaminé, deve-se utilizar um modelo térmico, que defina as condições de empuxo e as forças em ação sobre o fluido. Normalmente, informa-se a gravidade no eixo z de $-9,8\text{m/s}^2$.

Define-se também o modelo de turbulência²². Cóstola (2006) destaca que o escoamento é composto por porções fluidas e a interação entre elas obedece às equações de Navier-Stokes. Para resolvê-las de forma adequada, é necessário aplicá-las a cada pequena porção fluida, representando a continuidade no escoamento. O uso de malhas espaçadas impede que essas equações reproduzam os efeitos de turbulência em um escoamento. Para que isso aconteça é necessário o uso de uma malha muito refinada, numa técnica DNS²³. No entanto, foi aplicada somente a escoamentos simples, pois a capacidade computacional exigida é muito grande, o que a torna inviável.

²¹ Condições constantes e variantes ao longo do tempo, respectivamente.

²² Turbulência é a interação entre as porções fluidas.

²³ DNS – *Direct Numerical Simulation*.

Após o DNS, a melhor alternativa em termos de qualidade na simulação da turbulência é o LES²⁴. Nesse modelo, a confiabilidade das simulações é superior aos outros. No entanto, também apresenta a desvantagem da grande demanda computacional e a simulação deve ser feita em regime transiente, exigindo o tratamento dos resultados (COST, 2004). Normalmente, utiliza-se o modelo k-Epsilon (k- ϵ), por oferecer a melhor relação custo (tempo de processamento) / benefício (precisão). Segundo Figueiredo (2007), esse modelo de turbulência é o mais validado e usado devido a sua baixa capacidade computacional. As funções turbulentas de superfície do K-Epsilon devem ser *scalable*, para se ajustarem às interações entre o fluido e as superfícies sólidas.

Leite e Frota (2013) realizaram testes com alguns modelos de turbulência (K- ϵ padrão; RNG K- ϵ , Shear Stress Transport (SST) e o Eddy Viscosity Transport) para analisar a influência nos valores de C_p . O K- ϵ aumentou a convergência da simulação. Já os modelos RNG K- ϵ e SST apresentaram convergências pobres e valores de y^+ distantes do indicado pela literatura, como veremos a diante. Os valores variaram em relação ao tempo de processamento e convergência dos resultados, sem alterações significativas nos C_p .

Por fim, são estabelecidos os parâmetros de controle, como o número máximo de iterações, que é o número de vezes que os cálculos são realizados até que se alcance o mínimo de resíduos e o critério de convergência. A maioria dos trabalhos (BRANDÃO, 2009; COSTA, 2009; CÓSTOLA, 2006; FIGUEIREDO, 2007; LEITE, 2008 e LEITE, 2010) utilizou o *Residual Target* = 10^{-4} e *Residual Type* = RMS²⁵, modelo de turbulência anisotrópico.

2.5.3.2 Condições de contorno

As condições de contorno são os parâmetros definidos às *parts* do domínio e do edifício, a fim de determinar como cada uma influenciará no escoamento. As *parts* são classificadas em quatro grupos diferentes de condições de contorno: parede (*wall*); entrada (*inlet*); saída (*outlet*) e abertura (*opening*). Parede é a condição que se refere à fronteira sólida, não permitindo a entrada ou a saída de fluido. Os termos *inlet* e *outlet* são condições

²⁴ LES - Large Eddy Simulation

²⁵ O RMS é o desvio padrão das leituras das quantidades

referentes às fronteiras pelas quais o fluido entra e sai do domínio, respectivamente. Por fim, abertura (*opening*) é a condição que possibilita a entrada e a saída do fluido (LEITE, 2008).

As paredes podem exercer dois tipos de influência sobre o fluido: 1) sem escorregamento (*no slip*) e 2) com escorregamento (*free slip*). Segundo Cóstola (2006), essa classificação permite tratamento diferenciado às paredes “reais”, como as do edifício e do piso, classificadas sem escorregamento. Nesse caso, as partículas fluidas aderem à fronteira sólida, onde a velocidade do fluido é zero. Estabelecida essa condição, define-se a sua rugosidade: lisa (*smooth*) ou rugosa (*rough*). Além disso, tem-se paredes “para fins de simulação”²⁶, como o teto e as laterais do domínio, classificadas com escorregamento, onde não há camada limite e o fluido não adere ao sólido, minimizando os efeitos dessa fronteira na simulação. Brandão (2009) especifica as condições de contorno das superfícies sólidas, em relação ao seu comportamento aerodinâmico, da seguinte forma:

- **Free slip:** a superfície é considerada como se não tivesse atrito. O fluido não consegue atravessá-la, mas não há arraste, estabelecendo um perfil de escoamento uniforme ao longo do elemento. Esta condição é aplicada nas paredes e no teto do domínio, reduzindo o impacto das superfícies no fluido.
- **No slip (smooth wall):** há um coeficiente de atrito entre a superfície e o fluido, mas a rugosidade é considerada de ordem de grandeza muito inferior à do elemento em si. Esta condição é usada nas envoltórias da edificação e no piso do modelo, representando as superfícies urbanas. Pode-se determinar uma rugosidade à superfície, aumentando o seu atrito.
- **No slip (rough wall):** permite atribuir à superfície uma rugosidade, aumentando o seu coeficiente de atrito.

Com relação à turbulência, esta deve ser fornecida juntamente à velocidade. No CFX, não é possível fornecer um perfil de turbulência, informando-se apenas o seu nível: baixo (1%), médio (5%) e alto (10%). Cóstola (2006) sugere o uso do valor padrão do

²⁶ O termo das paredes “para fins de simulação” é, segundo Fox (2001), devido ao fato dos fluidos newtonianos caracterizarem-se pela condição de não-deslizamento e, quando em contato com uma fronteira sólida, aderem a ela e adquirem a mesma velocidade desta fronteira.

software: média intensidade (5%) na fronteira da entrada. Além disso, Neto et al. (2011) destaca a importância de considerar a variação da velocidade do vento com a altura.

Por fim, ressalta-se que para simulações térmicas, é possível ainda estabelecer a temperatura da superfície ou de um fluxo de calor. Caso se utilize um modelo de radiação no programa, a emissividade e a refletância devem ser determinadas (BRANDÃO, 2009). A simulação é salva com extensão *.cfx e, em seguida, é exportada para o CFX-Solver.

2.5.3.3 Controle de solução: convergência

Nessa etapa, são estabelecidos: o intervalo de tempo, o número máximo de iterações e o critério de convergência adotado para a solução matemática do modelo. As simulações são interrompidas quando se atinge o número máximo de iterações ou o critério de convergência RMS (BRANDÃO, 2009). Segundo Cóstola (2006) a solução de uma simulação CFD é feita de maneira iterativa, na qual os cálculos são refeitos sucessivas vezes, e o resultado do cálculo anterior alimenta o seguinte. Diz-se que a simulação converge quando as diferenças entre os resultados de etapas sucessivas tendem a diminuir²⁷.

O RMS é o desvio padrão das leituras das quantidades, permitindo calcular a diferença média entre a massa que sai e a que entra em cada célula, sendo que esta diferença é o resíduo que não foi distribuído entre entrada e saída (CÓSTOLA, 2006). A confiabilidade dos resultados da simulação é observada através da convergência. Cost (2004) sugere que o RMS seja igual ou inferior a 10^{-4} e, segundo CFX (2003), convergências de 10^{-4} são boas e devem ser a meta das simulações. Resíduos acima de 10^{-4} são pouco confiáveis e fornecem apenas uma ideia superficial do escoamento.

Outro parâmetro que deve ser considerado é o número adimensional y^+ (Yplus), que descreve a relação entre: a distância do primeiro ponto da malha até a fronteira sólida; a

²⁷ Um exemplo abordado por Cóstola (2006) relata que na iteração 1, no início da simulação, aplica-se uma velocidade no *inlet* e a quantidade de massa entrando na célula é grande. Nesse momento a velocidade na saída (*outlet*) é zero, ou seja, a massa fica acumulada na primeira iteração. Na próxima iteração, tem-se um desbalanceamento que vai sendo distribuído pelas células e assim sucessivamente, até que todas elas tenham praticamente a mesma quantidade de massa na entrada e na saída. Diante disso, o RMS permite calcular a diferença média entre a massa que sai e a massa que entra em cada célula. Esta diferença é o resíduo, que não foi distribuída entre entrada e saída. Da mesma forma ocorre com o momento, energia e a turbulência.

tensão provocada pelo escoamento nesta fronteira; a massa específica e a viscosidade do fluido. Segundo Cóstola (2006), y^+ pode ser definido pela equação 18:

$$y^+ = \frac{\rho \cdot \Delta y \cdot u^*}{\mu} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

ρ = massa específica (kg/m)

Δy = distância do primeiro ponto da malha até a parede (m)

u^* = velocidade de atrito (m/s)

μ = viscosidade dinâmica (N s/m²)

Apesar do valor de y^+ ser um parâmetro importante, é um dado de saída da simulação, não podendo ser fixado a priori, pois é calculado com base no u^* , que é uma incógnita na simulação. Como uma alternativa, seu valor pode ser estimado para determinar a dimensão da primeira camada de prismas (Δy) através da equação 19.

$$\Delta y = \sqrt{74} \cdot x y^+ \cdot x L x R_e^{-13/14} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde:

y^+ = adota-se um valor característico para o modelo de turbulência adotado.

L = dimensão da maior parede ou elemento presente no domínio (m)

Re = número de Reynolds gerado com base nas características da simulação

Segundo o manual do CFX, considerando-se o modelo de turbulência $k-\epsilon$, o valor de y^+ deve estar entre 20 e 100 (CÓSTOLA, 2006). Cost (2004) aconselha um valor de pelo menos 30. Leite e Frota (2013) ressaltam que para esse modelo de turbulência admite-se um valor entre 30 e 300, com aceitação de níveis até 1000. Já para os modelos de turbulência SST e *Eddy Viscosity Transport Equation* a literatura sugere valores em um intervalo bastante restrito (inferior a 2 no caso do SST), o que dificulta a aplicação desses modelos.

De acordo com Leite e Frota (2013) a literatura alterna entre considerações específicas e abrangentes em relação ao valor de y_{plus} . No entanto, é evidente a necessidade de correspondência dos seus valores de acordo com o modelo de turbulência adotado, permitindo a correta apreensão dos efeitos de desprendimento de camada limite. Os intervalos apresentados são por vezes controversos, mas é possível delinear limites aceitáveis de acordo com experiências tais como em Blocken, Stathopoulos e Carmeliet (2007) e Cóstola e Alucci (2011), contrapondo-se aos intervalos apresentados. Ressalta-se a necessidade do conhecimento dos limites específicos para cada modelo de turbulência.

2.5.4 CFX – SOLVER (EQUATION SOLVING)

Após essas etapas, inicia-se a simulação no CFX-Solver. O processamento pode ser acompanhado através de gráficos e tabelas, conferindo se o RMS converge de forma estável para o valor adotado no critério de convergência (figura 40). O tempo de finalização desta etapa depende do tamanho do domínio, da geometria, do refinamento da malha e da capacidade computacional. Ao final, o CFX gera um arquivo de resultados com extensão *.res, que deve ser importado para o CFX-Post, ultima etapa do processo.

Figura 40: RMS de (a) momento e massa e (b) turbulência na simulação
Fonte: Acervo da autora (2014)

2.5.5 CFX – Post

Os resultados das simulações podem ser qualitativos e quantitativos. Com relação aos qualitativos, têm-se principalmente imagens de vetores de direção dos ventos; dos contornos das velocidades; distribuição de pressão nas superfícies e das diferenças de

temperatura. As imagens podem ser gerados em planos bidimensionais e tridimensionais, onde importantes detalhes do escoamento são visualizados, como as zonas de recirculação de ar. Além disso, é possível exportar dados para análises externas ao software e produzir filmes para apresentação. Já a análise quantitativa ocorre pela mensuração de grandezas físicas como pressão, velocidade, vazão, entre outros.

A qualidade dos resultados deve ser analisada com base na teoria da mecânica dos fluidos e o entendimento do fenômeno físico que envolve a simulação é de vital importância para que os resultados sejam interpretados de forma coerente. Para isso, Fortuna (2000) aponta a necessidade de duas etapas de avaliação:

- 1) Etapa de verificação: comparar os resultados simulados com soluções de referência, constatando a compatibilidade do fenômeno e sua representação.
- 2) Etapa de validação: quantificar a representatividade do modelo em relação ao fenômeno real através de dados experimentais, como ensaios no túnel de vento.

Segundo Neto et al. (2011), existem diversas formas de analisar a coerência dos resultados de uma simulação CFD, tais como: a) construção de um modelo similar simétrico; b) comparação com resultados de modelos analíticos conhecidos. A concordância entre os resultados calculados analiticamente e os obtidos através da simulação é um indício da coerência do modelo CFD; c) verificação da conservação de massa, momento e energia em regiões da simulação. Uma solução realística deve ter resultados concordantes com a aplicação dessas equações para o volume do domínio. Para conferir à conservação da massa, a vazão que entra na edificação deve ser igual a que sai; e d) verificação experimental, comparando os dados experimentais obtidos em situação similar à simulada.

2.5.6 RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS: CFD E TÚNEL DE VENTO

Como a verificação de simulações CFD é indispensável para garantir a confiabilidade dos resultados (HOFF et al., 2011), nesse item serão apresentados alguns trabalhos que realizaram essas análises a fim de comparar dados numéricos com experimentais. De acordo com Fortuna (2000), o uso de métodos numéricos não significa

que as análises experimentais e teóricas devem ser descartadas. Em um projeto que envolva escoamento dos fluidos é muito comum as técnicas se complementarem, de forma que os resultados possam ser comparados, confirmando ou não a validade desses novos modelos.

Montazeri e Blocken (2013) apresentaram uma avaliação das distribuições de C_p nas superfícies a barlavento e a sotavento de um edifício com e sem varanda, através de simulações CFD e ensaios em túnel de vento. Os resultados das simulações tiveram uma boa concordância com os experimentais, embora algumas discrepâncias foram registradas. Os desvios médios absolutos entre as duas ferramentas foram de 0,052 e 0,072 para os pontos na borda e no meio, respectivamente. As razões exatas para isso não foram claras, mas é possível que a aceleração do fluxo sobre a mesa giratória do túnel, diretamente a montante do modelo, tenha causado algum efeito sobre os valores medidos. Os resultados da fachada a sotavento também foram bons, apresentando desvios médios absolutos de 0,069 e 0,070 para os pontos na borda e no meio, respectivamente.

Balbastro e Sonzogni (2012) estudaram a aerodinâmica de coberturas curvas sem fechamento lateral, através de medições de C_p para projetos estruturais, usando o *software* CFD PETScFEM e experimentos em túnel de vento. Foram analisados diferentes casos, variando as relações dimensionais. Notou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, com diferenças, em geral, menores que 10%.

No trabalho desenvolvido por Kim et al. (2010) os resultados das simulações CFD de supermercados com arcadas enclausuradas na Coreia foram comparados com experimentos em túnel de vento. Onze alternativas de projeto foram avaliadas para dois ângulos de incidência dos ventos: 0° e 90° . As simulações adotaram as mesmas condições dos ensaios. Para o ângulo de 90° , os resultados experimentais e os adquiridos pelas simulações foram quase idênticos. Já para o ângulo de 0° , algumas discrepâncias foram registradas. As diferenças foram de +29,2% para 0° e -1,5% para 90° . No entanto, como o padrão de distribuição do fluxo de ar foi similar nos dois casos, os autores concluíram que a simulação CFD para análise da taxa de renovação de ar é aceitável.

Kobayashi et al. (2010) também verificaram a confiabilidade de simulações CFD (*software Fluent*), através de ensaios no túnel de vento. Foram realizadas três diferentes

técnicas experimentais: a) medições de pressão estática no plano do piso; b) medições de velocidade por imagem de partículas (PIV) em 2D e c) visualização com método de erosão de areia. A distribuição dos Cps nas paredes a barlavento e a sotavento apresentou uma boa concordância entre as duas ferramentas, apesar dos resultados CFD subestimarem a queda de pressão no lado barlavento, devido à incapacidade de alguns *softwares* preverem a ocorrência de vórtices a barlavento. No entanto, de maneira geral, os padrões de fluxo simulados apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais.

Além disso, distribuições verticais da velocidade foram realizadas e os resultados apresentaram boa compatibilidade, embora os valores da velocidade tenham sido subestimados pelo CFD. Por fim, a distribuição do fluxo de ar no CFD e a visualização pelo método de erosão no túnel apresentaram uma concordância qualitativa muito boa, mostrando a capacidade de ambos os métodos para prever análises qualitativas.

Wong e Heryanto (2004) estudaram o potencial do uso do efeito chaminé para aumentar a ventilação natural em apartamentos em Singapura. Foram avaliados o tamanho e a localização da chaminé com as portas dos ambientes abertas e fechadas, através de ensaios no túnel de vento e simulações com *software Phoenix* v3.3, a fim de verificar a compatibilidade entre as ferramentas. O estudo foi realizado com base em medições das velocidades do ar. Em geral, as simulações apresentaram velocidades mais altas que os valores obtidos experimentalmente, para todos os casos analisados. A porcentagem média de discrepância mínima e máxima entre os métodos foi de 42% e 57%.

Uma pesquisa realizada por Jiang et al. (2003) investigou os efeitos da ventilação pela ação dos ventos dentro, ao redor e através de edifícios com aberturas, utilizando simulações com modelo de turbulência LES e ensaios no túnel de vento. Os parâmetros avaliados foram: velocidade dos ventos e a distribuição das pressões dentro e ao redor do modelo. Os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância com os experimentais com relação ao padrão do fluxo de ar, as velocidades médias e as pressões de superfície. Foram registradas algumas discrepâncias entre as duas ferramentas que ocorreram principalmente devido ao refinamento das malhas utilizadas nas simulações.

Com relação aos resultados de velocidade, em geral os dados numéricos apresentam boa concordância com os experimentais, apresentando uma diferença entre eles menor que 5% para a maioria das regiões. Isso indica que o LES pode ser usado para estudos de ventilação natural com uma precisão aceitável. No entanto, existem algumas discrepâncias, como os valores médios simulados acima da cobertura que foram 30% maior que os experimentais. Testes de refinamento da malha reduziram essa discrepância, possibilitando uma maior concordância entre os dados. Diante disso, notou-se que o baixo refinamento da malha foi a razão para as maiores discrepâncias encontradas. Com relação ao padrão de escoamento, teve-se uma boa concordância entre as duas ferramentas, em especial na região a sotavento. Algumas diferenças foram registradas no fluxo reverso ao longo do piso em frente a fachada a barlavento.

Por fim, com relação à distribuição dos coeficientes de pressão médios ao longo das superfícies do edifício, as simulações CFD apresentaram uma boa predição desses valores, embora pequenas discrepâncias foram registradas ao longo da cobertura, onde os valores medidos foram menores que os simulados. Os bons resultados de pressão indicaram novamente a confiança na utilização do método LES para localizar as aberturas na edificação e prever seus desempenhos, mesmo em fluxos altamente perturbados.

No trabalho de Gomes et al. (2005), coeficientes de pressão em modelos com geometria cúbica, em L e em U foram medidos através de simulação CFD e foram comparadas com dados através de ensaios em túnel de vento, para ângulos de incidência dos ventos perpendicular e oblíquo a fachada. Em geral, registrou-se uma boa concordância dos dados para o ângulo de incidência normal à fachada, enquanto algumas diferenças ocorreram para as outras direções.

Ramponi e Blocken (2012) compararam os resultados das simulações CFD com dados experimentais em termos de razão de velocidade do vento ao longo da linha central das aberturas e por imagens de vetores em um plano central vertical. Os resultados mostraram uma concordância muito boa para 3 das 4 configurações analisadas, sendo que algumas discrepâncias foram notadas nas regiões próximas as aberturas de entrada e saída de ar. Uma baixa concordância foi registrada apenas para a quarta configuração.

No trabalho de Calautit e Hughes (2014) o desempenho da ventilação natural de uma torre de vento multi-direcional conectada a um ambiente de teste foi avaliada através de simulações com o *software* Ansys 12.1 Fluent e ensaios no túnel de vento. Os testes foram conduzidos para diversas velocidades (faixa de 0,5 - 5m/s) e ângulos de incidência dos ventos (de 0° a 90°). Fluxos de ar interno e externo, taxas de ventilação e coeficientes de pressão foram medidos pelos métodos numéricos e experimentais nos mesmos pontos. Experimentos de visualização por fumaça também foram realizados para uma análise mais profunda e detalhada do fluxo de ar dentro da torre de vento. Em geral, os resultados numéricos de distribuição do fluxo de ar interno e externo, as taxas de ventilação e os Cps na superfície do modelo apresentaram uma boa concordância com as medições no túnel de vento (0 - 20%). Além disso, o teste de visualização de fumaça mostrou a capacidade do *software* CFD em replicar a distribuição do fluxo de ar no interior da torre de vento e do ambiente.

Metodologia

capítulo 3

3. METODOLOGIA

Após a revisão bibliográfica, que possibilitou o entendimento geral sobre o tema, para atingir os objetivos dessa pesquisa, utilizou-se uma metodologia dividida em 4 etapas principais e 7 subetapas, que se cruzam ao longo do processo.

- 1) **Etapa de preparação:** composta pelo levantamento de dados visando à seleção das geometrias de *sheds* que serão avaliadas. Posteriormente foi realizada a definição dos modelos através da seleção dos dados climáticos, da definição do caso de referência e dos diversos parâmetros de projeto para avaliação. Essa fase serviu de base para o desenvolvimento das etapas seguintes.
- 2) **Etapa numérica:** corresponde às simulações computacionais através de Dinâmica dos Flúidos Computacional (CFD), utilizando o *software* Ansys CFX, composta por duas subetapas: a) simulação do caso de referência e b) simulação dos diversos parâmetros de projeto avaliados (análise paramétrica).
- 3) **Etapa experimental:** é composta por ensaios no túnel de vento para verificar a confiabilidade dos resultados adquiridos na etapa numérica e também foi subdividida em duas fases: a) os ensaios do caso de referência, a fim de verificar os resultados numéricos obtidos na primeira fase da etapa anterior e b) testes dos modelos otimizados após a finalização da análise paramétrica.
- 4) **Etapa final:** destinada a elaboração de um fluxograma geral com as recomendações projetuais para *sheds* extratores e captadores de ar

Todas as etapas estão interligadas entre si e após a elaboração do fluxograma final com as recomendações projetuais, tem-se a continuidade da pesquisa através de novos trabalhos a partir da aplicação e da avaliação de *sheds* extratores e captadores de ar. A figura 41 ilustra a estrutura metodológica da pesquisa com as interações existentes entre as diferentes etapas que são, em seguida, descritas individual e detalhadamente.

Figura 41: Estrutura metodológica das etapas da pesquisa

3.1 ETAPA DE PREPARAÇÃO

3.1.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Para a definição das geometrias dos *sheds* avaliados nessa pesquisa, primeiramente, realizou-se um levantamento de dados das edificações projetadas por Lelé que apresentam *sheds*. Os critérios para a sua escolha foram cinco: 1) arquiteto brasileiro que mais utiliza *sheds* captadores e extratores de ar e com a maior variação geométrica; 2) facilidade de acesso aos seus projetos devido ao trabalho anteriormente desenvolvido por Lukiantchuki (2010); 3) atua em regiões de clima quente-úmido, onde o uso da ventilação natural é uma das soluções mais eficientes para o alcance do conforto térmico; 4) uso de *sheds*

aerodinâmicos que não são comuns à maioria dos casos no Brasil e 5) arquiteto pioneiro em projetos sustentáveis, cuja postura sempre foi de integrar princípios ambientais desde a concepção dos edifícios. Esse levantamento foi realizado em duas etapas:

A primeira foi composta de uma pesquisa nas principais publicações existentes sobre a sua obra (LAGO et al., 2010; LATORRACA, 1999; LIMA, 1999; LIMA, 2013; RISÉRIO et al., 2011), organizando todos os projetos que possuem *sheds* em ordem cronológica, totalizando 38 edifícios. Posteriormente, como um dos principais interesses da pesquisa é o estudo das geometrias aerodinâmicas, selecionaram-se aquelas com formatos curvos, que estão presentes principalmente nos hospitais da Rede Sarah, nos Tribunais de Contas da União (TCU) e nos Tribunais Regionais Eleitorais (TRE), totalizando 23 projetos (apêndice 8.1).

Em seguida, foi realizada uma pesquisa no acervo de projetos de Lelé no Centro de Tecnologia da Rede Sarah (CTRS), em Salvador – BA, cujos desenhos dos projetos selecionados estão armazenados e catalogados. O processo de investigação em fontes primárias possibilitou reunir uma documentação essencial para a construção de um quadro comparativo entre as diferentes configurações dos *sheds*. Dos 23 projetos selecionados anteriormente, 20 foram disponibilizados em formato digital com os detalhes construtivos desses dispositivos, o que facilitou a definição e a construção dos modelos físicos e digitais utilizados nas etapas posteriores de simulações e ensaios no túnel de vento (apêndice 8.2).

Por fim, buscando complementar essa etapa, foram realizadas entrevistas com Lelé e com dois profissionais de sua equipe, destacando as mudanças ocorridas nas geometrias desses dispositivos arquitetônicos ao longo dos anos. As entrevistas foram semiestruturadas abertas, sendo necessárias algumas complementações nas informações. Todas as entrevistas foram gravadas e transcritas para gerar um banco de informações e os entrevistados autorizaram a publicação dos resultados. A tabela 9 a seguir apresenta os profissionais entrevistados, a função, o local, dia, hora e a duração de cada entrevista.

Tabela 9: Entrevistas realizadas

Profissional	Função	Local	Dia	Hora	Duração
João Filgueiras Lima, Lelé	Arquiteto	Salvador - BA	25/11/2011	14h00	02:02'17''
José Fernando Minho	Arquiteto	Salvador - BA	24/11/2011	16h00	43'19''
Roberto Vitorino	Engenheiro Civil	Salvador - BA	24/11/2011	09h30	01:43'25''

3.1.2 SELEÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS

O desempenho dos *sheds* também foi avaliado sob a influência de diferentes velocidades e ângulos de incidência dos ventos externos. Com relação às velocidades, buscou-se um levantamento dos dados climáticos de diferentes cidades brasileiras para estabelecer uma referência de valores baixo, médio e alto. Primeiramente, selecionaram-se as cidades de referência para a coleta dos dados. De acordo com a NBR 15220/3 (2005) o território brasileiro foi dividido em 8 zonas bioclimáticas (ZB) com base nas características climáticas de cada região, conforme ilustrado na figura 42. De todas as zonas, somente a ZB1 não possui recomendação para o uso da ventilação natural como estratégia de resfriamento. Todas as outras regiões indicam o seu uso em algum período, destacando a ZB8, cuja ventilação deve ser permanente durante todo o ano (tabela 10).

Figura 42: Território brasileiro dividido em 8 zonas bioclimáticas
Fonte: Software ZBBR (2004)

Tabela 10: Recomendações do uso da ventilação natural pela NBR15220-3

ZBB	Frequência do uso da ventilação natural
ZB1	Não apresenta
ZB2	Ventilação cruzada no verão
ZB3	Ventilação cruzada no verão
ZB4	Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temp. interna é superior à externa)
ZB5	Ventilação cruzada no verão
ZB6	Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temp. interna é superior à externa)
ZB7	Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temp. interna é superior à externa)
ZB8	Ventilação natural permanente

Selecionando uma cidade representativa de cada zona bioclimática brasileira, Neves (2012) verificou, através dos programas *Architectural Bioclimatic Classification* (ABC, versão 1.3) e *Analysis Bio* (versão 2.1.3), a necessidade do uso da ventilação natural, para cada caso, em porcentagem de horas durante um ano (tabela 11).

Tabela 11: Cidades representativas do zoneamento bioclimático brasileiro

ZBB	Cidade	Latitude	Recomendações de ventilação natural (% do ano)
ZB1	Curitiba - PR	25°31'S	1,5% (janeiro a março)
ZB2	Santa Maria - RS	29°42'S	4,2% (janeiro a março)
ZB3	Florianópolis - SC	27°42'S	20,7% (novembro a abril)
ZB4	Brasília - DF	15°54'S	4,7% (novembro a março)
ZB5	Santos - SP	23°54'S	27% (outubro a abril)
ZB6	Campo Grande - MS	20°30'S	14,1% (novembro a abril)
ZB7	Petrolina - PE	9°24'S	32,9% (outubro a junho)
ZB8	Belém - PA	1°24'S	70,7% (ano todo)

Fonte: Adaptado de Neves (2012)

Diante disso, selecionaram-se os dados climatológicos das séries históricas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do período de 2002 a 2011 (tabela 12), das principais cidades localizadas na ZB8, devido a necessidade da ventilação natural nessas regiões.

Tabela 12: Resumo dos dados climáticos médios das cidades selecionadas de 2002 a 2011

Cidade	TBS máxima (°C)	TBS mínima (°C)	Umidade relativa (%)	Velocidade dos ventos (m/s)
Belém - PA	32,3	23,1	81,5	1,50
Manaus - AM	32,6	24,0	79,6	0,81
Maceió - AL	29,8	20,7	77,1	2,96
Natal - RN	29,8	23,5	78,6	4,16
Salvador - BA	29,2	22,2	80,1	1,87
Fortaleza - CE	31,0	23,8	75,2	3,02
Recife - PE	29,6	22,3	75,9	2,22
João Pessoa - PB	30,0	23,8	75,3	3,00
Aracaju - SE	29,6	23,4	76,0	3,22
São Luís - MA	31,4	24,0	80,4	2,03
Macapá - AP	32,0	24,0	78,7	2,06
Rio Branco - AC	31,4	20,8	83,2	1,12
Rio de Janeiro - RJ	30,3	21,8	71,0	1,05
Média	30,7	22,8	77,8	2,23

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2011)

De acordo com os dados da tabela 12, nota-se que existe uma variação significativa nos valores das velocidades dos ventos entre as cidades selecionadas. Diante disso, definiram-se três valores de velocidades, caracterizados por: baixa, média e alta, em termos

médios: 1,5m/s – 3,0m/s e 4,5m/s, respectivamente. No entanto, visando uma análise não apenas pelos valores médios de velocidade, investigaram-se esses dados mais detalhadamente através de arquivos no formato Epw²⁸ elaborados por Roriz (2012). Através das rosas dos ventos de cada cidade (apêndice 8.3), observaram-se a direção predominante dos ventos e a frequência para cada velocidade. Novamente, constatou-se uma grande diferença nesses dados para as cidades selecionadas (tabela 13). Sendo assim, gerou-se a média dos valores baixos, médios e altos para definir as referências de velocidades dos ventos utilizados como dados de entrada das simulações. Como o valor baixo está muito próximo de 0,0m/s, utilizou-se o que foi encontrado no Inmet (1,5m/s). Já o médio, foi aproximado para 3,0m/s. Por fim, adotou-se para alto 7,0m/s. Esses valores são referentes os dados medidos nas estações climatológicas, a 10m de altura e, sendo assim, foi utilizada a equação 6, descrita no item 2.1.2.3 Camada Limite Atmosférica (CLA) da revisão bibliográfica, para a correção dessas velocidades na altura da edificação.

Tabela 13: Velocidade dos ventos para as cidades selecionadas a partir dos arquivos Epw's

Cidade	Direção dos ventos predominantes (°)	Velocidade dos ventos (m/s)		
		Baixa	Média	Alta
Belém - PA	110	0,0	1,5	5,2
Manaus - AM	100	0,0	2,3	5,8
Maceió - AL	100	0,1	4,0	6,5
Natal - RN	90	0,8	4,3	11,0
Salvador - BA	70	0,0	1,9	4,2
Fortaleza - CE	90	0,0	3,0	7,0
Recife - PE	120	0,5	2,3	4,8
João Pessoa - PB	140	0,2	3,8	6,3
Aracaju - SE	100	0,2	4,2	7,8
São Luís - MA	40	0,0	2,2	6,1
Macapá - AP	330	0,0	1,0	3,2
Rio Branco - AC	0/10/20/350	0,0	3,0	8,0
Rio de Janeiro - RJ	280	0,0	2,0	10,0
Média das velocidades	----	0,20	2,7	6,6

Fonte: Adaptado de Roriz (2012)

Com relação aos ângulos de incidência dos ventos externos, os *sheds* foram avaliados como extratores de ar (0° e 45°), em uma situação neutra (90°) e como captadores de ar (135° e 180°), conforme a figura 43.

²⁸ EPW (*EnergyPlus Weather File*)

Figura 43: Ângulos de incidência dos ventos externos analisadas
Fonte: Acervo da autora (2014)

3.1.3 DEFINIÇÃO DO CASO DE REFERÊNCIA

A definição do caso de referência, onde serão realizadas as variações dos parâmetros projetuais, adotou os seguintes passos. Como edifícios com *sheds* diferem da maioria dos edifícios padrões, para a definição desse modelo foram utilizadas as proporções construtivas das edificações projetadas por Lelé, por esse trabalho se basear no seu banco de dados de geometrias de *sheds*. As principais características dos edifícios desse arquiteto, utilizadas como base para a elaboração do caso de referência, foram: 1) edifícios térreos e retangulares; 2) modulação de 0,625m (1L)²⁹ que será a referência para todas as proporções do edifício; 3) distância entre os *sheds* de 2,50m (4L); 4) pé-direito na base inferior e superior dos *sheds* de 4,375m e 5,00m, respectivamente; 5) Com relação às aberturas de entrada e saída de ar, adotou-se a dimensão da abertura mais baixa igual a cada abertura dos *sheds* (1L), para facilitar a relação entre os resultados dessa e de outras pesquisas, uma vez que Lelé trabalha com galerias subterrâneas para captação, o que difere dos edifícios padrão. O levantamento detalhado dessas características se encontra no apêndice 8.4.

A tabela 14 apresenta os dados do caso de referência, e as figuras 44 e 45 a planta e o corte com as dimensões especificadas e as perspectivas, respectivamente, desse modelo. O shed adotado no caso de referência possui formato ortogonal (dente de serra) por ser a geometria utilizada na maior parte dos edifícios comuns.

²⁹ Nomenclatura adotada nessa pesquisa para representar o valor de um módulo (1L = 0,625m)

Tabela 14: Configuração do caso de referência utilizado na análise paramétrica

	Parâmetro	Módulo	Valor padrão
Edifício	Comprimento	12L	7,50m
	Largura	8L	5,00m
	Pé-direito maior	8L	5,00m
	Pé-direito menor	7L	4,375m
	Distância vertical entre as aberturas	6L	3,75m
Abertura na fachada (A1) ³⁰	Comprimento	8L	5,00m
	Altura	1L	0,625m
	Peitoril	1L	0,625m
	Área efetiva de abertura	5L	3,125m ²
Abertura de cada shed (S1, S2 e S3)	Comprimento	8L	5,00m
	Altura	1L	0,625m
	Peitoril	7L	4,375m
	Área efetiva de abertura	5L	3,125m ²
Sheds	Geometria dos sheds	--	Ortogonal
	Distância horizontal entre os sheds	4L	2,50m
	Número de sheds	--	03
	Ângulo de inclinação	--	14°
	Inclinação das aberturas	--	90°

Figura 44: Caso de referência com as dimensões (a) planta baixa e (b) corte (sem escala)
Fonte: Acervo da autora (2014) **Figura 45:** Perspectiva do caso de referência (sem escala)
Fonte: Acervo da autora (2014)

³⁰ Adotou-se um peitoril de 0,625m, que é a modulação utilizada e para adquirir uma corrente de ar na altura do usuário. Segundo a ISO 7726 (1985) as partes sensíveis do corpo humano para a pessoa sentada é: 0,10m no nível do pé; 0,60m no nível do tórax e 1,10m no nível da cabeça. Para uma pessoa em pé é: 0,10m no nível do pé; 1,10m no nível da cintura e 1,70m no nível da cabeça.

3.1.4 PARÂMETROS DE PROJETO ANALISADOS

A análise paramétrica consiste na variação de alguns parâmetros de projeto pré-selecionados, a fim de verificar suas influências sobre o desempenho de *sheds* extratores e captadores de ar. A escolha desses parâmetros foi baseada em características significativas no desempenho da ventilação natural desses dispositivos. A análise foi desenvolvida para diferentes valores de cada parâmetro, e cada variação foi avaliada e comparada com o caso de referência. Para a análise das diferentes configurações, modificou-se apenas um parâmetro por vez, de modo a identificar a sensibilidade do sistema para cada parâmetro isoladamente. Descrevem-se, em seguida, os detalhes dos parâmetros avaliados. As características projetuais em destaque são as que sofreram alterações.

Parâmetro 01: Geometria dos <i>sheds</i>			
Justificativa: A variação da geometria dos <i>sheds</i> altera a forma da edificação, o que influencia na distribuição das pressões no edifício, nos valores de C_p das aberturas e nas taxas de renovação de ar/hora. Diante disso, 5 diferentes geometrias serão analisadas: caso de referência (CR), geometria um (G01); geometria dois (G02), geometria três (G03) e geometria quatro (G04), visando identificar qual desses formatos exerce uma melhor influência no desempenho dos fluxos de ar no interior e ao redor da edificação.			
Casos	Caso de referência (CR)	Geometria um (G01)	Geometria dois (G02)
Imagens
	N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03
	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
	Distância as abert. = 3,75m	Distância as abert. = 3,75m	Distância as abert. = 3,75m
Casos	Geometria três (G03)		Geometria quatro (G04)
Imagens
	N. <i>sheds</i> = 03		N. <i>sheds</i> = 03
	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m		Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m
	Abertura fachada = 0,625m		Abertura fachada = 0,625m
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m		Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
	Distância as abert. = 3,75m		Distância as abert. = 3,75m

Os parâmetros seguintes foram simulados apenas para três geometrias: CR, G03 e G04, devido a similaridade dos resultados entre G02 e G04 e CR e G01, conforme apresentado no capítulo dos resultados, no item 4.3.1 variação na geometria dos sheds.

Parâmetro 02: Dimensão da altura da abertura da fachada (A1)			
Justificativa: Alterou-se a dimensão da abertura A1 a fim de avaliar a influência desse parâmetro na quantidade do fluxo que entra e sai do edifício (vazão volumétrica), nas taxas de renovação de ar/hora e na distribuição qualitativa do fluxo de ar interno. Analisaram-se 3 diferentes dimensões: 0,625m (1L) – 0,9375m (3L/2) – 1,25m (2L).			
Casos	Caso de referência (CR)	Geometria três (G03)	Geometria quatro (G04)
CA
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Distância sheds = 2,50m	Distância sheds = 2,50m	Distância sheds = 2,50m
	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
	Área abert. sheds = 9,37m ²	Área abert. sheds = 9,37m ²	Área abert. sheds = 9,37m ²
CA1
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Distância sheds = 2,50m	Distância sheds = 2,50m	Distância sheds = 2,50m
	Abertura A1 = 0,9375m	Abertura A1 = 0,9375m	Abertura A1 = 0,9375m
	Área abertura A1 = 4,68m ²	Área abertura A1 = 4,68m ²	Área abertura A1 = 4,68m ²
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
	Área abert. sheds = 9,37m ²	Área abert. sheds = 9,37m ²	Área abert. sheds = 9,37m ²
CA2
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Distância sheds = 2,50m	Distância sheds = 2,50m	Distância sheds = 2,50m
	Abertura A1 = 1,25m	Abertura A1 = 1,25m	Abertura A1 = 1,25m
	Área abertura A1 = 6,25m ²	Área abertura A1 = 6,25m ²	Área abertura A1 = 6,25m ²
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
	Área abert. sheds = 9,37m ²	Área abert. sheds = 9,37m ²	Área abert. sheds = 9,37m ²

Parâmetro 03: Dimensão da altura das aberturas dos sheds (S1, S2 e S3)

Justificativa: Alterou-se a dimensão das aberturas dos sheds a fim de avaliar a influência desse parâmetro na quantidade do fluxo que entra e sai do edifício (vazão volumétrica), nas taxas de renovação de ar/hora e na distribuição qualitativa do fluxo de ar interno.

Analísaram-se 3 diferentes dimensões: 0,625m (1L) – 0,9375m (3L/2) – 1,25m (2L).

Casos	Caso de referência (CR)	Geometria três (G03)	Geometria quatro (G04)
CA
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Distância entre sheds = 2,50m	Distância entre sheds = 2,50m	Distância entre sheds = 2,50m
	Abertura Fachada = 0,625m	Abertura Fachada = 0,625m	Abertura Fachada = 0,625m
	Área abert. Fachada = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
	Área total sheds = 9,37m ²	Área total sheds = 9,37m ²	Área total sheds = 9,37m ²
CS1
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Distância entre sheds = 2,50m	Distância entre sheds = 2,50m	Distância entre sheds = 2,50m
	Abertura Fachada = 0,625m	Abertura Fachada = 0,625m	Abertura Fachada = 0,625m
	Área abert. Fachada = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²
	Altura abert. Sheds = 0,973m	Altura abert. Sheds = 0,973m	Altura abert. Sheds = 0,973m
	Área total sheds = 14,06m ²	Área total sheds = 14,06m ²	Área total sheds = 14,06m ²
CS2
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Distância entre sheds = 2,50m	Distância entre sheds = 2,50m	Distância entre sheds = 2,50m
	Abertura Fachada = 0,625m	Abertura Fachada = 0,625m	Abertura Fachada = 0,625m
	Área abert. Fachada = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²
	Altura abert. Sheds = 1,25m	Altura abert. Sheds = 1,25m	Altura abert. Sheds = 1,25m
	Área total sheds = 18,75m ²	Área total sheds = 18,75m ²	Área total sheds = 18,75m ²

Parâmetro 04: Número de *sheds*

Justificativa: A alteração do número de *sheds* na cobertura modifica a área total das aberturas dos *sheds*. Isso pode exercer uma influência no desempenho qualitativo e quantitativo do fluxo de ar interno através de modificações nos valores dos Cps nessas aberturas e nas taxas de renovação de ar/hora.

Analísaram-se edifícios com 3, 5 e 7 *sheds*. Essas variações foram realizadas para 3 diferentes geometrias dos *sheds*: CR, G03 e G04.

Casos	Caso de referência (CR)	Geometria três (G03)	Geometria quatro (G04)
CA
	Distância <i>sheds</i> = 2,50m	Distância <i>sheds</i> = 2,50m	Distância <i>sheds</i> = 2,50m
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
	Área abert. <i>sheds</i> = 9,375m ²	Área abert. <i>sheds</i> = 9,375m ²	Área abert. <i>sheds</i> = 9,375m ²
	N. de <i>sheds</i> = 03	N. de <i>sheds</i> = 03	N. de <i>sheds</i> = 03
	Volume = 175,8 m ³	Volume = 293,0m ³	Volume = 410,1 m ³
CS5
	Distância <i>sheds</i> = 2,50m	Distância <i>sheds</i> = 2,50m	Distância <i>sheds</i> = 2,50m
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
	Área abert. <i>sheds</i> = 15,62 m ²	Área abert. <i>sheds</i> = 15,62 m ²	Área abert. <i>sheds</i> = 15,62 m ²
	N. de <i>sheds</i> = 05	N. de <i>sheds</i> = 05	N. de <i>sheds</i> = 05
	Volume = 182,9m ³	Volume = 304,8m ³	Volume = 426,7m ³
CS7
	Distância <i>sheds</i> = 2,50m	Distância <i>sheds</i> = 2,50m	Distância <i>sheds</i> = 2,50m
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
	Área abert. <i>sheds</i> = 21,87 m ²	Área abert. <i>sheds</i> = 21,87 m ²	Área abert. <i>sheds</i> = 21,87 m ²
	N. de <i>sheds</i> = 07	N. de <i>sheds</i> = 07	N. de <i>sheds</i> = 07
	Volume = 168,4m ³	Volume = 280,6m ³	Volume = 392,8m ³

	Distância <i>sheds</i> = 2,50m	Distância <i>sheds</i> = 2,50m	Distância <i>sheds</i> = 2,50m
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
	Área abert. <i>sheds</i> = 21,87 m ²	Área abert. <i>sheds</i> = 21,87 m ²	Área abert. <i>sheds</i> = 21,87 m ²
	N. de <i>sheds</i> = 07	N. de <i>sheds</i> = 07	N. de <i>sheds</i> = 07
	Volume = 168,4m ³	Volume = 280,6m ³	Volume = 392,8m ³

Parâmetro 05: Distância entre os *shed* alterando a área total das aberturas dos *sheds*

Justificativa: O aumento da distância entre esses dispositivos altera o número de *sheds* na cobertura e a área total das aberturas desses dispositivos, o que pode influenciar nos valores de C_p nas aberturas, nas taxas de renovação de ar/hora e, conseqüentemente, no desempenho do fluxo de ar interno.

Analísaram-se 5 diferentes distâncias: 2,50m (4L); 3,75m (5L), 5,00m (8L), 7,50m (12L) e 15m (24L). Essas variações foram realizadas para 3 diferentes geometrias dos *sheds*: CR, G03 e G04.

Casos	Caso de referência (CR)	Geometria três (G03)	Geometria quatro (G04)
CS7
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²
	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m
	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m
	N. <i>sheds</i> = 07	N. <i>sheds</i> = 07	N. <i>sheds</i> = 07
CS8
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²
	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m
	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 3,75m	Distância entre <i>sheds</i> = 3,75m	Distância entre <i>sheds</i> = 3,75m
	N. <i>sheds</i> = 05	N. <i>sheds</i> = 05	N. <i>sheds</i> = 05
CS9
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²	Área abert. Fachada = 3,12m ²
	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m
	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m
	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04

Parâmetro 05 (continuação): Distância entre os *shed* alterando a área total das aberturas dos *sheds*

Justificativa: O aumento da distância entre esses dispositivos altera o número de *sheds* na cobertura e a área total das aberturas desses dispositivos, o que pode influenciar nos valores de C_p nas aberturas, nas taxas de renovação de ar/hora e, conseqüentemente, no desempenho do fluxo de ar interno.

Analísaram-se 5 diferentes distâncias: 2,50m (4L); 3,75m (5L), 5,00m (8L), 7,50m (12L) e 15m (24L). Essas variações foram realizadas para 3 diferentes geometrias dos *sheds*: CR, G03 e G04.

Casos	Caso de referência (CR)	Geometria três (G03)	Geometria quatro (G04)
CS10
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m
	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m
	N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03
CS11
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m
	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 15,0m	Distância entre <i>sheds</i> = 15,0m	Distância entre <i>sheds</i> = 15,0m
	N. <i>sheds</i> = 02	N. <i>sheds</i> = 02	N. <i>sheds</i> = 02

	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m	Abertura <i>sheds</i> = 0,625m
	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²	Área de cada <i>shed</i> = 3,12m ²
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 15,0m	Distância entre <i>sheds</i> = 15,0m	Distância entre <i>sheds</i> = 15,0m
	N. <i>sheds</i> = 02	N. <i>sheds</i> = 02	N. <i>sheds</i> = 02

Parâmetro 06: Distância entre os *shed* mantendo a área total das aberturas dos *sheds*

Justificativa: No parâmetro anterior, analisa-se o aumento da distância entre os *sheds* com a redução da área total das aberturas desses dispositivos. Nesse caso, analisa-se também a influência do aumento da distância entre os *sheds*, mas mantendo a área total de suas aberturas iguais através do aumento da altura das aberturas dos *sheds*. Essa configuração pode exercer uma influência diferente no fluxo de ar interno, em relação ao parâmetro anterior, através da modificação qualitativa do fluxo de ar interno e ao redor dos *sheds* e, conseqüentemente, da vazão volumétrica e das taxas de renovação de ar/hora. Analisaram-se 3 diferentes distâncias e alturas das aberturas dos *sheds*, visando manter a área total das aberturas desses dispositivos igual: 2,50m (0,625m); 5,00m (1,0937m) e 7,50m (1,4583m). Essas variações foram realizadas para 3 diferentes geometrias dos *sheds*: CR, G03 e G04.

Casos	Caso de referência (CR)	Geometria três (G03)	Geometria quatro (G04)
CS7
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1= 3,12m ²	Área abertura A1= 3,12m ²	Área abertura A1= 3,12m ²
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
	Área total <i>Sheds</i> = 21.875m ²	Área total <i>Sheds</i> = 21.875m ²	Área total <i>Sheds</i> = 21.875m ²
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m
CS12
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1= 3,12m ²	Área abertura A1= 3,12m ²	Área abertura A1= 3,12m ²
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 1,0937m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 1,0937m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 1,0937m
	Área total <i>Sheds</i> = 21.875m ²	Área total <i>Sheds</i> = 21.875m ²	Área total <i>Sheds</i> = 21.875m ²
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m
CS13
	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m	Abertura fachada = 0,625m
	Área abertura A1= 3,12m ²	Área abertura A1= 3,12m ²	Área abertura A1= 3,12m ²
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 1,4583m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 1,4583m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 1,4583m
	Área total <i>Sheds</i> = 21.875m ²	Área total <i>Sheds</i> = 21.875m ²	Área total <i>Sheds</i> = 21.875m ²
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m

Parâmetro 07: Alinhamento dos *sheds* em relação ao eixo horizontal e a distância entre eles

Justificativa: Intercalar os *sheds* em relação ao eixo horizontal do edifício, juntamente com o aumento da distância entre esses dispositivos pode influenciar no desempenho do fluxo de ar interno, uma vez que altera a área total das aberturas na cobertura. Além disso, o desalinhamento desses elementos arquitetônicos pode modificar a influência que o *shed* localizado a barlavento exerce sobre esses dispositivos localizados a sotavento. Analisaram-se 5 configurações: CS7 (*sheds* alinhados, ocupando a largura total do edifício e distantes entre si em 2,50m); CAD1 (*sheds* intercalados em 2 fileiras, ocupando metade da largura do edifício, e distantes entre si em 2,50m); CAD2 (*sheds* intercalados em 2 fileiras, ocupando metade da largura do edifício, e distante entre si em 5,00m); CAD3 (*sheds* intercalados em 2 fileiras, ocupando metade da largura do edifício, e distante entre si em 7,50m) e CAD4 (*sheds* intercalados em 3 fileiras, ocupando 1/3 da largura do edifício, e distante entre si em 5,00m). Essas variações foram realizadas para 3 diferentes geometrias dos *sheds*: CR, G03 e G04.

Casos	Caso de referência (CR)	Geometria três (G03)	Geometria quatro (G04)
CS7
	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m
	N. <i>sheds</i> = 07	N. <i>sheds</i> = 07	N. <i>sheds</i> = 07
	Alinhamento <i>sheds</i> = 1 fileira	Alinhamento <i>sheds</i> = 1 fileira	Alinhamento <i>sheds</i> = 1 fileira
	Largura abert. <i>sheds</i> = 5,00m	Largura abert. <i>sheds</i> = 5,00m	Largura abert. <i>sheds</i> = 5,00m
CAD1
	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m
	N. <i>sheds</i> = 07	N. <i>sheds</i> = 07	N. <i>sheds</i> = 07
	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras
	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m
CAD2
	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m
	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04
	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras
	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m
CAD3
	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m
	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04
	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras
	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m
CAD4			
	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m
	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04
	Alinhamento <i>sheds</i> = 3 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 3 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 3 fileiras
	Largura abert. <i>sheds</i> = 1,67m	Largura abert. <i>sheds</i> = 1,67m	Largura abert. <i>sheds</i> = 1,67m

Parâmetro 07 (continuação): Alinhamento dos *sheds* em relação ao eixo horizontal e a distância entre eles

Justificativa: Intercalar os *sheds* em relação ao eixo horizontal do edifício, juntamente com o aumento da distância entre esses dispositivos pode influenciar no desempenho do fluxo de ar interno, uma vez que altera a área total das aberturas na cobertura. Além disso, o desalinhamento desses elementos arquitetônicos pode modificar a influência que o *shed* localizado a barlavento exerce sobre esses dispositivos localizados a sotavento. Analisaram-se 5 configurações: CS7 (*sheds* alinhados, ocupando a largura total do edifício e distantes entre si em 2,50m); CAD1 (*sheds* intercalados em 2 fileiras, ocupando metade da largura do edifício, e distantes entre si em 2,50m); CAD2 (*sheds* intercalados em 2 fileiras, ocupando metade da largura do edifício, e distante entre si em 5,00m); CAD3 (*sheds* intercalados em 2 fileiras, ocupando metade da largura do edifício, e distante entre si em 7,50m) e CAD4 (*sheds* intercalados em 3 fileiras, ocupando 1/3 da largura do edifício, e distante entre si em 5,00m). Essas variações foram realizadas para 3 diferentes geometrias dos *sheds*: CR, G03 e G04.

Casos	Caso de referência (CR)	Geometria três (G03)	Geometria quatro (G04)
CAD3
	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m
	N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03
	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 2 fileiras
	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m	Largura abert. <i>sheds</i> = 2,50m
CAD4
	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m	Abertura A1 = 0,625m
	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m	Profundidade = 17,50m
	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m
	N. <i>sheds</i> = 06	N. <i>sheds</i> = 06	N. <i>sheds</i> = 06
	Alinhamento <i>sheds</i> = 3 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 3 fileiras	Alinhamento <i>sheds</i> = 3 fileiras
	Largura abert. <i>sheds</i> = 1,67m	Largura abert. <i>sheds</i> = 1,67m	Largura abert. <i>sheds</i> = 1,67m
	Área total. <i>Sheds</i> = 6,25m ²	Área total. <i>Sheds</i> = 6,25m ²	Área total. <i>Sheds</i> = 6,25m ²

A figura 46 apresenta um fluxograma geral das análises paramétricas. Tem-se o caso de referência onde são realizadas as variações dos parâmetros projetuais que influenciam no desempenho da ventilação natural através de *sheds* extratores e captadores de ar. Um dos parâmetros avaliados é a geometria dos *sheds*, cujo impacto deve ser analisado em conjunto com outros parâmetros, que também influenciam na ventilação natural dos

ambientes internos. Além desses parâmetros projetuais, o sistema foi avaliado para diferentes condições climáticas: 03 velocidades e 05 ângulos de incidência dos ventos externos. Foi realizado o cruzamento entre todas as possibilidades de análise que resultou em 795 casos simulados, derivados do caso de referência. O objetivo foi investigar a interdependência dos diversos parâmetros projetuais e climáticos no desempenho da ventilação através de *sheds* extratores e captadores de ar e fazer análises comparativas. O fluxograma detalhado com todas as possibilidades de análises se encontra no apêndice 8.5.

Figura 46: Fluxograma resumido com os parâmetros avaliados

Fonte: Acervo da autora (2014)

3.2 ETAPA NUMÉRICA

Para a realização das simulações computacionais, utilizou-se o *software* CFX 12.0, produzido pela empresa ANSYS. A escolha por essa ferramenta foi devido aos seguintes critérios: 1) *software* baseado na Dinâmica dos Flúidos Computacional (CFD), sendo totalmente adequado ao estudo da ventilação natural no edifício e no meio urbano; 2)

ferramenta amplamente utilizada nas pesquisas de análise de fluidos nas áreas de engenharia e arquitetura, apresentando boa coerência dos resultados com os fenômenos físicos e 3) disponibilidade da licença computacional no Departamento de Engenharia Aeronáutica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP), facilitando o seu uso nessa pesquisa.

3.2.1 CONFEÇÃO DO MODELO

A preparação do modelo tridimensional foi realizada no *software* AutoCAD, utilizando os comandos *extrude*, *union* e *subtract*, para que os objetos sejam compreendidos como sólidos no Icem CFX. O edifício foi construído considerando apenas as características importantes para as análises e todas as janelas foram consideradas abertas. Após a finalização do edifício, elaborou-se um volume externo estanque, sem aberturas, representando o domínio pelo qual o fluido escoará. O procedimento adotado na confecção foi o de subtrair este domínio, gerando um negativo volumétrico da área de estudo e configurando o modelo como um bloco unificado (figura 47).

Figura 47: Construção da geometria no AutoCAD (a) processo de *extrude*, *union* e *subtract*, (b) edifício pronto e (c) edifício e o domínio como um bloco unificado

Fonte: Acervo da autora (2014)

Optou-se pelo domínio retangular por possibilitar um número menor de elementos na malha e, conseqüentemente, a redução do tempo de processamento das simulações. As dimensões seguiram as recomendações de Harries (2005): distâncias a barlavento e nas laterais = 5H (25m); altura = 6H (30m); distância a sotavento = 15H (75m), sendo H=5m, que corresponde à altura do modelo simulado (figura 48). A área de obstrução do edifício no

domínio foi de 1,1%, na seção transversal no sentido do fluxo e 1,5% no sentido perpendicular ao fluxo, atendendo a sugestão de Cost (2004), cujo valor não deve exceder 3%. Esse dimensionamento do domínio evita o efeito de bloqueio, impedindo que as fronteiras que o delimitam influenciam no escoamento.

Por fim, o edifício e o domínio foram unidos em um único modelo, eliminando todos os elementos externos às fronteiras do domínio. O modelo em CAD foi exportado como um bloco único no formato ACIS, extensão *.sat, compatível para ser aberto no Icem CFX.

Figura 48: Dimensões adotadas para o domínio retangular
Fonte: Acervo da autora (2014)

3.2.2 DEFINIÇÃO DAS PARTS

Após a confecção do modelo, as faces do domínio e do edifício foram definidas como as seguintes *parts*: **DOM_PISO** e **DOM_TOPO** correspondentes ao piso e ao teto do domínio, respectivamente; **DOM_LATERAL** as faces laterais do domínio; **INLET** e **OUTLET** correspondem as faces do domínio por onde o fluido entra e sai, respectivamente; **PAREDE_BARLAVENTO** e **PAREDE_SOTAVENTO** são as faces do edifício a barlavento e a sotavento, respectivamente; **PAREDE_LATERAL**, as faces laterais do edifício e **SHEDS** referente a cobertura. Por fim, criou-se a *part* **FLUID**, localizada no centro do domínio e por onde o ar escoava (figura 49). A seleção das *parts* facilitou as etapas de definição das condições de contorno no CFX-Pre e a mensuração dos parâmetros avaliados no CFX-Post.

Figura 49: Definição das *Parts* do modelo no Icem - CFX

Fonte: Acervo da autora (2014)

3.2.3 GERAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL

Para todas as simulações, utilizou-se uma malha estruturada tetraédrica, cujos parâmetros globais³¹ adotados foram: *maximum element size* de 16; *natural size* de 4; *cells in gap* de 8. Após a definição desses parâmetros, a malha foi refinada nas superfícies do edifício em um valor de 0,20m, a fim de melhorar a visualização do fluxo de ar no espaço interno e no entorno imediato ao edifício³². Aplicou-se o método de geração da malha computacional definindo o número de 25 iterações e a qualidade mínima de 0,5. Posteriormente, a malha foi gerada automaticamente, adequando-se a forma do edifício (figuras 50 e 51). A combinação desses parâmetros determina a quantidade de elementos da malha e, conseqüentemente, o tempo de processamento das simulações.

Figura 50: Vista geral da malha gerada para o caso de referência

Fonte: Acervo da autora (2014)

³¹ Os parâmetros globais da malha foram definidos no item 2.5.2.3: Determinação da malha, do capítulo 2: Revisão bibliográfica.

³² Esses valores foram definidos após a realização de testes de sensibilidade da qualidade da malha computacional, apresentados no item 4.1, do capítulo 4: Análise dos resultados e no apêndice 8.6.

Figura 51: Detalhes da malha gerada para o caso de referência
Fonte: Acervo da autora (2014)

3.2.4 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Na etapa de preparação do processamento das simulações no CFX – Pre foram definidas as condições iniciais e de contorno, que é o conjunto de parâmetros aplicados a cada *part*, que interferem diretamente no escoamento do fluido. As condições do domínio foram definidas semelhantes às de um túnel de vento: entrada como INLET e a saída como OUTLET. As laterais e o teto como WALL free slip (sem atrito), pois não impõe resistência às partes do domínio onde não são realizadas análises importantes, e o piso e as superfícies do edifício como WALL no slip (com atrito). A figura 52 e a tabela 15 apresentam as condições iniciais e de contorno adotadas em cada *part*, respectivamente.

Figura 52: Domínio retangular com a determinação das condições de contorno
Fonte: Acervo da autora (2014)

Tabela 15: Parâmetros da simulação inseridos no CFX-Pre

ANALYSIS TYPE (Regime adotado na simulação)	
Option:	Steady state (Regime permanente)
DOMAIN (Características do domínio)	
Location:	Fluid
Domain type:	Fluid Domain
Fluids List:	Air ideal gas
Coord Frame:	Coord 0
Reference Pressure:	1 [atm] (pressão atmosférica local)
Buoyancy – Option:	Non Buoyant
Domain motion – Option:	Stationary
Heat Transfer Model – Option:	Isothermal ³³
Fluid Temperature:	25°C
Turbulence Model – Option:	K-Epsilon ³⁴
Wall function:	Scalable ³⁵
Reaction or Combustion Model – Option:	None (default)
Thermal Radiation Model – Option:	None (default)
Domain Initialisation	Desmarcado (default)
Boundary: ENTRADA (Características e condições de contorno da Part INLET)	
Boundary type:	Inlet (entrada)
Location:	INLET
Flow regime – Option:	Subsonic (default)
Mass and Momentum - Option	Normal velocity – uso da equação de correção do perfil da velocidade dos ventos externos - $7,0[m/s]*(z/10[m])^{0.21}$
Turbulence – Option:	Medium intensity = 5%
Boundary: SAÍDA (Características e condições de contorno da Part OUTLET)	
Boundary type:	Outlet (saída)
Location:	OUTLET
Flow regime – Option:	Subsonic (default)
Mass and Momentum – Option:	Average static Pressure
Relative Pressure:	0 [Pa]
Pres. Profile Blend:	0.05
Pressure avering – Option:	Average over whole outlet
Boundary: PISO (Características e condições de contorno da Part DOM_PISO)	
Boundary type:	Wall (parede/superfície sólida)
Location:	DOM_PISO
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and momentum – Option:	No slip wall (com atrito)
Wall Roughness – Option:	Smooth Wall (baixa rugosidade/parede lisa)
Boundary: TETO (Características e condições de contorno da Part DOM_TOPO)	
Boundary type:	Wall (parede/superfície sólida)
Location:	DOM_TETO
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and momentum – Option:	Free Slip wall (sem atrito)

³³ Por ser uma simulação em condições de estabilidade neutra, desprezam-se as variações de temperatura, considerando que as forças mecânicas misturam o ar, tornando-o isotérmico.

³⁴ Esse modelo de turbulência é comum em pesquisas de comportamento de fluidos e essa técnica é bem estabelecida por diversas pesquisas de ventilação (CALAUTI; HUGUES, 2014; HARGREAVES; WRIGHT, 2007). Além disso, o manual do CFX destaca a sua boa relação entre os cálculos computacionais (tempo e capacidade) e a precisão dos resultados.

³⁵ Funções turbulentas da superfície que se ajustam às interações entre o fluido e as superfícies sólidas.

Boundary: DOMÍNIO LATERAIS (Características e condições de contorno da *Part* DOM_LATERAL)

Boundary type:	Wall (parede/superfície sólida)
Location:	DOM_LATERAL
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and Momentum – Option:	Free Slip wall (sem atrito)

Boundary: EDIFÍCIO (Características e condições de contorno da *Parts* do edifício)

Boundary type:	Wall (parede/superfície sólida)
Location:	SOTAVENTO; BARLAVENTO; LATERAL
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and momentum – Option:	No slip wall (com atrito)
Wall Roughness – Option:	Smooth Wall (baixa rugosidade/parede lisa)

Boundary: SHEDS (Características e condições de contorno da *Parts* dos sheds)

Boundary type:	Wall (parede/superfície sólida)
Location:	SHEDS
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and momentum – Option:	No slip wall (com atrito)
Wall Roughness – Option:	Smooth Wall (baixa rugosidade/parede lisa)

SOLVER CONTROL (Parâmetros para a solução matemática do modelo pelo módulo de cálculo)

Advection Scheme – Option:	High resolution
Turbulence Numerics – Option:	First Order
Convergence Control	
Min. nº iterações:	1
Max. nº iterações:	6000
Timescale control:	Auto TimeScale (default)
Length Scale Option:	Conservative (default)
Maximum Timescale:	Desmarcado (default)
Timescale fator:	1.0
Convergence Criteria	
Residual Type:	MAX ³⁶
Residual Target:	10 ⁻⁴
Conservation Target:	Desmarcado (default)
Equation Class Setting:	default
Advanced option	
Global Dynamic Model Control	Marcado (default)
Turbulence Control	Desmarcado (default)
Hydro Control	Desmarcado (default)
Body Forces	Desmarcado (default)

SOLUTION UNITS (Definição das grandezas utilizadas nos cálculos)

Mass Units	[kg]
Length Units	[m]
Time Units	[s]
Temperature Units	[K]
Angle Units	[rad]
Solid Angle Units	[sr]

³⁶ O critério de convergência RMS indica que os valores médios dos resíduos não ultrapassam 10⁻⁴. Já o MAX indica que os valores máximos dos resíduos são menores que 10⁻⁴.

EXPRESSIONS (Expressões com variáveis que direcionam a simulação)

```

ak = 0.41 [ ]
dir = 90
dira = (180 + dir)*pi/180
pi180 = pi/180
speed = ustara*loge((zmod-zref)/z0)/ak
thetaa = dira
u1 = speed*sin(thetaa)
unitlen = 1. [ m ]
unitlen = 1. [ m^1s^-1 ]
uref = 4.5*unitvel
ustara = ak*uref/loge((zuref-zref)/z0)
v1 = speed*cos(thetaa)
z0 = 0.05*unitlen
zmod = abs(z+0.0005*unitlen)
zref = 0.0%unitlen
zuref = 10*unitlen

```

Parâmetros baseados em Brandão (2009); Costa (2009); Cóstola (2006); Leite (2008); Prata (2005)

Como todos os modelos possuem as mesmas condições iniciais e de contorno, um único arquivo com extensão *.ccl foi gerado e exportado para as novas simulações. O programa cria um arquivo com extensão *.cfx para ser exportado para o CFX-Solver.

3.2.5 RESOLUÇÃO DAS SIMULAÇÕES

No módulo CFX-solver os parâmetros e as equações determinadas na etapa anterior são aplicados para fornecer os resultados finais. Durante essa etapa a resolução da simulação foi verificada através do monitoramento dos cálculos, dos balanços globais e da evolução do critério de convergência estipulado para a massa, momento e turbulência, tanto na forma de gráficos quanto de tabela (figura 53). As simulações alcançaram níveis de convergência $MAX = 10^{-4}$. Ao final desse processamento, o CFX gerou um arquivo de extensão *.res para ser trabalhado no CFX-Post, responsável pelo tratamento dos resultados.

Figura 53: Critério de convergência do momento, massa e turbulência durante a simulação

Fonte: Acervo da autora (2014)

3.2.6 TRATAMENTO DOS RESULTADOS

O CFX-Post é a fase de visualização dos resultados qualitativo e quantitativo do fluido em escoamento. Para análise do desempenho qualitativo da ventilação, foram gerados dois planos: um vertical, localizado no centro do edifício (2,50m) e um horizontal, localizado no centro da abertura inferior, a 0,94m do solo, na zona de ocupação (figura 54). Nesses planos foram plotados: 1) contornos por gradação de cores, para as velocidades do ar e 2) vetores de intensidade e direção do fluxo de ar. Além disso, plotou-se a distribuição dos Cps e a intensidade e direção do fluxo de ar na superfície dos *sheds* e no meio nas aberturas de entrada e saída de ar. Foi utilizada uma escala em que cada cor representa um valor de velocidade e/ou de coeficiente de pressão correspondente.

Figura 54: Planos vertical e horizontal utilizados nas análises

Fonte: Acervo da autora (2014)

Posteriormente, para a análise do desempenho quantitativo, estabeleceu-se uma malha interna com a localização dos pontos de monitoramento das variáveis, distantes um dos outros em 1,25m e a 0,94m do solo. Em cada ponto, mediu-se a velocidade do fluxo de ar, através das equações disponíveis no *software*, visando uma análise geral da ventilação natural na região de ocupação dos usuários (figura 55). Posteriormente, localizaram-se 3 pontos em cada abertura dos modelos avaliados, distantes uns dos outros em 1,25m e no ponto central, para medição da velocidade do ar e dos Cps nas aberturas. A medição dos Cps foi realizada através da inserção da equação³⁷ para o cálculo dessa variável no CFX-post. Em cada abertura, calculou-se a média dos Cps e da velocidade do ar e, posteriormente, a vazão volumétrica e as taxas de renovação de ar/hora. A nomenclatura

³⁷ $\text{Pressure}/(1/2*\text{ave}(\text{Density})@\text{INLET}*\text{ave}(\text{Velocity})@P1^2)$

utilizada em cada abertura foi: A1 para a abertura mais baixa e S1, S2,..., Sn (dependendo do número, n, desses dispositivos na cobertura) para as aberturas dos *sheds* (figura 56).

Figura 55: Localização dos pontos para medição da velocidade do ar (planta e corte)
Fonte: Acervo da autora (2014)

Figura 56: Pontos de medição dos Cps e da velocidade do ar em cada abertura do modelo
Fonte: Acervo da autora (2014)

3.3 ETAPA EXPERIMENTAL

A etapa experimental foi composta por ensaios no túnel de vento, a fim de verificar a confiabilidade dos resultados adquiridos na etapa numérica (simulações computacionais). Esses experimentos foram subdivididos em 5 fases, que são detalhadas a seguir:

- 1) Construção do modelo físico reduzido em escala adequada, considerando os princípios de semelhança geométrica e cinemática.
- 2) Técnica experimental de simulação da camada limite atmosférica (CLA) visando obter características semelhantes ao ambiente real.

- 3) Calibração dos anemômetros de fio quente para os ensaios de velocidade de ar
- 4) Ensaios quantitativos para determinação dos Cps e da velocidade do ar nas aberturas, para os cinco ângulos de incidência dos ventos externos analisados.
- 5) Ensaios qualitativos para a visualização da trajetória do fluxo de ar no edifício, através do uso de fumaça e da técnica de fios de lã para os cinco ângulos de incidência dos ventos externos analisados.

Essa etapa foi realizada no Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Lisboa, Portugal, sob a supervisão do Eng. Dr. Fernando Marques da Silva. As justificativas para a realização dessa etapa no LNEC foram: a) vasta experiência dos pesquisadores desse laboratório em trabalhos com ventilação natural e ensaios em túnel de vento, sendo uma grande referência nesse campo de pesquisa e b) tamanho do túnel, que possibilita a construção de modelos em escala maior, aumentando a confiabilidade dos resultados.

O túnel é de circuito aberto, admitindo e descarregando para a atmosfera, de baixa velocidade, cuja câmara de ensaios fechada possui 3,10m x 2m de seção e 9m de comprimento. Possui 6 ventiladores axiais com potência de 11kw e velocidade de 1500rpm cada, sendo que 2 deles possuem variador de frequência. Cada ventilador produz vento na seção do túnel com velocidade em torno de 3,5 m/s (figura 57).

Figura 57: Vistas externas e interna do túnel de vento do LNEC
Fonte: Acervo da autora (2012)

3.3.1 A CONSTRUÇÃO DO MODELO FÍSICO REDUZIDO

A construção do modelo físico requer uma avaliação interativa entre os requisitos do modelo e as limitações impostas pelo túnel de vento (dimensões da câmara de ensaios),

considerando a escala conveniente e os princípios de semelhança. O modelo deve ser rígido e reproduzir, o mais fielmente possível, a geometria do edifício e seus detalhes.

O modelo físico ensaiado no túnel de vento pode obstruir até um máximo de 7% da seção do túnel, ou seja, para o túnel do LNEC, deve possuir uma área máxima de 0,44m² na seção transversal. A partir dessas recomendações e considerando o objetivo da pesquisa, elaboraram-se os projetos dos modelos físicos reduzidos definindo a escala geométrica e os parâmetros de semelhança. Essa etapa experimental foi realizada primeiramente para o caso de referência, a fim de verificar os resultados das simulações computacionais. Após a análise paramétrica, selecionaram-se 03 modelos da geometria quatro, para realizar novamente esses experimentos. Diante disso, o modelo do caso de referência e os finais da geometria quatro foram construídos nas escalas 1:10 e 1:15, respectivamente (tabela 16).

Tabela 16: Dados do modelo original e do modelo reduzido

CASO DE REFERÊNCIA		
Dados do modelo	Dimensões originais (m)	Dimensões do modelo (m)
Altura	5,00	0,50
Largura	5,00	0,50
Comprimento	7,50	0,75
Área frontal (modelo a 0° e 180°)	25 m²	0,25 m²
Escala	1:10	
Obstrução da seção de ensaio 0° e 180°	4,03%	
Obstrução da seção de ensaio 90°	6,04%	
Obstrução da seção de ensaio 45° e 135°	7%	
GEOMETRIA QUATRO (TODAS AS CONFIGURAÇÕES ENSAIADAS)		
Dados do modelo	Dimensões originais (m)	Dimensões do modelo (m)
Altura	5,00	0,33
Largura	5,00	0,33
Comprimento	17,50	1,66
Área frontal (modelo a 0° e 180°)	25 m²	0,11 m²
Escala	1:15	
Obstrução da seção de ensaio 0° e 180°	1,85%	
Obstrução da seção de ensaio 90°	6,48%	
Obstrução da seção de ensaio 45° e 135°	7%	

Os modelos foram planejados no *software* AutoCAD e exportados para o programa *laserwork*, que prepara os desenhos de forma compatível com a cortadora a laser ULS do IAU/USP. O uso dessa máquina além de acelerar essa etapa, possibilita uma alta precisão no corte de peças curvas, como os sheds. O material utilizado para a construção das maquetes foi o acrílico com espessura de 6 mm visando a construção de modelos rígidos e facilitar a visualização da fumaça e dos fios de lã durante os ensaios qualitativos (figura 58).

Figura 58: Peças cortadas na cortadora a laser ULS – IAU/USP
Fonte: Acervo da autora (2014)

As peças foram coladas e o modelo foi reforçado com canaletas de alumínio nas laterais e parafusados para permanecerem resistentes durante os ensaios, uma vez que os modelos possuíam grandes dimensões e a velocidade ensaiada foi elevada (7m/s). No caso dos modelos finais, como foram testadas três configurações diferentes da disposição dos sheds, construiu-se uma base comum a todos os modelos, onde somente as coberturas foram trocadas a cada novo ensaio. Isso facilitou a etapa de instrumentação, uma vez que foi possível retirar a cobertura do modelo físico para fazer a instalação dos equipamentos de medição na parte interna e, posteriormente, fixa-la novamente para a execução dos ensaios. As figuras 59 a 62 apresentam os diferentes modelos ensaiados.

Figura 59: Modelo do caso de referência– sem escala
Fonte: Acervo da autora (2012)

Figura 60: Geometria quatro: CS7 (planta da cobertura, corte e modelo físico reduzido)
Fonte: Acervo da autora (2014)

Figura 61: Geometria quatro: CAD2 (planta da cobertura, corte e modelo físico reduzido)
Fonte: Acervo da autora (2014)

Figura 62: Geometria quatro: CAD3 (planta da cobertura, corte e modelo físico reduzido)
Fonte: Acervo da autora (2014)

3.3.2 TÉCNICA EXPERIMENTAL DE SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

Os edifícios se encontram imersos em um escoamento atmosférico do tipo turbulento de modo que os ensaios do comportamento aerodinâmico das edificações em túneis de vento devem possuir características semelhantes ao ambiente real. Essas características resumiram-se, neste caso, à semelhança geométrica dos modelos, do perfil vertical das velocidades médias e à verificação do regime do escoamento, através do número de Reynolds, de modo a garantir as condições de semelhança no escoamento.

A técnica experimental da simulação da camada limite atmosférica (CLA) no túnel de vento foi baseada no trabalho de Castanho (2012). Nesse trabalho foi adotado o método de simulação da CLA em túnel de vento proposto por Irwin (1981), que é composto por um conjunto de fórmulas de dimensionamento dos elementos de rugosidade em função de uma lei do tipo potencial, que define a CLA pretendida. Isso possibilita ao modelo certa flexibilidade, de modo a conseguir, para diferentes configurações dos elementos de rugosidade e da geometria do túnel, os resultados esperados. A CLA real é simulada através de uma camada limite que se desenvolve sobre uma superfície plana com determinada rugosidade. Nesse caso, a rugosidade superficial tem efeito semelhante à topografia do terreno e às edificações existentes no entorno, estabelecendo, deste modo, um perfil de velocidades médias com determinadas características de turbulência.

O método de Irwin (1981) é fundamentado por um conjunto de fórmulas de dimensionamento dos elementos de rugosidade que aproxima a CLA simulada, através da contabilização de duas características primordiais: a altura da camada limite (δ) e o expoente da lei potencial do perfil dessa camada que diz respeito ao tipo de terreno (α).

Castanho (2012) realizou diversos ensaios de CLA visando atingir um entorno próximo de um ambiente suburbano, com $\alpha = 0,23$, que é recomendado pela literatura especializada. Como nesse trabalho adotou-se como entorno o subúrbio, utilizou-se a configuração final da CLA desenvolvida por Castanho (2012). A camada limite mais viável encontrada pelo autor corresponde a $\delta = 1,0\text{m}$, formando a CLA a 50% da altura (H) do túnel de vento e a cerca de 82% da altura (h) dos elementos passivos. Em termos

longitudinais, o escoamento formou-se a cerca de 5,5m do início do túnel. A CLA final apresentou um $\alpha = 0,22$, indicando uma boa aproximação com o valor da literatura.

A sua metodologia consistiu em dispor, na posição montante do túnel, elementos passivos de formato triangular (pináculos), para provocar um escoamento pela parte superior do túnel, gerando fenômenos de turbulência. A sua face frontal é triangular, sendo suportada por uma faceta de separação no seu prolongamento traseiro (figura 63). Os valores das dimensões dos pináculos são apresentados na tabela 17.

Figura 63: Dimensão dos pináculos utilizados no ensaio da CLA
Fonte: Acervo da autora (2012)

Tabela 17: Dados definitivos de dimensionamento dos pináculos

<i>Altura do pináculo – h (m)</i>	1,220
<i>Separação dos eixos dos pináculos – d (m)</i>	0,610
<i>Largura da base da superfície de separação do pináculo – e (m)</i>	0,305
<i>Largura da base do pináculo – b (m)</i>	0,240
<i>Número de pináculos do modelo</i>	3

Fonte: Adaptado de Castanho (2012)

Além dos pináculos, para promover rugosidade ao escoamento, foram dispostos no chão do túnel, na direção transversal e longitudinal, elementos de rugosidade cúbicos, a fim de proporcionar vórtices de comprimento de onda aproximados dos que se geram na realidade. A posição relativa desses elementos é apresentada na figura 64.

Quanto ao dimensionamento dos elementos cúbicos, adotou-se um cubo com 10 cm de aresta, obtendo-se uma disposição transversal de 7 linhas de 8 cubos, intercalada com 6 linhas de 7 cubos. A distância entre os eixos é de 40 cm, correspondente a uma distância entre as faces dos cubos adjacentes de 30 cm. Os elementos são dispostos de

forma desencontrada, adotando um espaçamento entre duas linhas consecutivas com valor igual ao espaçamento entre os cubos (figuras 64).

Ressalta-se que dos 9m totais do túnel, reservaram-se 2m para a zona de ensaio. A fila mais a jusante dos elementos de rugosidade foi distanciada cerca de 0,50m da zona de colocação do modelo físico a ensaiar, de modo a minimizar os efeitos locais dos cubos. A disposição desses elementos em 13 linhas resultou em um total de 98 elementos cúbicos de rugosidade (figuras 64 e 65).

Figura 64: Elementos de rugosidade no túnel de vento (a) planta e (b) corte (sem escala)
Fonte: Acervo da autora (2014)

Figura 65: Elementos de rugosidade no túnel de vento
Fonte: Acervo da autora (2012)

Para a avaliação das características do perfil da CLA simulada, foi utilizado um tubo de Pitot-Prandtl no eixo transversal central do túnel de vento (1,55m). Longitudinalmente, o

equipamento foi localizado a cerca de 0,50m antes da zona de ensaio (figura 67a). O procedimento utilizado foi baseado em medições de pressão dinâmica, desde a cota 1,5cm até 90 cm, de forma a registrar as características da CLA. Até a cota de 5cm, as leituras foram realizadas de 0,5cm em 0,5cm. Posteriormente, variaram-se as medidas em 1cm até atingir a altura de 10cm. Dos 10cm até 60cm as leituras ocorreram a cada 5cm e, por fim, até os 90cm, espaçaram-se as leituras de pressão em 10cm (figura 66).

Figura 66: Medições de pressão dinâmica para registrar as características da CLA
Fonte: Acervo da autora (2014)

Para a aferição da pressão, utilizou-se um micromanômetro bancada tipo Betz Gama – Acin, Van-Essen Holland, associado ao tubo de Pitot-Prandtl, cujo grau de incerteza é de 0,5Pa (figura 67b). O micromanômetro possui um tubo no seu interior com um fluido, cujo nível é medido através de uma escala flutuante de vidro que acompanha a variação da pressão. As medições de pressão e temperatura de referência foram realizadas através de um barômetro de coluna de mercúrio e de um termômetro (figura 67c).

(a)

(b)

(c)

Figura 67: Equipamentos utilizados nas medições da CLA (a) Tubo de pitot, (b) micromanômetro e (c) barômetro/termômetro

Fonte: Acervo da autora (2012).

3.3.3 ENSAIOS QUANTITATIVOS PARA DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE PRESSÃO

Foram inseridas tomadas de pressão externas em diversos pontos da superfície do modelo físico reduzido: próximos às aberturas, nos *sheds* e nas paredes laterais. Além disso, localizaram-se 03 pontos centrais em cada abertura de entrada e saída de ar (figura 68).

Figura 68: Tomadas de pressão no caso de referência inicial

Fonte: Acervo da autora (2014)

No interior da câmara de ensaios, foi posicionado um tubo de Pitot na direção do escoamento, à cota da cobertura (figura 69) e foi conectado ao micromanômetro de leitura analógica (figura 70). O objetivo foi medir a diferença entre a pressão total e estática para calcular a pressão dinâmica do escoamento e, conseqüentemente, a velocidade local. O valor resultante foi utilizado como referência para o cálculo dos C_p s.

Figura 69: Tubo de pitot no interior do túnel
Fonte: Acervo da autora (2012)

Figura 70: Micromanômetro de pressão
Fonte: Acervo da autora (2012)

As superfícies do modelo foram perfuradas e instalados tubos de plásticos com diâmetro interno de 1 mm. As tomadas de pressão foram conectadas a um tubo numerado do *scanner* de pressão, PSI, e estes foram ligados por cabo de sinal dedicado a duas

unidade ESP (*Electronic Pressure Scanner*) da *Pressure Systems*, modelo 16TC/DTC, com 32 e 64 canais (figura 71), o que possibilitou a medida simultânea da pressão em todos os pontos. Para medir a pressão nas aberturas, foram utilizados sensores com capacidade de registro da pressão total (Pt) e estática (Pe) correspondente e estes foram posicionados rente a linha externa da abertura através da fixação em um suporte metálico (figura 72).

Figura 71: Modelo instrumentado dentro do túnel de vento

Fonte: Acervo da autora (2012)

Figura 72: Medição dos Cps nas aberturas do modelo

Fonte: Acervo da autora (2012)

A pressão em cada ponto desejado foi obtida pela conexão do scanner de pressão a um sistema de aquisição de dados dedicado DTC *Initium* (figura 73). Os dados foram registrados duas vezes a cada segundo e as medições foram realizadas pelo tempo aproximado de 2 minutos. Posteriormente, utilizou-se o programa *macroPsy*, desenvolvido no LNEC, para calcular a média dos dados coletados, fornecendo um arquivo digital em unidade Pascal. Medições manuais no micromanômetro foram realizadas para verificar a equivalência dos resultados com o transdutor de pressão.

Figura 73: Sistema de aquisição de dados dedicado DTC Initium

Fonte: Acervo da autora (2012)

O modelo físico foi posicionado sobre a base giratória no interior do túnel e os ensaios foram realizados para cinco diferentes ângulos de incidência dos ventos: 0° e 45° (sheds extratores de ar), 90° (situação neutra), 135° e 180° (sheds captadores de ar). Todos os experimentos foram realizados com dois ventiladores do túnel ligados, correspondendo a uma velocidade de aproximadamente 7m/s.

3.3.4 CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Antes de se iniciarem os ensaios para medição da velocidade do ar nas aberturas do modelo reduzido, os anemômetros de fio quente da marca Airflow™ TA5, responsáveis por essas medições, foram devidamente calibrados. Os equipamentos utilizados foram fixados no interior de outro túnel de vento, de circuito fechado com dimensão da câmara de ensaios de 1x1,2x3m (figura 74a) e o procedimento de calibração consistiu de medidas simultâneas da velocidade (U_{ref}) em m/s e da saída em voltagem (mV) do anemômetro. A partir da relação voltagem-velocidade determinaram-se as constantes de calibração. A velocidade indicada do escoamento é proporcional ao arrefecimento do termistor e o sinal de saída é em corrente (mA). A leitura dos valores indicados foi realizada através de um *logger* Datataker DT515 s/n 33327 (figura 74b). Esse procedimento foi realizado para diversas velocidades, sendo que o valor máximo atingido foi de 8m/s, uma vez que os ensaios foram realizados para a velocidade máxima de 7m/s. O gráfico 3 apresenta a curva de calibração, juntamente com a equação de conversão da voltagem em velocidade do ar.

Figura 74: Processo de calibração (a) anemômetros posicionados no túnel de vento e (b) Datataker para leitura dos dados

Fonte: Acervo da autora (2014)

Gráfico 3: Gráfico de calibração do anemômetro de fio quente Airflow™ TA5

3.3.5 ENSAIOS QUANTITATIVOS PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR

Para medir a velocidade do ar nas aberturas dos modelos físicos reduzidos, foram utilizados como equipamentos anemômetros de fio quente da marca Airflow™ TA5, cuja faixa de velocidade do sensor de referência para calibração é de 0,2 a 50m/s (figura 75).

Figura 75: Anemômetro de fio quente
Fonte: Acervo da autora (2014)

As velocidades foram medidas em 3 pontos de cada abertura do modelo físico (lateral direita, esquerda e ponto central), distantes entre si em 1,25m (dimensão do modelo real) e localizados na cota média da abertura (figuras 76a e 76c). Para medir a velocidade do vento antes de atingir o modelo físico, um sensor foi localizado na parte frontal da maquete, na altura da cobertura. Assim, tem-se o valor do escoamento não perturbado, que é a velocidade de referência (figura 76b). Os ensaios foram realizados para os cinco diferentes ângulos de incidência dos ventos externos (0° e 45° - extratores; 90° situação neutra e 135° e 180° - captadores). Os dados de saída dos anemômetros foram fornecidos em voltagem (mA) e, posteriormente, convertidos em velocidade (m/s) através da equação adquirida pelo processo de calibração dos anemômetros, conforme descrito anteriormente. Em seguida, a velocidade média em cada abertura foi calculada permitindo, posteriormente, a estimativa da vazão volumétrica (m^3/h) e da taxa de renovação de ar/hora, para cada ângulo de incidência ensaiado, em cada caso analisado.

Figura 76: Medições de velocidade do ar (a) localização dos pontos de medições nas aberturas, (b) anemômetros posicionados e (c) detalhe dos anemômetros posicionados nas aberturas dos sheds

Fonte: Acervo da autora (2014).

3.3.6 ENSAIOS QUALITATIVOS: TRAJETÓRIA DO AR POR FUMAÇA E FIOS DE LÃ

Além dos ensaios quantitativos, o uso de técnicas de visualização do escoamento nos modelos físicos reduzidos auxilia a interpretação dos resultados, possibilitando, por exemplo, a identificação de zonas de alta vorticidade e de separação do escoamento. As técnicas mais comumente empregadas são a injeção de fumaça e o uso de fios de lã que auxiliam na verificação qualitativa da trajetória do fluxo de ar dos resultados numéricos.

Com o objetivo de visualizar o escoamento do ar dentro e ao redor do edifício, foram realizados, primeiramente, ensaios qualitativos com a técnica de visualização do escoamento através da injeção de fumaça. A visualização livre envolve o uso de partículas de fumaça, que são pequenas e leves o suficiente para seguir a direção do escoamento e delinear as linhas de corrente. Foi utilizada uma máquina geradora de fumaça, com um duto para o direcionamento desse fluido, que materializa o vento. A máquina possui um controle de vazão do fumo que possibilita a mobilidade dos ensaios.

Nesse caso, foi utilizado apenas um ventilador do túnel de vento que propiciou uma velocidade em torno de 3m/s, a fim de obter um fumo com uma concentração suficientemente alta, evitando que ele se disperse rapidamente. Sobre o efeito de velocidades mais altas o fumo iria se espalhar muito rápido, dificultando a visualização dos fenômenos. A iluminação interna do túnel foi ajustada para melhorar o contraste sobre o fluxo da fumaça e a observação direta foi realizada através da filmagem dos ensaios.

Posteriormente, a técnica de visualização do sentido da trajetória do fluxo de ar pelo uso de fios de lã foi adotada, a fim de verificar os vetores de velocidade gerados pelo CFX nas aberturas dos modelos avaliados. Foram instalados, nas aberturas de entrada e saída de ar dos modelos físicos reduzidos, fios de lã que constituem uma maneira bastante didática para o entendimento qualitativo da uniformidade e do sentido do escoamento no edifício avaliado.

Na linha média das aberturas dos modelos foram fixados, na posição horizontal, fios de *nylon* transparente onde foram amarrados fios de lã coloridos, para facilitar a visualização, na posição vertical, com 2mm de espessura e aproximadamente 3 cm de comprimento cada. O espaçamento entre eles foi em torno de 3cm, totalizando 6 fios de lã por abertura. A figura 77 apresenta a sequência dos fios de lã dispostos na forma de uma cortina nas aberturas e o modelo instrumentado dentro do túnel de vento para a execução dos ensaios qualitativos, respectivamente. Os experimentos foram realizados para os cinco ângulos de incidência dos ventos externos analisados e uma câmara digital na marca Canon, modelo SX20IS, com tripé foi instalada dentro do túnel para a filmagem dos ensaios.

(a)

(b)

(c)

Figura 77: Ensaios qualitativos com fios de lã (a) fio de nylon posicionado horizontalmente nas aberturas, com fios de lã dispostos na vertical, (b) foto geral do caso de referência e (c) detalhe dos fios posicionados nas aberturas do modelo

Fonte: Acervo da autora (2014).

Por fim, utilizou-se o *software Free video to JPG converter*, um programa gratuito capaz de transformar automaticamente as cenas dos vídeos desses ensaios qualitativos em imagens sequenciais no formato JPG, o que possibilitou a captura de todos os detalhes dos ensaios. Posteriormente, as imagens convertidas foram tratadas e analisadas em conjunto com os resultados qualitativos extraídos através das simulações computacionais.

Resultados

capítulo 4

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados e analisados os resultados adquiridos ao longo dessa pesquisa. Primeiramente, análises de sensibilidade da malha computacional na qualidade dos resultados foram executadas a fim de aferir a operação e a programação computacional do modelo. Em seguida, verificaram-se os resultados numéricos com os experimentais do caso de referência. Posteriormente, a análise paramétrica por simulação CFD foi realizada, com o propósito de analisar a influência de diferentes parâmetros projetuais sobre o desempenho de sheds extratores e captadores de ar. Após essa etapa, é apresentada a verificação final dos resultados numéricos e experimentais dos modelos otimizados. Por fim, elaboraram-se diretrizes projetuais a fim de emitir recomendações para o uso de sheds extratores e captadores de ar.

4.1 SIMULAÇÕES CFD: ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DA QUALIDADE DA MALHA

A definição dos parâmetros da malha computacional é um dos estágios mais importantes de uma simulação CFD. Diversos autores (BLOCKEN et al., 2007; CALAUTIT; HUGHES, 2014 e CÓSTOLA E ALUCCI, 2007) ressaltam que a precisão dos resultados a partir de uma modelagem CFD é altamente dependente desse fator, e que apresenta implicações igualmente importantes na convergência do modelo. Problemas de fechamento da simulação muitas vezes estão relacionados à má qualidade do refinamento da malha, gerando resíduos acima do esperado e, conseqüentemente, resultados sem um nível de confiabilidade adequado. Foram realizados testes variando: 1) os tipos de elementos da malha: tetraédrica e tetraédrica com prismas na superfície do edifício; 2) tamanho do elemento mínimo: malha básica: 4; malha média: 2 e malha fina: 0,5; e 3) tamanho do refinamento dos elementos no edifício: 0,30m; 0,20m e 0,10m. Cada parâmetro foi alterado isoladamente a fim de analisar a sensibilidade dos resultados a esses elementos computacionais, totalizando 18 combinações (apêndice 8.6). Os resultados foram comparados em termos de: 1) valores de y^+ de acordo com as recomendações

existentes na literatura especializada para o modelo de turbulência k- ϵ padrão, o qual foi utilizado nessa pesquisa. Os valores sugeridos que indicam resultados confiáveis são: entre 20 e 100, segundo o manual do CFX; pelo menos 30 para Cost (2004) e entre 30 e 300 segundo Leite e Frota (2013) e 2) fechamento das simulações computacionais com níveis de convergência MAX de 10^{-4} , sem recorrer à utilização de escalas de tempo de cálculo muito reduzidas, que podem comprometer a precisão da simulação (figura 78).

Figura 78: Fluxograma dos parâmetros testados

É importante ressaltar que tanto a preparação quanto o processamento das simulações demandam muito tempo, o que dificultou a realização de um número maior de testes de adequabilidade da malha e testes sobre a influência de outros importantes parâmetros computacionais na qualidade dos resultados numéricos, como: modelo de turbulência, rugosidade do piso do domínio, entre outros. Para esses parâmetros adotou-se o que a literatura indica como adequado, conforme descrito anteriormente nos capítulos da revisão bibliográfica e da metodologia.

Os gráficos 4 e 5 apresentam o valor do y^+ médio em função da alteração dos tipos de elementos e do tamanho dos parâmetros da malha computacional e o nível de convergência atingido em cada combinação testada, respectivamente. Com relação às malhas formadas por elementos tetraédricos, à medida que o valor do elemento mínimo e o

refinamento na superfície do edifício foram reduzidos, alcançaram-se valores de y^+ mais baixos, ou seja, mais próximos do que a literatura recomenda. No entanto, para as malhas fina e média não se atingiu o nível de convergência satisfatório estabelecido ($\text{MAX } 10^{-4}$), permanecendo em um regime estacionário após 300 iterações. Já para a malha básica, o critério de convergência estabelecido foi alcançado para um refinamento no edifício de 0,30m e 0,20m, sendo que somente para o caso mais refinado (0,10m) a simulação não convergiu (gráficos 4 e 5).

Gráfico 4: Valores de y^+ em função dos elementos e do tamanho dos parâmetros da malha computacional

Gráfico 5: Nível de convergência atingido em cada teste realizado

Com os testes anteriores, percebeu-se que y^+ reduzia à medida que se aumentava o refinamento da malha no edifício. No entanto, muitas vezes o nível de convergência MAX de 10^{-4} não foi atingido. Diante disso, a fim de analisar a influência dos elementos prismáticos nos níveis de convergência e nos valores de y^+ , adotaram-se os mesmos parâmetros globais dos testes com as malhas tetraédricas, incorporando prismas na superfície do edifício.

Novamente nota-se que à medida que o elemento mínimo e o refinamento da malha na superfície do edifício foram reduzidos, obtiveram-se y^+ mais baixos. No entanto, em todos os casos os valores foram bastante elevados, registrando em alguns pontos y^+ de até 1.200. Além disso, tanto a malha média quanto a fina não atingiram os níveis de convergência MAX 10^{-4} . Esse critério somente foi atendido para a malha básica (gráficos 4 e 5). Através desses testes, constatou-se que a inclusão de camadas de prismas e o aumento do refinamento da malha no edifício implicaram no empobrecimento das malhas geradas e na não convergência das simulações. Ressalta-se que nenhuma das malhas analisadas atingiu os valores de y^+ sugeridos pelo manual do software CFX e por Cost (2004).

Diante desses resultados, optou-se pela malha tetraédrica básica com refinamento na superfície do edifício de 0,20m. Apesar de terem sido registrados y^+ levemente superiores a 300, diversos pontos no edifício apresentaram valores menores e próximos a 100, sendo, portanto, o que mais se aproximou do recomendado por Leite e Frota (2013). Além disso, priorizou-se o fechamento das simulações dentro dos valores de resíduos aceitáveis (MAX de 10^{-4}), sem recorrer à utilização de escalas de tempo de cálculo muito reduzidas, que podem comprometer a precisão da solução.

Leite e Frota (2013) realizaram alguns testes sobre a influência da diminuição da primeira camada de prismas no valor máximo de y^+ nas paredes dos edifícios. À medida que a altura da camada de prismas foi sendo reduzida, o y^+ também sofreu uma redução. Embora esse parâmetro seja muito importante na verificação da qualidade das simulações, sendo o intervalo indicado para o modelo $k-\epsilon$ entre 30 e 300, este não foi atingido na maior parte dos testes. A redução na camada de prismas também implicou no empobrecimento das malhas geradas e na não convergência das simulações. Sendo assim, os autores também priorizaram o fechamento das simulações através dos níveis de convergência

recomendados pela literatura ($RMS 10^{-4}$) e a adoção de malhas com valores aceitáveis de qualidade, como constatado e adotado nos testes desse trabalho de pesquisa.

Por fim, além da discussão do intervalo aceitável para o valor de y^+ , observou-se sua influência nos Cps nas aberturas do edifício avaliado. Essa análise foi realizada para 6 das 18 combinações de malhas avaliadas: malha 01 (malha tetraédrica básica com refinamento de 0,10m); malha 02 (malha tetraédrica básica com refinamento de 0,20m); malha 03 (malha tetraédrica básica com refinamento de 0,30m); malha 04 (malha tetraédrica básica com prismas e refinamento de 0,10m); malha 05 (malha tetraédrica básica com prismas e refinamento de 0,20m) e malha 06 (malha tetraédrica básica com prismas e refinamento de 0,30m). A escolha por essas malhas foi devido ao alcance dos níveis de convergência $MAX 10^{-4}$. O gráfico 6 apresenta a variação dos valores dos Cps nas aberturas do caso de referência em relação à alteração dos elementos da malha e ao aumento do valor de y^+ .

Gráfico 6: Variação dos valores dos Cps nas aberturas do caso de referência em relação à alteração dos elementos da malha e ao aumento do valor de y^+ .

Notou-se que a inclusão de elementos prismáticos e o refinamento da malha no edifício não exerceram uma influência significativa nos valores de Cps nas aberturas do modelo. Segundo os testes realizados, apesar de y^+ sofrer uma redução com o refinamento dos elementos no edifício e com o uso de malhas apenas com elementos tetraédricos, não foram verificadas diferenças expressivas nos Cps nas aberturas. As variações observadas nos valores absolutos de Cps foram de no máximo 0,1, registrando em algumas situações valores

bastante similares, o que não altera significativamente o fluxo de ar interno. No trabalho de Leite e Frota (2013) constatou-se essa mesma tendência, sendo que à medida que se reduzia a altura dos elementos prismáticos, não foram verificadas diferenças expressivas nos Cps. As diferenças encontradas pelos referidos autores foram em torno de 3% e 6%.

Por fim, ressalta-se que a determinação de forma precisa dos parâmetros adotadas na simulação é imprescindível para a confiabilidade das análises. Destaca-se, principalmente, a importância da discussão de forma mais detalhada e aprofundada dos aspectos da qualidade da malha com relação aos valores de y^+ e os níveis de convergência encontrados. Existem poucos trabalhos na área relacionados a esses aspectos e sobre a influência desses parâmetros nos valores de variáveis quantitativas como coeficientes de pressão e velocidade do fluxo de ar.

4.2 ETAPA DE VERIFICAÇÃO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E TÚNEL DE VENTO

Simulações através de dinâmica dos fluidos computacional têm sido cada vez mais adotadas para avaliação qualitativa e quantitativa da ventilação natural em edifícios e em ambientes urbanos, tendo se mostrado uma ferramenta eficaz e vantajosa na definição de estratégias durante a fase de desenvolvimento do projeto. A modelagem digital de componentes geométricos permite modificações mais rápidas do que os modelos físicos que requerem mais tempo e esforço para variações e ajustes do modelo. No entanto, a verificação da confiabilidade dos resultados numéricos é fundamental, uma vez que estes são sensíveis a um extenso número de parâmetros computacionais que são definidos pelo usuário (CALAUTIT; HUGHES, 2014 e RAMPONI; BLOCKEN, 2012). Nesse capítulo, os resultados quantitativos e qualitativos adquiridos através de simulações computacionais CFD para o caso de referência, são comparados e verificados com resultados experimentais por meio de ensaios no túnel de vento, para 05 ângulos de incidência dos ventos externos (0°, 45°, 90°, 135° e 180°). Primeiramente, foram realizados ensaios para gerar a Camada Limite Atmosférica de um entorno próximo a um ambiente suburbano. Posteriormente, análises das trajetórias do fluxo de ar foram realizadas através de experimentos de visualização por

fumaça no túnel de vento e da plotagem da direção e intensidade dos vetores da velocidade dos ventos nas simulações computacionais (análise qualitativa). Por fim, realizaram-se medições dos Cps nas aberturas do modelo ensaiado (análise quantitativa).

4.2.1 TÉCNICA EXPERIMENTAL DE SIMULAÇÃO DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

Foram realizados ensaios no túnel de vento visando à geração de uma Camada Limite Atmosférica (CLA) para ambientes suburbanos ($\alpha = 0,23$)³⁸. A curva da CLA obtida experimentalmente no trabalho de Castanho (2012) apresentou um expoente de $\alpha = 0,22$, até cerca de 80% da altura gradiente considerada para o ensaio realizado. Esses resultados apresentaram uma boa aproximação com o escoamento do vento suburbano sugerido pela literatura especializada, sendo registrado um erro de apenas 4,3%. Diante disso, utilizou-se nesse trabalho, a mesma configuração dos elementos de rugosidade definida por Castanho (2012), conforme descrito anteriormente na metodologia (item 3.3.2).

A tabela 18 apresenta os valores de pressão dinâmica média registrados (Pa), as respectivas temperaturas internas no túnel de vento (°C) e as velocidades médias calculadas (m/s) para as diferentes alturas z (cm) da CLA gerada no túnel. A altura de referência adotada (h_{ref}) foi de 50 cm, correspondente à altura do modelo ensaiado, e a velocidade de referência (U_{ref}) foi de 7m/s, visando garantir um número de Re adequado.

A partir desses resultados, foram plotados no gráfico 7 os perfis da velocidade da CLA ensaiada nessa pesquisa, com o adquirido no trabalho de Castanho (2012) e com o que a literatura especializada estabelece para o ambiente suburbano. O objetivo foi conferir a compatibilidade da curva da CLA obtida experimentalmente nesse trabalho com as duas referências utilizadas. De acordo com os experimentos realizados no túnel de vento, o valor do expoente (α) encontrado foi de 0,21 onde nota-se uma boa aproximação com o obtido por Castanho (2012) ($\alpha = 0,22$) e com o valor teórico para o meio suburbano ($\alpha =$

³⁸ O α é o expoente da lei potencial do perfil da CLA, que diz respeito ao tipo de terreno e entorno. Esse valor de 0,23 é sugerido pela literatura especializada para ambientes suburbanos e foi adotado no trabalho de Castanho (2012), que foi referência para o desenvolvimento dessa etapa da pesquisa de doutorado.

0,23). A diferença entre o α encontrado nesse trabalho e o valor sugerido pela literatura especializada foi de 8%.

Tabela 18: Pressão dinâmica média (Pa) e velocidade média correspondente (m/s) para cada altura z (cm) da camada limite atmosférica gerada no túnel de vento

Alturas z (cm)	Pressão média no ponto (Pa)	Temperatura no túnel (°C)	Velocidade média no ponto (m/s)
1,5	6	18,6	3,17
2,0	5	18,5	2,89
2,5	7	18,5	3,42
3,0	7	18,5	3,42
3,5	7	18,3	3,42
4,0	8	18,3	3,65
4,5	8	18,2	3,65
5,0	9	18,2	3,87
6,0	8	18,0	3,65
7,0	8	17,9	3,65
8,0	8	17,6	3,65
9,0	8	17,6	3,65
10	10	17,6	4,08
12	9	17,5	4,16
15	10	17,3	4,16
20	10	17,0	4,17
25	11	17,1	4,50
30	13	17,0	4,75
35	15	16,9	5,05
40	16	16,6	5,20
45	17	16,5	5,43
50	20	16,4	5,76
55	25	16,4	6,44
60	27	16,1	6,69
70	27	15,8	6,68
80	29	15,8	6,93
90	29	15,1	6,92

Como o objetivo dessa etapa é a verificação dos ensaios experimentais com a análise numérica, as mesmas condições da CLA obtidas experimentalmente foram aplicadas nas simulações computacionais: 7m/s como o valor da velocidade de referência dos ventos externos e $\alpha = 0,21$, aplicando a equação 6³⁹, descrita anteriormente no capítulo da revisão bibliográfica (item 2.1.2.3), para a correção do perfil dos ventos no nível do

³⁹ $7[m/s] * (z/10[m])^{0.21}$ – Equação de correção do perfil da velocidade dos ventos no nível do edifício. Adotada como dado de entrada das simulações computacionais.

edifício. A figura 79 e o gráfico 8 apresentam a variação dos perfis da velocidade dos ventos externos em função da altura, para o vento incidindo a 0° no edifício, nas simulações CFD, compatíveis com os adquiridos nos ensaios experimentais.

Gráfico 7: Comparação do perfil da Camada Limite Atmosférica (CLA) obtida nesse trabalho com o de Castanho (2012) e o estabelecido pela literatura especializada

Figura 79: Perfis da Camada Limite Atmosférica (CLA) nas simulações CFD – ângulo de 0°

Gráfico 8: Perfis da Camada Limite Atmosférica (CLA) nas simulações CFD – ângulo de 0°

4.2.2 VERIFICAÇÃO QUALITATIVA: ANÁLISES DOS FLUXOS DE AR

A fim de identificar a trajetória do fluxo de ar dentro e ao redor do edifício, ensaios de visualização por fumaça no túnel de vento foram realizados e imagens de vetores da direção e intensidade da velocidade dos ventos nas simulações CFD foram geradas. As figuras 80 até 83 comparam o escoamento do fluxo de ar no espaço interno e ao redor do caso de referência, numericamente e experimentalmente, para diferentes ângulos de incidência dos ventos externos (0°, 45°, 90° e 180°). De modo geral, as imagens apresentaram uma boa concordância com relação à trajetória do fluxo de ar para todos os ângulos analisados, mostrando a compatibilidade entre as duas ferramentas em reproduzir a distribuição do fluxo de ar dentro e ao redor do edifício.

Quando os sheds funcionaram como extratores de ar (0° e 45°), as duas ferramentas mostraram que os ventos que incidem pela abertura frontal possuem um direcionamento

para baixo, propagando-se em seguida pelo espaço interno e evidenciando a recirculação de ar com velocidades reduzidas no centro do ambiente. Têm-se velocidades mais altas na abertura de entrada de ar, notado pela maior concentração de fumaça e dos vetores de velocidade nessa região. Notou-se também ausência de fluxo de ar na região próxima ao primeiro shed e logo abaixo da abertura de entrada de ar. Quando o fluxo de ar incide nos sheds tem-se um aumento de sua velocidade e o efeito de separação do escoamento, com a formação de uma zona de sombra com velocidades reduzidas na região próxima das aberturas dos sheds posteriores. Uma ausência de fluxo de ar foi registrada na região a jusante do edifício, representada no CFX por vetores com velocidades muito baixas (próximas a 0m/s) e no túnel de vento pela ausência da fumaça (figuras 80 e 81).

Quando os ventos incidiram paralelamente as aberturas (90°), notaram-se velocidades do fluxo de ar interno bastante reduzidas, com a total estagnação do ar. Nos experimentos no túnel, isso é representado pela ausência de fumaça no espaço interno, enquanto no CFX têm-se vetores com velocidades bastante reduzidas. A ausência do fluxo de ar no espaço interno é facilmente notada nas duas ferramentas de análise (figura 82).

Figura 80: Trajetória do fluxo de ar no CR para o ângulo de 0° (a) CFX e (b) túnel de vento

Figura 81: Trajetória do fluxo de ar no CR para o ângulo de 45° (a) CFX e (b) túnel de vento

Figura 82: Trajetória do fluxo de ar no CR para o ângulo de 90° (a) CFX e (b) túnel de vento

Quando os sheds funcionaram como captadores, a corrente de ar incide na cobertura com altas velocidades ocasionando novamente uma zona de separação com a formação de uma grande sombra de vento com baixas velocidades nos sheds localizados posteriormente. Nos ensaios do túnel, percebe-se esse efeito por uma grande massa de fumaça circulando sobre a cobertura e no CFX pelo desvio dos vetores com altas velocidades sobre os sheds. Na região de ocupação dos usuários próxima ao shed localizado a barlavento, tem-se uma zona de calmaria, com baixas velocidades, indicando

que o ar que penetra por esse dispositivo não alcança a altura dos usuários com altas velocidades. Na abertura a sotavento, nota-se a saída do fluxo de ar direcionado para baixo e com maiores velocidades (figura 83).

Figura 83: Trajetória do fluxo de ar no CR para o ângulo de 180° (a) CFX e (b) túnel de vento

De maneira geral, os resultados numéricos e experimentais apresentaram uma boa concordância em reproduzir a distribuição do fluxo de ar dentro e ao redor do edifício. O uso das técnicas de visualização por fumaça em ensaios experimentais, em conjunto com a plotagem de vetores que fornecem a direção e a intensidade dos fluxos de ar em análises numéricas, facilitam o entendimento geral da trajetória da corrente de ar e a compreensão de determinados fenômenos físicos, que visualmente são mais acessíveis ao projetista que os valores quantitativos. No entanto, para uma análise e uma compreensão mais aprofundada do comportamento da ventilação natural, a aquisição de parâmetros quantitativos, como os coeficientes de pressão são imprescindíveis.

4.2.3 VERIFICAÇÃO QUANTITATIVA: COEFICIENTES DE PRESSÃO NAS ABERTURAS

A tabela 19 e o gráfico 9 comparam os resultados dos coeficientes de pressão médios nas aberturas do caso de referência, em função dos ângulos de incidência dos ventos externos, adquiridos nos ensaios no túnel de vento e nas simulações computacionais. Em seguida, o gráfico 10 apresenta os valores de C_p medidos numericamente e experimentalmente, adotando como limite um erro de 10% entre as duas ferramentas.

Tabela 19: Coeficientes de pressão médios nas aberturas do caso de referência, adquiridos no túnel de vento e nas simulações CFD.

Ângulos dos ventos	Coeficientes de pressão (C_p)							
	Fachada (A1)		Shed 01 (S1)		Shed 02 (S2)		Shed 03 (S3)	
	TV	CFX	TV	CFX	TV	CFX	TV	CFX
0°	+0,46	+0,40	-0,86	-0,84	-0,66	-0,62	-0,38	-0,33
45°	+0,13	+0,10	-0,85	-0,72	-0,66	-0,66	-0,52	-0,48
90°	-0,85	-0,90	-1,29	-1,15	-1,06	-1,00	-0,87	-0,86
135°	-0,24	-0,40	-0,79	-0,70	-0,60	-0,57	0,12	0,10
180°	-0,19	-0,25	-1,07	-0,65	-0,95	-0,95	0,74	0,75

Em geral, a maioria dos resultados adquiridos no túnel de vento e nas simulações apresentaram uma concordância adequada com diferenças abaixo de 10% para a maioria dos pontos monitorados. Notaram-se algumas discrepâncias, especialmente no S1, onde em alguns casos o CFX superestima os valores de C_p . A maior diferença entre os resultados numéricos e experimentais, foi registrada em S1 quando os sheds funcionaram como captadores de ar (180°), apresentando um erro superior a 10%. As razões exatas para isso não foram claras, mas é possível que a aceleração do fluxo de ar sobre os sheds localizados na frente da abertura S1 (S2 e S3), tenha causado algum efeito sobre as medições nas simulações. Variações na velocidade e na direção do vento nessas regiões fazem com que o comportamento do fluxo de ar nas aberturas, mude constantemente, sendo que a curvatura das linhas de escoamento no CFX não é tão pronunciada como nos ensaios, o que faz com que a pressão seja menos negativa. No caso dos sheds como extratores de ar (0°) registrou-se a maior similaridade entre todos os pontos medidos, com valores numéricos e experimentais muito próximos. Além disso, os C_p s das aberturas S2 para os ângulos de 45° e 180° foram exatamente iguais, registrando a mais alta precisão nas medições com o erro

médio de 0% e o S3 (180°) que apresentou o erro médio de apenas 1% entre os pontos (gráficos 9 e 10).

Gráfico 9: Comparação dos Cps nas aberturas do caso de referência, em função dos ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°, adquiridos através de ensaios no túnel de vento e simulações CFD.

Gráfico 10: Cps nas aberturas do caso de referência, adquiridos através de ensaios no túnel de vento e simulações CFD. As linhas pontilhadas indicam a porcentagem de erro de 10%.

Os resultados experimentais e simulados dos Cps nas aberturas dos modelos apresentaram uma boa correlação. De acordo com Cook (1990), erros nas medições de pressão em túnel de vento estão tipicamente entre 10 e 20%. Calautit e Hughes (2014) obtiveram resultados de Cps na superfície de uma torre de vento com uma boa correspondência, apresentando um erro menor que 10%, com exceção do ponto no topo e na face posterior do edifício. Já as medidas realizadas na superfície frontal apresentaram uma grande precisão, com erro médio de apenas 5%. Na pesquisa de Balbastro e Sonzogni (2012), as diferenças encontradas nas medições dos Cps, foram também menores que 10%, observando uma concordância muito boa entre os resultados numéricos e experimentais.

Em um trabalho desenvolvido por Jiang et al. (2003), os Cps através de ensaios no túnel de vento e simulações computacionais foram similares, apesar de existirem algumas discrepâncias na cobertura, sendo que os valores medidos foram mais negativos que os

simulados, como registrados nesse trabalho. Montazeri e Blocken (2013) mediram os Cps na superfície de um edifício e também registraram algumas divergências entre os valores experimentais e os numéricos, sendo que os maiores desvios padrão foram 0,052 e 0,072, mostrando uma boa compatibilidade entre as duas ferramentas. Diante disso, as diferenças registradas nesse trabalho estão próximas do que a literatura especializada tem apresentado, ressaltando que em alguns pontos, foram alcançadas diferenças inferiores.

Por fim, o gráfico 11 apresenta as variações das taxas de renovação de ar/hora, em função dos ângulos de incidência dos ventos externos, entre os resultados adquiridos nos experimentos no túnel de vento e nas simulações computacionais. De maneira geral os valores numéricos apresentaram-se mais baixos do que os adquiridos nos ensaios experimentais. Notou-se que para os ângulos de 0°, 45° e 90° os resultados não apresentaram diferenças significativas, destacando-se o caso de 0°, onde a diferença foi de apenas 0,45%. A maior discrepância nessas taxas foi registrada para o ângulo de 180° (20%), em função da alteração registrada no valor de Cp na abertura S1, conforme discutido anteriormente.

Gráfico 11: Variações nas taxas de renovação de ar/hora em função dos ângulos de incidência dos ventos externos, entre os resultados adquiridos no túnel de vento e no CFX.

Esses valores também estão de acordo com o que tem sido apresentado pela literatura especializada. No trabalho de Kim et al. (2010) a diferença registrada nas taxas de renovação entre os ensaios experimentais e as simulações CFD foram de 1,5% e 29,2% para os ângulos de incidência de 90° e 0°, respectivamente. Além disso, as duas ferramentas apresentaram padrões de distribuição do fluxo de ar interno muito similares.

Apesar de algumas diferenças nos valores de C_p e nas taxas de renovação de ar/hora registrados entre as duas ferramentas utilizadas, notou-se que ambas apresentaram fenomenologicamente a mesma tendência. Não foram registradas incompatibilidades com relação ao fenômeno e ao comportamento do fluxo de ar para os diferentes ângulos de incidência dos ventos externos, o que confirma novamente a boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos para o caso de referência analisado.

Além de verificar a compatibilidade dos valores de C_p nas aberturas através de métodos numéricos e experimentais e conferir com dados encontrados na literatura especializada, compararam-se esses resultados com os disponíveis na base de dados da Universidade Politécnica de Tóquio⁴⁰. Apesar dos modelos disponíveis nessa base possuírem geometrias simples (sem sheds na cobertura), escolheu-se uma geometria retangular, com as mesmas proporções do edifício analisado e selecionaram-se as mesmas condições do entorno (ambiente suburbano). Além disso, a base apresenta valores apenas para modelos vedados, o que difere do trabalho em questão. Trabalhos científicos que abordem medidas de C_p nas aberturas das edificações não é uma prática comum, existindo apenas a quantificação de C_p s nas superfícies de edifícios totalmente vedados. Ensaios com modelos fechados para a aferição dos C_p s nas superfícies é uma prática usual para auxiliar o projetista na melhor localização das aberturas de entrada e saída de ar, visando obter o maior diferencial de pressão entre as aberturas e, portanto, o maior potencial da ventilação natural nos espaços internos. Sendo assim, acredita-se que os valores com e sem abertura sejam equivalentes. Ressalta-se que a comparação do modelo avaliado nesse trabalho com essa base de dados foi buscando uma forma de comparação com uma das principais

⁴⁰ Uma das maiores bases de dados de C_p nas superfícies de edifícios é a da Universidade de Tóquio, disponível em: <http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>

referências existentes na literatura sobre valores de Cps nos edifícios. No entanto, não é uma referência fidedigna da tipologia avaliada nesse trabalho, sendo que existem diferenças entre os modelos que não transpõe os resultados diretamente.

Notou-se uma semelhança entre os valores de Cps adquiridos nesse trabalho com os disponíveis na base de dados referida. Quando o vento incide no modelo à 0° e 45° os valores dos Cps na abertura A1, localizada mais próxima do solo, apresentam-se menores (em torno de 0,50 e 0,20) em comparação com as aberturas dos sheds (S1, S2 e S3), uma vez que a influência da rugosidade é maior e o efeito dos obstáculos é mais perceptível, o que reduz a velocidade dos ventos. Da mesma forma, como as aberturas dos sheds estão mais próximas da camada de escoamento livre, com velocidades dos ventos mais elevadas, os valores absolutos de Cp tendem a ser mais elevados, em torno de 0,60 – 0,90.

Essa etapa de verificação dos resultados das simulações CFD com os do túnel de vento e a comparação com alguns trabalhos semelhantes desenvolvidos até o momento, tiveram uma importância significativa para a pesquisa, uma vez que comprovaram a concordância entre essas ferramentas para estudos de ventilação natural, dando uma maior confiança para a realização das análises paramétricas através da simulação CFD. As análises quantitativas e qualitativas mostraram uma boa compatibilidade entre os resultados numéricos e experimentais. Com relação à quantitativa, a maioria dos pontos monitorados apresentaram valores de Cps com erros inferiores a 10%, sendo registradas maiores divergências apenas em dois pontos. No entanto, notou-se que as diferenças estão dentro do que a literatura especializada tem encontrado. Além disso, as duas ferramentas registraram o mesmo comportamento do fluxo de ar para todos os ângulos avaliados, ou seja, fenomenologicamente apresentaram desempenhos similares e coerentes. O mesmo ocorreu com a análise qualitativa dos fluxos de ar. De forma geral, as imagens apresentaram uma boa concordância para todos os ângulos de incidência dos ventos analisados. Segundo Jiang et al. (2003), se os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância com os ensaios experimentais, o método numérico pode ser aplicado com confiança para as análises de ventilação natural.

4.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: ANÁLISE PARAMÉTRICA

Nesse capítulo, analisa-se a influência da variação de diferentes parâmetros projetuais no desempenho de sheds extratores e captadores de ar com relação à ventilação natural. O sistema foi avaliado para diferentes velocidades (1,5m/s; 3,0m/s e 7,0m/s) e ângulos de incidência dos ventos externos (0° e 45° para sheds como extratores; 90° para uma situação neutra e 135° e 180° para sheds como captadores de ar). As análises foram realizadas de duas formas: 1) qualitativa (através de planos de contorno e vetores de direção e intensidade das velocidades do fluxo de ar) e 2) quantitativa (com base nas taxas de renovação de ar/hora, porcentagem de incremento ou redução nessas taxas, em relação ao caso de referência e coeficientes de pressão nas aberturas dos modelos).

4.3.1 VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DOS SHEDS

Analisa-se aqui a influência da variação na geometria dos sheds na ventilação natural dos espaços internos, de modo a identificar o formato mais otimizado para alcançar o maior fluxo de ar interno. Primeiramente, observou-se a interferência do aumento da velocidade dos ventos externos no desempenho da ventilação natural interna. Posteriormente, a influência dos ângulos de incidência dos ventos no desempenho dos sheds extratores e captadores de ar foi avaliada.

4.3.1.1 Desempenho sob diferentes velocidades dos ventos externos

O gráfico 12 apresenta a velocidade do fluxo de ar ao longo do espaço interno para diferentes velocidades e ângulos de incidência dos ventos externos, em cada geometria analisada. A velocidade do fluxo de ar interno foi medida em 15 pontos, distantes entre si em 1,25m e a uma altura de 0,94m a partir do piso, referente ao ponto médio da abertura mais baixa e à zona de ocupação dos usuários, conforme apresentado anteriormente na figura 55.

Gráfico 12: Velocidade do fluxo de ar ao longo do espaço interno para diferentes velocidades (a) 1,5m/s, (b) 3,0m/s e (c) 7,0m/s e ângulos de incidência dos ventos externos.

A velocidade do fluxo de ar interno aumentou em função do incremento da velocidade dos ventos externos, conforme esperado, sendo que o maior acréscimo ocorreu quando os sheds funcionaram como extratores de ar (0° e 45°). No entanto, as porcentagens de aproveitamento dos ventos externos no espaço interno (tabela 20), não apresentaram diferenças expressivas com o aumento da velocidade externa. O mesmo ocorreu com os Cps nas aberturas, conforme indicado pela literatura especializada (AWBI, 1998; CÓSTOLA; ALLUCI, 2011; CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009; LEITE; FROTA, 2013), cujos valores variam em função, principalmente, do ponto de interesse na fachada, da geometria do edifício, das características do entorno e da direção dos ventos. Além disso, não foi registrada nenhuma interferência no padrão de distribuição do fluxo de ar interno, uma vez que o caminho percorrido pela corrente de ar no edifício foi o mesmo, independente do aumento da velocidade dos ventos externos (figura 84). Essa tendência foi observada para todos os ângulos de incidência dos ventos e em todas as geometrias avaliadas.

Tabela 20: Velocidade média do fluxo de ar interno na zona de ocupação dos usuários em relação à velocidade dos ventos externos (U/U_{ref}) para todas as geometrias analisadas

Ângulo de incidência dos ventos externos		Velocidade dos ventos externos (m/s)					
		$U_{ref} = 1,20\text{m/s}$		$U_{ref} = 2,40\text{m/s}$		$U_{ref} = 5,50\text{m/s}$	
		U (m/s)	U/ U_{ref}	U (m/s)	U/ U_{ref}	U (m/s)	U/ U_{ref}
Caso de referência (CR)	0°	0,31	26%	0,62	26%	1,43	26%
	45°	0,22	18%	0,41	17%	0,94	17%
	90°	0,06	5%	0,12	5%	0,27	5%
	135°	0,08	7%	0,19	8%	0,44	8%
	180°	0,11	9%	0,22	9%	0,49	9%
Geometria a um (G01)	0°	0,30	25%	0,58	24%	1,37	25%
	45°	0,23	19%	0,46	19%	0,99	18%
	90°	0,05	4%	0,10	4%	0,22	4%
	135°	0,08	7%	0,19	8%	0,49	9%
	180°	0,13	11%	0,26	11%	0,60	11%
Geometria a dois (G02)	0°	0,32	27%	0,65	27%	1,54	28%
	45°	0,20	17%	0,41	17%	0,99	18%
	90°	0,05	4%	0,10	4%	0,22	4%
	135°	0,20	17%	0,41	17%	0,93	17%
	180°	0,22	18%	0,43	18%	0,99	18%
Geometria a três (G03)	0°	0,30	25%	0,62	26%	1,48	27%
	45°	0,20	17%	0,41	17%	0,93	17%
	90°	0,04	3%	0,07	3%	0,16	3%
	135°	0,26	22%	0,53	22%	1,26	23%
	180°	0,20	17%	0,41	17%	0,93	17%
Geometria a quatro (G04)	0°	0,35	29%	0,70	29%	1,65	30%
	45°	0,23	19%	0,46	19%	1,04	19%
	90°	0,02	2%	0,05	2%	0,11	2%
	135°	0,20	17%	0,43	18%	0,99	18%
	180°	0,20	17%	0,38	16%	0,93	17%

Figura 84: Distribuição do fluxo de ar no ambiente interno e ao redor dos sheds para o caso de referência e para a geometria quatro - ângulo de incidência do vento externo de 0° (a) $v = 1,5 \text{ m/s}$; (b) $v = 3,0 \text{ m/s}$; (c) $v = 7,0 \text{ m/s}$.

O gráfico 13 apresenta as taxas de renovação de ar/hora e a variação nesses valores (%) em função do aumento da velocidade dos ventos externos, para os cinco ângulos de incidência dos ventos em todas as geometrias analisadas. Conforme esperado, o aumento da velocidade dos ventos externos também resultou em um claro acréscimo nas taxas de renovação de ar/hora, para todos os casos avaliados. Uma relação quase linear entre as taxas e a velocidade externa foi observada, independente da geometria dos sheds, como pode ser observado pelo aumento nesses valores (%) que seguem a mesma tendência. Além disso, nota-se que a influência da velocidade externa sobre a renovação de ar nos ambientes internos foi altamente dependente do ângulo de incidência dos ventos externos. Por fim, ressalta-se que a G04 apresentou as maiores taxas para todas as velocidades avaliadas, embora o incremento tenha sido semelhante às outras geometrias analisadas.

Gráfico 13: Taxas de renovação de ar/hora em função da velocidade dos ventos externos, para os diferentes ângulos de incidência dos ventos em todas as geometrias analisadas.

Diante desses resultados, as análises paramétricas a seguir, foram realizadas para a velocidade dos ventos externos de 7m/s e para diferentes ângulos de incidência dos ventos, que avaliam os sheds como extratores (0° e 45°) e captadores de ar (135° e 180°) e para uma situação neutra (90°).

4.3.1.2 Desempenho sob diferentes ângulos de incidência dos ventos

De modo geral, a distribuição e a velocidade do fluxo de ar interno são fortemente influenciadas pela implantação do edifício no terreno e pela orientação de suas aberturas aos ventos dominantes, uma vez que a maneira como o vento incide na edificação modifica os campos de pressões no entorno e ao redor das janelas e, portanto, a forma como o fluxo interno percorre o espaço. Aliado a esses fatores, modificações na geometria do edifício, como os sheds, também exercem uma influência significativa no desempenho da ventilação natural no espaço interno.

O gráfico 14 apresenta as taxas de renovações de ar/hora em função dos ângulos de incidência dos ventos externos, para cada geometria analisada, com a porcentagem da redução nessas taxas quando o vento incide perpendicular às aberturas, em relação à incidência oblíqua e o gráfico 15 a variação (%) nesses valores, em cada geometria, em relação ao CR. O gráfico 16 apresenta os Cps médios nas aberturas de entrada e saída do ar, para cada geometria, em função dos ângulos de incidência dos ventos.

De modo geral, o ângulo de incidência dos ventos e a mudança na geometria dos *sheds* influenciam na ventilação natural, apresentando alterações expressivas nos valores de Cps nas aberturas e nas taxas de renovação de ar/hora. Tanto para os *sheds* funcionando

como extratores quanto para os captadores de ar, as maiores taxas foram alcançadas quando os ventos incidiram obliquamente no edifício (45° e 135°), constatando-se diferenças significativas em relação às incidências perpendiculares (0° e 180°). Isso ocorreu devido aos maiores valores da velocidade do ar nas aberturas do edifício, no caso de 45° e 135° , o que incrementou a vazão volumétrica e, conseqüentemente, a renovação do ar no espaço interno. Para todas as geometrias analisadas os *sheds* como extratores de ar apresentaram um desempenho superior do que como captadores, (gráficos 14 e 15).

Gráfico 14: Taxas de renovações de ar/hora em função dos ângulos de incidência dos ventos externos, para cada geometria analisada.

Gráfico 15: Variação da taxa de renovação de ar/hora (%) para cada geometria analisada, em relação ao caso de referência.

Gráfico 16: Cps nas aberturas de entrada e saída de ar em função dos ângulos de incidência dos ventos, para cada geometria (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.

4.3.1.2.1 Sheds extratores de ar

Para a situação dos *sheds* como extratores de ar, notou-se que a G04, seguida da G02 apresentaram as maiores taxas de renovação de ar por hora, registrando um

incremento de 51% e 22%, em relação ao CR para o ângulo de 0° e 32% e 8% para o ângulo de 45°, respectivamente. Já os casos G01 e G03 apresentaram desempenhos similares ao CR, sendo que as variações nessas taxas foram insignificantes para os dois ângulos de incidência analisados (0,48% e 0%, para 0° e -3% e 2% para 45°, respectivamente), conforme apresentado nos gráficos 14 e 15.

As figuras 85 e 86 apresentam a velocidade e a distribuição do fluxo de ar em um plano a 0,94m a partir do piso para os ângulos de 0° e 45°, respectivamente. Observa-se a escala de velocidades obtida nas simulações, onde os valores estão fixados de 0 até 5,0 m/s e cada cor representa um valor correspondente de velocidade. Com relação à distribuição do fluxo de ar interno para o ângulo de 0°, a mudança nas geometrias dos *sheds* não exerceu uma influência significativa, com exceção da G03 que ocasionou uma redução nos valores de velocidade na região próxima a abertura a barlavento. Tem-se uma uniformidade no fluxo de ar no espaço interno devido à incidência perpendicular do vento na abertura e a simetria das pressões nessa região. O ar atravessa a abertura a barlavento com altas velocidades, sofrendo uma redução logo após entrar no espaço, devido à expansão da corrente de ar. Em seguida, as velocidades vão aumentando até atingir o pico no centro do ambiente, devido à conjugação com a circulação descendente interna e, posteriormente, decrescem. Destacam-se G04 e G02 que apresentaram a região central do espaço interno com as maiores velocidades do ar. Em todos os casos, na região a sotavento do edifício tem-se sombra de vento, com velocidades próximas a 0m/s (figura 85).

Já quando os ventos externos incidiram obliquamente na edificação (45°), a distribuição do fluxo de ar interno não foi uniforme, sendo este desviado para a lateral do espaço. Assim, a velocidade na área central é menor, sendo registrados valores entre 0m/s e 0,6m/s. Embora a velocidade atingida na abertura e na região próxima a ela tenha sido bastante elevada (em torno de 4,0m/s), o fluxo de ar foi sofrendo uma redução à medida que se afastava da face a barlavento. Novamente, a G04 registrou os maiores valores de velocidade do fluxo de ar interno na zona de ocupação dos usuários (figura 86)

Figura 85: Velocidade do ar para 0° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.

Figura 86: Velocidade do ar para 45° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.

Em todos os casos, o fluxo de ar atravessa a abertura a barlavento como um jato descendente com velocidades elevadas, o que possibilita uma maior corrente de ar na zona de ocupação dos usuários. Na região central e superior do espaço a redução desses valores está associada à recirculação interna, onde se verifica a formação de um único vórtice central, ao contrário da G03, que devido o formato dos *sheds* em duplo arco, impõe uma ondulação em torno de dois eixos. Assim, forma-se uma componente ascendente no fluxo interno, na vizinhança da abertura de entrada, responsável pela referida redução da velocidade interna próxima a essa região (figura 87).

Nota-se também um aumento da velocidade do fluxo de ar interno próximo aos *sheds*. Isso ocorre devido ao vento externo que tangencia a cobertura com altas velocidades, gerando uma zona de separação fortemente depressionária junto às aberturas dos *sheds* e, conseqüentemente, a aceleração do fluxo de saída, junto à face superior. Desse efeito resultam campos de pressão assimétricos nas aberturas com diferentes valores de Cps (menos negativos e em alguns casos positivos), minimizando a intensidade da sucção na porção inferior da janela, o que, em conjunto com a influência do shed seguinte, dá origem a uma zona de recirculação nos *sheds*, com entrada e saída de ar pela mesma abertura. No entanto, essa recirculação permanece nessa região, ocasionando uma massa de ar estacionária que não penetra no espaço interno e que reduz a quantidade de ar que é extraída pelo 1º e 2º dispositivos. Já no último *shed*, isso não ocorre, existindo apenas extração do ar e de uma forma mais intensa (figura 87).

No caso da G03, o seu formato ocasiona o duplo vórtice interior que gera a extração mais intensa pelo 1º *shed*, a recirculação no 2º e, no 3º *shed*, devido à parede inferior curva que canaliza a recirculação exterior para esses dispositivos. Já na G04, nota-se fluxo reverso no 2º *shed*. Apesar de ocorrerem recirculações próximas ao 1º *shed*, a velocidade da corrente de ar que tangencia esse primeiro dispositivo é mais forte do que as que ocorrem nos *sheds* posteriores, proporcionando a extração do ar de forma mais intensa e por toda a abertura. Dessa forma, não ocorre a entrada da massa de ar estacionária localizada na região abaixo da abertura dos *sheds* (figura 87).

Já para o ângulo de 45°, nota-se que as diferentes geometrias dos *sheds* modificam a trajetória das correntes de ar e a formação dos vórtices. Para essa situação, não foi formada a recirculação central em torno de um único eixo, mas sim em 2 eixos diagonais. Isso ocorreu em função da assimetria das pressões nas aberturas originadas pela incidência oblíqua dos ventos no edifício e pela sombra formada pela corrente de ar que tangencia os *sheds*, ocasionando, também para essa situação, a entrada e a saída de ar pela mesma abertura (figura 88).

Figura 87: Vetores de velocidade do ar para o CR, G01, G02, G03 e G04 - ângulo de 0°.

Figura 88: Vetores de velocidade do ar (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03, (e) G04 e (f) detalhe da recirculação de ar – ângulo de 45°

A forma arquitetônica interfere diretamente na distribuição das pressões nas superfícies dos edifícios e a maneira como o escoamento contorna as geometrias aerodinâmicas reduz a separação, o que aumenta localmente as velocidades e, portanto, provocam valores de C_p mais baixos (maior velocidade – menor pressão), aumentando a diferença dos C_p s entre as aberturas. Para os *sheds* funcionando como extratores (0° e 45°), o desempenho do CR e da G01 foram muito próximos, devido à similaridade entre as geometrias dos *sheds*. Isso possibilita uma semelhança na trajetória dos ventos externos e na distribuição das pressões na superfície desses dispositivos, o que implica em valores similares de C_p nas aberturas. Nota-se uma proximidade da G03 com o CR e a G01, apesar do

formato diferenciado, ocasionando taxas de renovação similares. No entanto, a diferença dos Cps entre A1 e S1 foi menor na G03, o que indica um menor fluxo de ar interno nessa região, conforme visto anteriormente (figura 85). Em todos os casos, a corrente de ar tangencia diretamente o 1º *shed*, gerando uma sombra de vento nas aberturas posteriores e, conseqüentemente, valores negativos de Cp e a extração do ar (gráfico 16).

Nota-se que a diferença de pressão entre as aberturas de entrada e saída de ar foi maior na G04, ocasionando a maior possibilidade de movimentação do ar no interior do edifício e, portanto, se torna a situação mais vantajosa para a ventilação por *sheds* extratores, por ação dos ventos, como já havia sido constatado anteriormente. Em seguida, temos a G02, que apresenta semelhança com a G04. No entanto, a curvatura da G04 forma uma região de alta pressão mais acentuada, e uma zona de sombra mais pronunciada. Nesses casos, devido ao formato aerodinâmico desses dispositivos, o escoamento do fluido tangencia uma maior superfície do primeiro *shed*, o que aumenta a velocidade e ocasiona uma queda de pressão mais significativa nas aberturas posteriores e, conseqüentemente, a extração do ar de forma mais intensa (gráfico 16 e figura 87).

4.3.1.2.2 Situação neutra

Quando os ventos incidiram paralelamente as aberturas (90°), foi registrado o pior desempenho em todos os casos analisados. O vento que as tangenciam ocasiona zonas de subpressão e sobrepressão e, conseqüentemente, entrada e saída de ar pela mesma janela. A movimentação do ar é induzida pela assimetria das pressões nessas regiões, inclusive pelo fato da abertura mais baixa existir apenas em uma lateral do edifício, associada à turbulência pela interação do vento incidente com os *sheds*. No entanto, devido às taxas de renovação do ar reduzidas, a movimentação do ar interno praticamente nula e as zonas de estagnação do ar ao longo de todo o espaço interno, nota-se que as recirculações que ocorrem nas aberturas, não penetram no edifício (figura 89). Isso é ocasionado pelos valores muito similares de Cps nas aberturas, o que gera ΔCps próximos de zero. Além disso, notam-se valores bastante similares entre as diferentes geometrias,

indicando que para essa situação, a variação no formato dos *sheds* não se apresenta como um fator decisivo no desempenho da ventilação do ambiente interno (gráficos 14, 15 e 16).

Figura 89: Velocidade do ar para 90° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.

4.3.1.2.3 *Sheds* captadores de ar

No caso dos *sheds* como captadores de ar, todas as geometrias apresentaram um desempenho superior ao CR, mas na G01 essa diferença foi insignificante. Quando o vento incidiu perpendicularmente às aberturas (180°) as maiores taxas de renovação foram registradas na G03, apresentando um incremento de 16% em relação ao CR. G04 e G02 apresentaram desempenhos próximos ao da G03, registrando, inclusive, um desempenho superior para o ângulo de incidência de 135°. Nota-se que em G04 a região interna com velocidades reduzidas foi menor, inclusive, que G03. Isso reforça que essa geometria também apresentou um desempenho satisfatório para a captação do ar pela cobertura (gráficos 14 e 15). Como já constatado anteriormente, quando o vento incidiu perpendicularmente (180°) às aberturas, a distribuição do fluxo de ar interno foi simétrica, ao contrário da direção oblíqua (135°). Para ambas as situações, o CR e a G01 apresentaram desempenhos similares, ao contrário dos outros casos, cujas diferentes geometrias alteraram a distribuição e as velocidades do fluxo de ar interno (figuras 90 e 91).

Figura 90: Velocidade de ar para 180° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04

Figura 91: Velocidade para 135° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04

Em todas as geometrias analisadas, para 180°, apenas o dispositivo frontal a barlavento funciona como captador. O fluxo de ar incidente na cobertura com altas velocidades gera uma forte zona de separação com a formação de uma sombra de vento que ocasiona a queda dos valores de pressão nas aberturas dos *sheds* localizados na região posterior (valores de C_p negativos). Esse efeito aumenta a probabilidade de ocorrência de um fluxo reverso nas aberturas S1 e S2, que ao contrário de captarem o ar, passam a extraí-lo. No caso de 135°, nos *sheds* posteriores, tem-se a entrada de ar na parte das aberturas mais próximas da região a barlavento, enquanto na outra se tem a saída de ar. Isso ocorre,

como mencionado anteriormente, devido à assimetria das pressões pela incidência oblíqua dos ventos dominantes no edifício.

Esse fenômeno também provoca valores de ΔC_p mais elevados aos obtidos para os *sheds* extratores, apesar de se constatarem menores taxas de renovação. Isso ocorre, pois o ar captado pelos *sheds* atinge apenas a zona superior do espaço, uma vez que o ar que entra pelo primeiro dispositivo é extraído pelos outros *sheds*, não atingindo a zona de ocupação com altas velocidades. A intensidade com que o vento incide sobre esses dispositivos e gera a sombra de vento nos *sheds* posteriores, ocasiona uma redução mais intensa nos valores de C_p s e, conseqüentemente, maiores ΔC_p s entre as aberturas. Além disso, os *sheds* estão localizados na cota de 5,00m, altura onde a velocidade dos ventos é maior, ao contrário da situação de extração, cuja abertura de entrada se localiza a 0,625m do piso, onde as velocidades dos ventos apresentaram uma redução em torno de 25%.

Os valores de C_p foram semelhantes para o CR e a G01 e o melhor desempenho ocorreu na G03, que possui o maior ΔC_p entre as aberturas e as maiores taxas de renovação, tendo uma diferença significativa em relação ao CR (18% e 16% para 135° e 180°, respectivamente). No entanto, a diferença em relação a G04 e a G02 foi menos significativa, reforçando que também se apresentam como boas opções para a captação.

No CR e na G01, o fluxo de ar captado pelo primeiro *shed* é direcionado para frente sendo parcialmente extraído pelos *sheds* posteriores. O fluxo com maior velocidade permanece na zona superior do espaço e na região mais afastada do *shed* captador, pois a diferença de pressão entre as aberturas ocasiona a aceleração do ar e a saída pela abertura mais baixa. Em função disso, forma-se uma recirculação oblíqua em torno de um eixo próximo ao canto inferior sob a entrada e à medida que o ar vai se direcionando para o fundo do ambiente, a velocidade sofre uma redução, atingindo valores mais baixos próximos ao *shed* captador. Esses valores reduzidos indicam que o ar que penetra por esse dispositivo não chega com grandes velocidades à altura do usuário (figura 92).

Figura 92: Vetores de velocidade do ar (a) CR e (b) G01 - ângulo de 180°

Nas outras geometrias, devido à curvatura aerodinâmica acentuada, o fluxo é desviado para baixo de forma mais intensa, o que aumenta a velocidade na zona de ocupação dos usuários, como os casos das G02 e G04. Isso faz com que um fluxo com maiores velocidades atinja locais mais distantes do *shed* captador. Por outro lado, a trajetória do fluxo de ar interno forma uma região de sombra de vento com velocidades reduzidas no centro do ambiente (figura 93).

Figura 93: Vetores de velocidade do ar (a) G02 e (b) G04 - ângulo de 180°

Já a G03, devido ao seu formato em meio arco, o ar com maiores velocidades é direcionado para baixo, atingindo o centro do ambiente e sendo extraído, posteriormente, pela abertura a sotavento e pelos *sheds* localizados atrás do captador. Essa configuração ocasiona uma circulação do ar interno em 2 eixos de modo que o fluxo que entra com altas velocidades pela cobertura gera uma zona de calmaria com valores reduzidos na região próxima ao *shed* captador (figura 94).

Figura 94: Vetores de velocidade do ar G03 - ângulo de 180°

4.3.1.2.4 Análise geral

De maneira geral, nas simulações variando a geometria dos *sheds*, para todos os casos analisados, esses dispositivos como extratores apresentaram um melhor desempenho do que como captadores de ar. Isso aconteceu, pois, apesar dos *sheds* como captadores apresentarem um maior número de aberturas de entrada de ar, apenas o 1º *shed* funciona como captador. O vento incidente na cobertura forma uma sombra de vento que gera valores de Cps negativos nos *sheds* localizados na região posterior e, consequentemente, a extração do ar. Além disso, tanto para extração quanto para captação, as taxas de renovação foram superiores quando os ventos incidiram obliquamente no edifício (45° e 135°) do que perpendicularmente (0° e 180°).

Para os *sheds* como extratores de ar a G04 apresentou o melhor desempenho seguida da G02, registrando um incremento nas taxas de renovação de 51% e 22% em relação ao CR para 0° e 32% e 8% para 45°, respectivamente. Já as G01 e G03 apresentaram desempenhos bastante similares ao CR, sendo que as variações nessas taxas foram insignificantes para os dois ângulos analisados (0,48% e 0% para 0° e -3% e 2% para

45°, respectivamente). Esses resultados foram reforçados pelos valores de Cps nas aberturas, uma vez que foram superiores para G04 e similares para CR, G01 e G03. Qualitativamente, o ângulo de incidência dos ventos se mostrou mais influente na distribuição do fluxo de ar interno na zona de ocupação dos usuários, pois, de forma geral, a mudança nas geometrias dos sheds não alterou significativamente essa distribuição, com exceção da G03.

Com os ventos incidindo paralelamente as aberturas (90°), notou-se o pior desempenho para todas as geometrias analisadas. Isso foi confirmado pelos valores similares de Cps nas aberturas de entrada e saída de ar, ocasionando ΔCps próximos a zero e, conseqüentemente, um fluxo de ar interno com baixas velocidades ao longo de todo o espaço interno. Além disso, não foram registradas diferenças significativas nas taxas de renovação de ar entre as diversas geometrias analisadas (2%), o que indica que para essa situação, a variação no formato dos *sheds* não é um fator decisivo no desempenho da ventilação natural do espaço interno.

Para os *sheds* como captadores de ar, os casos G03, G04 e G02 se apresentaram como boas opções. Quando o ângulo foi de 180°, G03 se destacou, registrando o maior incremento nas taxas de renovação de ar/hora em relação ao CR (16%), seguido de G04 e G02, cujas variações foram de 10% e 8%, respectivamente. Já para o ângulo de 135°, G04 e G02 apresentaram um desempenho superior (35% e 27%, respectivamente) à G03 (18%). Novamente, CR e G01 apresentaram desempenhos bastante similares (diferença de 0,7% para ambos os ângulos). Isso novamente é comprovado pelos Cps nas aberturas dos modelos. CR e G01 apresentaram valores similares, enquanto G03 registrou Cps superiores aos casos analisados. No entanto, a diferença para G04 e G02 não foi tão significativa. Diante disso, nota-se que tanto G04 quanto G02 aparentemente apresentaram maior viabilidade de uso em situações que exigem uma adaptação às mudanças dos ângulos de incidência dos ventos externos. O fato de apresentar um desempenho relativamente adequado para extração e para a captação do ar pode ser interessante quando mudanças no entorno, como surgimento de novos prédios ou de vegetações, entre outros aspectos, influenciam na direção dos ventos. As geometrias aerodinâmicas não apresentam interrupções ou obstáculos à circulação do ar, aumentando assim a velocidade dos ventos.

Por fim, em termos de uso dos *sheds* para extração e para captação do ar, as suas diferentes geometrias foram classificadas em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação natural (tabela 21).

Tabela 21: Desempenho da ventilação natural de *sheds* extratores e captadores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural				
Escala de desempenho dos casos	Sheds extratores de ar		Sheds captadores de ar	
	0°	45°	135°	180°
G04	G04	G04 / G02	G03
	G02	G02	G03	G04 / G02
	CR / G01 / G03	CR / G01 / G03	CR / G01	CR / G01
Melhor ← Escala desempenho p/ extração e captação do ar → Pior				

Após a análise geral dos resultados das simulações para as cinco geometrias dos *sheds*, observou-se que em alguns casos o desempenho foi bastante similar. Diante disso, para as próximas etapas da análise paramétrica, descartaram-se as G01 e G02, devido ao comportamento semelhante com o CR e com a G04, respectivamente, para todos os ângulos de incidência dos ventos externos analisados. A diferença entre esses casos não foi significativa, devido à similaridade nos formatos dos *sheds* (CR com G01 e G04 com G02). As variações dos outros parâmetros projetuais selecionados foram realizadas para as seguintes geometrias: a) CR, por ser o formato de *sheds* mais comum e por ser o modelo de comparação com todas as outras geometrias; b) G04, que apresentou um desempenho superior à G02 e por ter apresentado um comportamento satisfatório tanto como extrator quanto como captador; e c) G03, por ter a geometria mais diferenciada em relação às outras e por ter registrado o comportamento mais distinto nas análises qualitativas. A geometria em meio arco possibilita trajetórias do fluxo de ar interno distintas, o que pode exercer uma influência diferenciada nos outros parâmetros avaliados.

4.3.2 VARIAÇÃO NA DIMENSÃO DA ABERTURA DA FACHADA A1

Analisa-se aqui a influência da variação na dimensão da abertura A1⁴¹ no desempenho da ventilação natural interna, para o CR, G03 e G04 e para diferentes ângulos de incidência dos ventos externos. Os gráficos 17 e 18 apresentam as taxas de renovações de ar/hora em função do aumento da abertura A1 e a variação (%) nesses valores em relação ao caso com a menor dimensão dessa abertura (CA), respectivamente. Em seguida, apresenta-se o gráfico 19 com os valores médios de coeficientes de pressão nas aberturas de entrada e saída de ar, em função do aumento de A1.

De acordo com os resultados obtidos, o fluxo de ar interno mostrou-se dependente da dimensão da abertura A1, pois um orifício maior permite a passagem do ar com menor perda de carga localizada na entrada, devido à obstrução, resultando em um melhor aproveitamento dos ventos externos no espaço interno e em maiores taxas de renovação de ar por hora. O tamanho, a forma e a localização das aberturas no edifício são fatores determinantes na configuração do fluxo de ar nos espaços internos. Além disso, a distribuição do ar interno é influenciada pelos campos de pressão gerados pelo vento no entorno da construção e pelas pressões existentes ao redor da abertura.

De maneira geral, para todas as variações analisadas, os *sheds* funcionando como extratores de ar registraram um desempenho superior do que quando esses dispositivos funcionaram como captadores. No caso da extração, o aumento da velocidade do fluxo de ar interno foi mais significativo quando o vento incidiu perpendicularmente (0°) no edifício do que quando ele incidiu obliquamente (45°). Já para os *sheds* como captadores esse aumento foi levemente superior para o ângulo de incidência de 135°. Na maioria das situações analisadas, o incremento nas renovações de ar foi mais significativo para o CA1 (aumento em 50% na abertura) do que para o CA2 (aumento em 100%). Já nas G03 e G04 para o ângulo de 180°, esse incremento foi linear ao aumento de A1. No caso dos ventos incidindo paralelamente as aberturas (90°), o aumento de A1 não ocasionou alterações significativas no desempenho da ventilação natural no espaço interno (gráficos 17 e 18).

⁴¹ Para os *sheds* extratores e captadores A1 é a abertura de entrada e saída de ar, respectivamente.

4. Apresentação e análise dos resultados

Gráfico 17: Taxa de renovação de ar/hora em função do aumento de A1, para CR, G03 e G04, nos cinco ângulos de incidência analisados.

Gráfico 18: Variação da taxa de renovação de ar, em função de CA, para CR, G03 e G04 e para os cinco ângulos de incidência dos ventos.

Gráfico 19: Coeficientes de pressão (Cp) médios nas aberturas de entrada e saída de ar para CR, G03 e G04, em função do aumento da abertura A1, para os cinco ângulos de incidência dos ventos externos analisados.

4.3.2.1 *Sheds* extratores de ar

Para os *sheds* como extratores de ar, em todas as geometrias analisadas, as taxas de renovação aumentaram quase na mesma proporção, com exceção da G03, cujo aumento foi superior aos outros casos. No CA, G03 apresentou um desempenho similar ao CR e à medida que a abertura A1 foi sendo aumentada, foram registradas taxas significativamente superiores, apresentando um incremento de 37% e 73% para CA1 e CA2, respectivamente. No entanto, apesar desse aumento expressivo na G03, ressalta-se que G04 apresentou um desempenho superior a todos os casos analisados (gráficos 17 e 18). Isso ocorreu devido a seu formato aerodinâmico que não apresenta interrupções a circulação do ar, provocando uma maior aceleração dos ventos na região próxima aos *sheds* e, portanto, uma diferença superior nos valores de Cps entre as aberturas de entrada e saída de ar e maiores taxas de renovação no ambiente interno. Em todas as geometrias analisadas o aumento de A1 gerou valores absolutos de Cp mais elevados, o que implicou em maiores ΔC_p que indicam a possibilidade de uma maior movimentação do ar no ambiente interno (gráfico 19), uma vez que esse diferencial de pressão entre as aberturas é a força motriz para a circulação do ar.

Apesar do incremento na renovação do ar interno, nota-se que a variação de A1 não alterou significativamente a distribuição do fluxo de ar na zona de ocupação do usuário, com exceção da G03. Para essa geometria, o aumento da velocidade do ar em A1 ocasionou modificações na recirculação do ar central, apresentando uma trajetória semelhante às outras geometrias, sem registrar valores reduzidos de velocidade próximo à abertura a barlavento, conforme constatado em CA. O aumento de A1 possibilita a entrada de um maior volume de ar no ambiente interno, o que altera os valores de Cps nos *sheds*, modificando a sua trajetória interna (figura 95). Já para o ângulo de 45°, novamente teve-se um aumento da velocidade na abertura A1 (em torno de 4,0m/s), com o desvio do fluxo de ar para a lateral do espaço, o que gera uma redução nos valores de velocidade à medida que se afasta da face a barlavento. Assim, a área central manteve-se com velocidades menores (valores entre 0m/s e 0,6m/s), conforme apresentado na figura 96. Nota-se que para o CR a região central com velocidades reduzidas é maior que nos casos de G03 e G04.

Figura 95: Vetores de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 0° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.

Figura 96: Contorno de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 45° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.

4.3.2.2 Situação neutra

Em todos os casos avaliados, quando os ventos incidiram paralelamente as aberturas (90°), o aumento de A1 não ocasionou um incremento significativo nas taxas de renovação de ar/hora e nem no seu padrão de distribuição. O aumento máximo registrado nessas taxas

aumento da velocidade em A1 aumento da velocidade em A1

ar na saída mais intensa (figura 99). Maiores taxas de ventilação são obtidas quando as aberturas situadas a sotavento do edifício são maiores. **CA1 e CA2: desempenhos similares**

Figura 98: Contorno de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 135° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.

Figura 99: Vetores de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 135° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.

Já para 180° o aumento nas taxas de renovação foi quase linear, à medida que A1 foi aumentada, com exceção do CR que do CA1 para o CA2, o incremento foi insignificante (gráficos 17 e 18). Notou-se novamente o aumento da velocidade em A1 com

acréscimo da vazão na saída do ar e, portanto, na velocidade do fluxo de ar interno (figura 100). O melhor desempenho foi registrado na G03, seguido da G04. Isso ocorreu em virtude dos Cps nas aberturas, cujos valores foram superiores. Destacam-se os CA1 e CA2 da G03 que registraram os maiores ΔCps (gráfico 19).

Figura 100: Vetores de velocidade do fluxo de ar para CR, G03 e G04, para o ângulo de incidência dos ventos de 180° (a) CA, (b) CA1 e (c) CA2.

4.3.2.4 Análise geral

De maneira geral, nas simulações variando a dimensão da abertura A1, para todos os casos analisados, os *sheds* como extratores de ar apresentaram melhor desempenho do que como captadores de ar, apesar da situação de captação ter registrado maiores incrementos nas taxas de renovação de ar/hora, à medida que A1 foi aumentada. Isso ocorreu, pois, para essa situação A1 funciona como abertura de saída de ar, sendo que seu aumento exerce uma maior influência no desempenho do fluxo de ar interno.

Para os *sheds* como extratores, quando os ventos incidiram perpendicularmente às aberturas (0°), as taxas de renovação de ar/hora aumentaram linearmente à medida que A1 foi aumentada, com exceção do CR, cuja diferença entre CA1 e CA2 foi insignificante (6%), em comparação a G03 e G04. O maior incremento nas taxas de renovação ocorreu no CA2 da G03 (73%). No entanto, apesar desse aumento expressivo G04 apresentou um

desempenho superior a todos os casos analisados. Esse desempenho foi comprovado através do maior ΔC_p entre as aberturas de entrada e saída de ar, que indicam a possibilidade de uma maior movimentação do ar no espaço interno. No caso de 45°, para todas as geometrias analisadas, a variação da renovação do ar no ambiente interno entre o CA e o CA1 foi menos significativa, apresentando uma maior diferença em CA2. A tabela 22 apresenta os diferentes casos variados em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação natural, em termos de uso dos *sheds* para extração do ar.

Tabela 22: Desempenho da ventilação natural de *sheds* extratores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	Sheds extratores de ar					
	0°			45°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
CA2			
		CA2	CA1			
			CA			CA2
	CA1 / CA2	CA1		CA2	CA2	CA1 / CA
				CA1 / CA	CA1 / CA	
	CA	CA				

Na situação neutra (90°), para todos os casos analisados, o aumento de A1 não alterou significativamente as taxas de renovação e nem a distribuição do fluxo de ar interno. Isso foi comprovado pelos valores similares de C_p s nas diferentes aberturas, o que indica ΔC_p s próximos de zero e, consequentemente, uma baixa movimentação do ar no ambiente interno. Nota-se que para essa situação o aumento da abertura sem uma orientação adequada aos ventos dominantes não é um parâmetro projetual influente no desempenho da ventilação natural do edifício.

Para os *sheds* como captadores de ar o aumento de A1 ocasionou os maiores incrementos nas taxas de renovação de ar. Para o ângulo de 135° esse aumento foi mais significativo para o CA1 do que para o CA2 (88%, 77% e 68% para CR, G03 e G04, respectivamente). Quando A1 teve sua dimensão aumentada em 100% (CA2), esse incremento foi praticamente insignificante. Para 180°, o mesmo comportamento foi

registrado no CR. Já para G03 e G04 o incremento nas taxas de renovação foi proporcional ao aumento de A1. Para 135° e 180° o melhor desempenho foi registrado para G04 e G03, respectivamente, o que mostra, novamente, que G04 se destaca como uma geometria com bom desempenho tanto para extração quanto para captação do ar. A tabela 23 apresenta os diferentes casos variados em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação natural, em termos de uso dos *sheds* para captação do ar.

Tabela 23: Desempenho da ventilação natural de sheds captadores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	Sheds captadores de ar					
	135°			180°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
Melhor Pior			CA2			
			CA1		CA2	
		CA1 / CA2				
	CA1 / CA2				CA1	CA2
			CA	CA1 / CA2		CA1
		CA			CA	CA
	CA			CA		

4.3.3 VARIAÇÃO NA DIMENSÃO DAS ABERTURAS DOS *SHEDS*

Analisa-se nessa seção a influência da variação na dimensão das aberturas dos *sheds* S1, S2 e S3⁴² no desempenho do fluxo de ar interno, para os *sheds* como extratores e captadores de ar e para a situação neutra. Os gráficos 20 e 21 apresentam as taxas de renovação de ar e a variação (%) nesses valores com o aumento das aberturas dos *sheds*, em relação à dimensão menor (CA) e o gráfico 22 mostra os coeficientes de pressão (Cp) médios nas aberturas de entrada e saída de ar, em função do aumento dessas aberturas, para os cinco ângulos de incidência dos ventos externos, em cada geometria analisada.

⁴² Para os *sheds* como extratores e captadores essas são as aberturas de saída e entrada de ar, respectivamente.

Gráfico 20: Taxa de renovação/hora em função do aumento de S1, S2 e S3, para CR, G03 e G04, para os ângulos de incidência analisados.

Gráfico 21: Variação da taxa de renovação de ar, em função de CA, para CR, G03 e G04 e para os cinco ângulos de incidência dos ventos.

Gráfico 22: Coeficientes de pressão (C_p) médios nas aberturas de entrada e saída de ar para CR, G03 e G04, em função do aumento das aberturas S1, S2 e S3, para os diferentes ângulos de incidência dos ventos externos.

De maneira geral, a dimensão das aberturas dos *sheds* é um fator determinante na configuração do fluxo de ar interno, uma vez que modifica a vazão do ar que atravessa essas aberturas e, conseqüentemente, as pressões nessas regiões. Tanto os *sheds* extratores como os captadores apresentaram incrementos nas taxas de renovação de ar/hora com a modificação desse parâmetro projetual. No entanto, para a extração esse aumento foi mais significativo do que como captadores, uma vez que a dimensão das aberturas de saída apresenta uma grande influência na vazão volumétrica do edifício. Maiores taxas de renovação do ar no ambiente interno são obtidas quando as aberturas situadas a sotavento do edifício apresentam maiores dimensões. Para os ventos incidindo paralelamente as aberturas (90°), da mesma forma como ocorreu com o aumento da abertura A1, não foram registradas alterações relevantes no desempenho do fluxo de ar no ambiente interno (gráficos 20 e 21).

4.3.3.1 Sheds extratores de ar

Para os *sheds* extratores de ar, o aumento das aberturas desses dispositivos (que funcionam para a saída do ar) influenciou expressivamente na ventilação do espaço interno. À medida que essas aberturas foram sendo aumentadas, o vento que tangencia a cobertura sofreu uma aceleração mais intensa, o que provocou uma queda mais significativa nos valores de Cps nas aberturas e, conseqüentemente, a sucção do ar interior com mais força para fora do ambiente. Para todos os casos analisados, as maiores diferenças dos Cps entre as aberturas foram registrados para o CS2, indicando um maior fluxo de ar interno. Os casos CS e CS1 (aumento de 50%), na G03 e na G04, apresentaram valores de Cps bastante similares, registrando uma maior diferença no CS2 (aumento de 100%). Já no CR, notou-se uma diferença significativa nas duas variações analisadas, registrando o melhor desempenho. Isso ocorreu, pois, à medida que as aberturas foram aumentadas, aumentou-se também a inclinação dos *sheds* (14°, 21° e 27°, respectivamente), o que acelerou a velocidade do ar que tangencia a cobertura, (maior velocidade – menor pressão), intensificando a extração do ar para fora do edifício. No

entanto, ressalta-se que para CS2, o desempenho de G04 foi bastante similar ao CR. Para G03 e G04 o aumento dessas aberturas deslocou o ar para a zona de ocupação dos usuários, o que não ocorria na configuração anterior (CS), onde o fluxo era deslocado para a região frontal (gráfico 22 e figura 101). Os incrementos nas taxas de renovação dos CS1 e CS2, em relação ao CS, foram de 152% e 220%; 69% e 151%; 46% e 106% para o CR, G03 e G04, respectivamente, destacando que para o CR esses valores foram significativamente superiores (gráficos 20 e 21).

Figura 101: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 0°.

No caso de 45° também ocorreu um incremento nas taxas de renovação em função do aumento das aberturas dos *sheds*. No entanto, esse aumento foi bastante inferior ao ocorrido para o ângulo de 0°, o que pode ser notado pelos Cps que permaneceram similares (gráfico 22). Os maiores incrementos foram de 138% e 81% para a G04 e o CR, respectivamente, para o caso CS2. O pior desempenho foi registrado na G03, uma vez que

à medida que a dimensão dos *sheds* foi aumentada, a recirculação do ar com a formação de massas de ar estacionárias nas aberturas foi intensificada, o que não alterou significativamente a velocidade do ar no espaço interno (figura 102). No CS1 o incremento nas taxas, em relação ao CS, foi de apenas 4%. Já para o CS2 o incremento foi significativamente maior (28%), mas permaneceu, mesmo assim, com desempenho reduzido (gráficos 20 e 21).

Figura 102: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 45°.

4.3.3.2 Situação neutra

Quando os ventos incidiram paralelamente às aberturas (90°), notou-se que o aumento dos orifícios dos *sheds* ocasionou um acréscimo na intensidade do fluxo de ar apenas nessa região, mantendo as taxas de renovação reduzidas e sem um incremento significativo na movimentação do ar no espaço interno em CS1 e CS2 (gráficos 20 e 21). Internamente, na zona de ocupação dos usuários, nota-se uma corrente de ar estacionária, com velocidades bastante reduzidas, o que comprova que esse aumento da velocidade nas aberturas dos *sheds* não penetra no espaço interno (figura 103). Isso é reforçado, novamente, pelos valores similares de C_p s nas diferentes aberturas, o que implica em ΔC_p próximos a zero (gráfico 22).

Figura 103: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 90°.

4.3.3.3 Sheds captadores de ar

Já para os *sheds* como captadores de ar o aumento nas aberturas desses dispositivos ocasionou um leve incremento nas taxas de renovação, mas expressivamente inferior ao registrado para a extração do ar. Isso ocorreu, pois, apesar das aberturas de entrada de ar terem sofrido um aumento, a captação continuou ocorrendo apenas pelo primeiro shed, conforme registrado no caso com a dimensão menor (CS). Os *sheds* continuaram ocasionando uma grande sombra de vento sobre os dispositivos posteriores e, conseqüentemente, a extração do ar. A alteração desse parâmetro projetual isolado não proporcionou uma melhora significativa na captação do ar pela cobertura, para todas as geometrias analisadas, sendo que para isso, são necessárias outras intervenções no projeto, como veremos mais a diante.

Para o ângulo de 180°, os três casos analisados apresentaram desempenhos semelhantes, ressaltando que G03 registrou valores levemente superiores com incrementos de 25% e 52% para os casos CS1 e CS2, respectivamente. O maior incremento foi registrado para o CR com ângulo de 135° (69% e 73%, respectivamente), mas, mesmo assim, o seu

desempenho foi levemente inferior à G04. Em geral o incremento mais significativo ocorreu do caso CS para CS1 (gráficos 20 e 21). Isso foi confirmado pelos valores de Cps, que permaneceram similares nos três casos analisados (gráfico 22). Através da análise qualitativa nota-se a movimentação do ar nas aberturas dos *sheds* com maiores velocidades, mas que permaneceu na região superior do espaço, não atingindo a porção inferior. Esse efeito foi bastante evidente nos casos CS1 e CS2 de todas as geometrias analisadas e para ambos os ângulos de captação (135° e 180°) (figuras 104 e 105).

Notou-se um aumento da velocidade do ar no 1º *shed* e na região superior do espaço interno, mas na zona de ocupação dos usuários as velocidades permaneceram reduzidas. Foi registrado um desempenho levemente superior para G03, onde o fluxo de ar com maiores velocidades foi direcionado para baixo. No entanto, essa trajetória forma uma zona de sombra com velocidades reduzidas na região próxima ao *shed* captador. Já em G04, o aumento das aberturas intensificou o volume de ar que penetra no espaço, que aliado com a geometria do *shed* projeta o ar para frente, provocando a extração do ar pelos dispositivos posteriores. Esse efeito fica mais evidente à medida que aumentamos as aberturas dos *sheds*, onde se nota uma região com velocidades reduzidas no plano de ocupação do usuário (figuras 104 e 105).

Figura 104: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 135°.

Figura 105: Velocidade do ar para CR, G03 e G04 (a) CS, (b) CS1 e (c) CS2 – ângulo 180°.

4.3.3.4 Análise geral

De maneira geral, nas simulações variando a dimensão das aberturas dos *sheds*, em todas as geometrias analisadas, esses dispositivos como extratores obtiveram um melhor desempenho do que como captadores de ar. Isso ocorreu, pois, para a extração essas são as aberturas referentes à saída de ar, cujo aumento de suas dimensões incrementou significativamente a vazão volumétrica. Já para a captação, embora tenha um aumento na área das aberturas de entrada de ar, o shed a barlavento continuou fazendo sombra de vento nos dispositivos posteriores, o que ocasionou a extração do ar pela cobertura, conforme ocorria com o caso CS. Desse modo, apenas o primeiro shed continua efetivo para a captação, proporcionando correntes de ar com altas velocidades apenas na região superior do espaço, não atingindo a zona de ocupação dos usuários.

Para a extração de ar, em todas as geometrias, à medida que as aberturas dos *sheds* foram aumentadas houve um incremento significativo nas taxas de renovação, sendo que os maiores valores foram registrados no CS2. Esse aumento foi superior quando os ventos

incidiram perpendicularmente nas aberturas (para o ângulo de 0°, os incrementos nos CS1 e CS2, em relação ao CS, foram de 152% e 220%; 69% e 151%; 46% e 106% enquanto que para 45° essas porcentagens foram de 48% e 81%; 4% e 28%; 36% e 138% para o CR, G03 e G04, respectivamente). Para 0°, o melhor desempenho foi registrado no CR devido o aumento da inclinação da cobertura, que ocasionou uma aceleração mais intensa dos ventos que tangencia os *sheds*, gerando valores de Cps mais negativos nessas aberturas, o que intensifica a extração do ar. No entanto, para o CS2, a G04 apresentou um desempenho muito similar ao CR. O pior desempenho ocorreu na G03, apesar de ter sido registrado um incremento superior a G04. Para 45° o melhor desempenho foi no CS2 da G04 e o pior novamente foi na G03. A tabela 24 apresenta os diferentes casos em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação natural, em termos de uso dos *sheds* extratores de ar.

Tabela 24: Desempenho da ventilação natural de *sheds* extratores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	Sheds extratores de ar					
	0°			45°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
Melhor Pior	CS2		CS2			
	CS1	CS2				CS2
			CS1	CS2		
		CS1		CS1		CS1
			CS		CS2	
				CS	CS / CS1	CS
	CS	CS				

Como constatado nos parâmetros anteriores, novamente para o ângulo de 90°, o aumento das aberturas dos *sheds* não apresentou uma diferença significativa no desempenho da ventilação natural do edifício, em todas as geometrias analisadas. Isso, novamente, foi constatado pelos valores similares de Cps entre as aberturas de entrada e saída de ar, gerando um diferencial de pressão próximo a zero e, portanto, uma reduzida movimentação do ar nos ambientes internos do CS1 e CS2.

Para os *sheds* como captadores, notou-se que o aumento das aberturas ocasionou um leve incremento nas taxas de renovação, sendo que o comportamento dos diferentes casos foi bastante similar, destacando a G04 e o CR que foram levemente superiores para 135° e a G03 (25% e 52% para CS1 e CS2, respectivamente) e G04 (17% e 52% para CS1 e CS2, respectivamente) para 180°. A tabela 25 apresenta os diferentes casos em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação natural, em termos de uso dos *sheds* captadores de ar.

Tabela 25: Desempenho da ventilação natural de *sheds* catadores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	<i>Sheds</i> captadores de ar					
	135°			180°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
CS1 / CS2		CS1 / CS2		CS2	CS2
		CS2	CS		CS1	
				CS1 / CS2		CS1
	CS	CS / CS1		CS	CS	CS

4.3.4 VARIAÇÃO NO NÚMERO DE *SHEDS*

A influência do número de *sheds* no desempenho do fluxo de ar interno, em função de diferentes ângulos de incidência dos ventos foi analisada. Os gráficos 23 e 24 apresentam a taxa de renovação de ar e o incremento nesses valores (%), em relação a CA (3 *sheds*), respectivamente e o gráfico 25 os Cps médios nas aberturas de entrada e saída de ar, para os diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada.

De modo geral, o aumento do número de *sheds* exerceu uma influência determinante no desempenho do fluxo de ar interno, reduzindo significativamente a vazão volumétrica do edifício e, conseqüentemente, a renovação do ar no ambiente interno, tanto para os *sheds* extratores quanto para os captadores. Notou-se que essa redução foi mais intensa para os *sheds* captadores. Já na situação neutra, novamente o desempenho da ventilação se manteve praticamente inalterado com a variação desse parâmetro projetual, mantendo a movimentação interna do ar quase nula (gráficos 23 e 24).

Gráfico 23: Taxa de renovação de ar/hora em função do aumento do número de *sheds*, para diferentes ângulos de incidência analisados.

Gráfico 24: Variação (%) da taxa de renovação de ar/hora em função de CA (03 *sheds*), para diferentes ângulos de incidência dos ventos externos, em cada geometria analisada.

Gráfico 25: Coeficientes de pressão (C_p) nas aberturas de entrada e saída de ar em função do aumento do número de *sheds*, para diferentes ângulos de incidência dos ventos em cada geometria analisada

4.3.4.1 *Sheds* extratores de ar

Para os *sheds* extratores, apesar do acréscimo da área das aberturas de saída de ar, decorrente do maior número de *sheds*, notou-se uma redução na renovação do ar em todas as geometrias, sendo mais significativa para 0°. Isso aconteceu principalmente, pois, com o aumento da profundidade do edifício a velocidade do ar sofreu uma redução no ambiente interno, à medida que se afastava da face a barlavento. Notou-se também uma redução da velocidade do ar na região superior do espaço (próxima aos *sheds*), o que provocou a extração do ar de forma mais suave. Isso ocorreu, pois, os Cps nos *sheds* próximos da face a barlavento, possuem valores mais negativos (fluxo de ar com maiores velocidades) e à medida que vai se afastando dessa face, o vento que tangencia os *sheds* recola à cobertura devido ao aumento do comprimento do edifício, gerando Cps menos negativos. Com isso, os casos mais profundos (CS5 e CS7), apresentaram menores ΔCps e, assim, fluxo de ar interno com velocidades reduzidas (gráficos 23, 24 e 25 e figura 106).

Figura 106: Vetores de velocidade do ar para o CR - 0° (a) CA, (b) CS5 e (c) CS7

No caso da G03, também foi registrada uma significativa redução nas taxas de renovação de ar com o aumento do número de *sheds* (38% e 47% para os casos CS5 e CS7, respectivamente). O fluxo de ar que era direcionado para a zona de ocupação dos usuários, com o aumento da profundidade do edifício passou a ser deslocado para frente e com velocidades reduzidas, registrando uma maior extração do ar pela abertura S1, que apresentou os valores de C_{ps} mais negativos. Nota-se uma redução significativa da intensidade do fluxo de ar na região inferior do espaço (gráfico 25 e figura 107).

Figura 107: Vetores de velocidade do fluxo de ar para G03 - 0° (a) CA, (b) CS5 e (c) CS7

Na G04, notou-se uma maior redução da velocidade do fluxo de ar na parte interna próxima aos *sheds*, à medida que se aumentou o número desses dispositivos e, com isso, teve-se a redução mais significativa nas taxas de renovação (40% e 59% para CS5 e CS7, respectivamente), apresentando inclusive, para o CS7, um desempenho levemente inferior ao CR (gráficos 23 e 24). Ao contrário de CA, em que o fluxo de ar é impulsionado com maiores velocidades para a região frontal, nos casos CS5 e CS7, a corrente de ar entra nas cavidades dos *sheds*, formando uma massa de ar estacionária que perde a intensidade ao longo do caminho (figura 108). Devido a esse comportamento, os valores de Cps não obtiveram uma redução intensa e, portanto, a extração não foi intensificada (gráfico 25).

Figura 108: Vetores de velocidade do fluxo de ar para G04 - 0° (a) CA, (b) CS5 e (c) CS7

4.3.4.2 Situação neutra

Quando os ventos incidiram paralelamente as aberturas (90°), de maneira geral, o aumento do número de *sheds* manteve o fluxo de ar interno com baixas velocidades, em todas as geometrias analisadas. Apesar de terem sido registrados valores mais negativos de C_{ps} nas aberturas para o CS5 e CS7, à medida que se aumentou o número de *sheds*, eles permaneceram similares entre as aberturas de entrada e saída de ar, o que indica, novamente, ΔC_p próximos a zero e, consequentemente, reduzidas taxas de renovação de ar/hora. Do mesmo modo, é possível notar que quando os ventos não incidem diretamente nas janelas, a modificação de alguns parâmetros de projeto não proporciona alterações significativas no desempenho da ventilação natural interna (figuras 109).

Figura 109: vetores de velocidade do ar - 90° para CR, G03 e G04 (a) CA, (b) CS5 e (c) CS7

4.3.4.3 Sheds captadores de ar

Para os *sheds* captadores, embora o acréscimo do número de *sheds* tenha aumentado a quantidade de aberturas para a entrada de ar, foram registradas as maiores reduções na renovação do ar no espaço interno, em todas as geometrias. A redução mais intensa ocorreu na G03 com 83% e 84% para CS5 e CS7, respectivamente, para o ângulo de 135° e 51% e 81% para o ângulo de 180° , sendo que inclusive nos CS5 e CS7 (135°) e CS7

(180°) esses valores foram similares aos registrados para o ângulo de 90° (gráficos 23 e 24). Embora o CR também tenha registrado uma grande redução nessas taxas, apresentou um desempenho levemente superior à G03 e G04 para CS7, nos dois ângulos avaliados.

O aumento do número desses dispositivos ocasionou valores menos negativos de C_{ps} nas aberturas dos *sheds* localizados mais distantes da face a barlavento (menores ΔC_p entre as aberturas), devido o aumento da profundidade do edifício. Não se verifica o recolamento do escoamento (como na incidência de 0°) porque as arestas vivas de S3 impõe uma separação (sombra de vento) mais intensa. No caso de 135°, notou-se a similaridade entre os valores de C_{ps} nos 3 casos avaliados (gráfico 25 e figura 110).

Figura 110: Vetores de velocidade do ar para CR - 180° (a) CA, (b) CS5 e (c) CS7

Em todas as geometrias, notou-se que a entrada do ar continuou ocorrendo apenas pelo primeiro shed, sendo que o fluxo captado é extraído pelos outros, não ocorrendo um incremento do ar na zona de ocupação dos usuários. Esse efeito é intensificado nos CS5 e CS7, pelo aumento da profundidade do edifício, reduzindo ainda mais a velocidade na região afastada do shed captador. Além disso, o fluxo captado pela cobertura atingiu a mesma distância interna, independente da quantidade desses dispositivos. Isso ocorreu, pois, apesar do aumento do número de aberturas de entrada, nem todas são efetivas para a captação devido à sombra de vento gerada pelo ar que tangencia os *sheds*. Isso, aliado ao aumento da profundidade, proporciona a movimentação de ar com baixas velocidades na zona de ocupação dos usuários (figuras 110, 111 e 112).

Figura 111: Vetores de velocidade do ar para G03 - 180° (a) CA, (b) CS5 e (c) CS7

Para a situação de captação, os melhores desempenhos foram registrados na G04 (135°) e G03 (180°), com exceção do CS7, cujo CR teve o desempenho levemente superior. No entanto, ressalta-se que a diferença entre os casos foi praticamente insignificante, sendo o desempenho registrado em todas as geometrias analisadas similares. Isso reforça que parâmetros projetuais como o aumento do número de sheds e da profundidade do edifício influenciam mais no desempenho da ventilação natural nos espaços internos do que unicamente a mudança na geometria desses dispositivos. Com isso, reforçamos o impacto que as decisões projetuais ocasionam na performance do edifício.

Figura 112: Vetores de velocidade do ar para G04 - 180° (a) CA, (b) CS5 e (c) CS7

4.3.4.4 Análise geral

De modo geral, o aumento do número de sheds reduziu significativamente as taxas de renovação de ar no ambiente interno nos sheds extratores e captadores de ar, sendo que essa redução foi mais intensa no caso dos captadores. Para os sheds extratores de ar a redução mais significativa ocorreu na G04 (40% e 59% para o CS5 e CS7, respectivamente), apresentando inclusive para o CS5 e CS7 um desempenho semelhante e levemente inferior ao CR, respectivamente. G03 também apresentou uma redução significativa nessas taxas (38% e 47% para o CS5 e CS7, respectivamente), registrando o pior desempenho. Isso ocorreu pela redução da velocidade do ar nas regiões mais afastadas de A1, devido ao aumento de profundidade do edifício, com o aumento do número de sheds. Além disso, à medida que os sheds vão se afastando da face a barlavento, tem-se Cps menos negativos, o que ocasionou em CS5 e CS7 a extração mais suave do ar. A tabela 26 apresenta os casos em ordem do melhor para o pior, em relação à ventilação natural, para os sheds extratores.

Tabela 26: Desempenho da ventilação natural de sheds extratores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	Sheds extratores de ar					
	0°			45°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
Melhor Pior			CS			
						CS
				CS / CS5	CS	
				CS7		CS5 / CS7
	CS	CS				
	CS5		CS5			
					CS5 / CS7	
	CS7	CS5	CS7			
		CS7				

No caso de 90°, o aumento dos sheds não alterou a distribuição do fluxo de ar no ambiente interno e nem as taxas de renovação de ar. Embora os Cps para os casos CS5 e CS7 tenham sido mais negativos, eles permaneceram muito similares nas aberturas de entrada e saída de ar ($\Delta C_p \sim 0$).

Para os sheds captadores, foram registradas as maiores reduções na renovação do ar no espaço interno. Isso ocorreu, pois, apesar da variação desse parâmetro aumentar o número de aberturas de entrada de ar, nem todas são efetivas para a captação devido à sombra de vento gerada pelo ar que tangencia a cobertura. A entrada do ar continuou ocorrendo apenas pelo primeiro shed, o que fez com que o fluxo captado pela cobertura atingisse a mesma distância interna, não alcançando as regiões mais afastadas do captador. Isso, aliado ao aumento da profundidade do edifício e aos valores de Cps menos negativos nas aberturas dos dispositivos localizados mais afastados da face a barlavento, (menores ΔC_p), contribuíram para a redução da velocidade do ar interno.

A redução mais intensa ocorreu na G03 com 83% e 84% para CS5 e CS7, respectivamente, quando o ângulo foi de 135° e 51% e 81% quando o ângulo foi de 180°, registrando inclusive taxas semelhantes às registradas para o ângulo de 90°. Os melhores desempenhos foram registrados na G04 (135°) e G03 (180°), com exceção do CS7, cujo CR teve o desempenho levemente superior. No entanto, ressalta-se que os desempenhos registrados em todas as geometrias analisadas foram similares. Isso reforça a importância de conhecer o impacto das estratégias projetuais, uma vez que parâmetros como o aumento do número de *sheds* e da profundidade do edifício influenciam mais na ventilação natural nos espaços internos do que unicamente a mudança na geometria dos *sheds*. A tabela 27 apresenta os diferentes casos em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação natural, em termos de uso dos *sheds* captadores de ar.

Tabela 27: Desempenho da ventilação natural de *sheds* captadores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	Sheds captadores de ar					
	135°			180°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
<p>Melhor</p> <p>Pior</p>			CS			
		CS			CS	CS
	CS			CS		
					CS5	CS5
	CS5		CS5	CS5/CS7		
	CS7	CS5/CS7	CS7		CS7	CS7

4.3.5 VARIAÇÃO NA DISTÂNCIA ENTRE OS SHEDS ALTERANDO A ÁREA TOTAL DAS ABERTURAS NA COBERTURA

Analisa-se nessa seção a influência da variação da distância entre os sheds no desempenho do fluxo de ar interno, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada. Os gráficos 27 e 28 apresentam a taxa de renovação de ar/hora e a variação (%) nesses valores com o aumento da distância entre os *sheds*, em relação ao caso com a distância padrão de 2,50m (CS7), respectivamente e o gráfico 29 os Cps médios nas aberturas de entrada e saída de ar, para os cinco ângulos de incidência dos ventos externos.

4.3.5.1 *Sheds extratores de ar*

De maneira geral, para os *sheds* extratores de ar, o aumento da distância entre esses dispositivos reduziu a área total das aberturas de saída de ar, o que diminuiu significativamente a vazão volumétrica do edifício e, conseqüentemente, as taxas de renovação de ar/hora (gráficos 26 e 27). Nota-se que quando esses dispositivos estão localizados mais próximos uns dos outros (CS7) os *sheds* a barlavento exercem uma maior influência sobre os dispositivos localizados na zona posterior (sotavento), o que ocasionou a formação de massas estacionárias de ar com zonas de recirculação nas aberturas dos *sheds*. À medida que a distância foi aumentada, essas recirculações de ar nas aberturas foram reduzidas, sendo que para a distância de 15m (CS11) esse efeito foi praticamente extinto (figuras 113, 114 e 115).

Isso também ocorre, pois, o acréscimo da distância entre os *sheds*, aumentou o comprimento dos trechos de deslocamento horizontal que o ar percorre sob a cobertura até atingir uma abertura. Com isso, a corrente de ar tem uma perda da sua velocidade, pois, é obrigado a se deslocar na horizontal em busca de uma saída. Isso pode ser minimizada quando essa distância a ser percorrida pelo ar sob o telhado, até ser extraído, é reduzida, assegurando fluxos de ar com maior velocidade e, portanto, uma ventilação no espaço interno mais eficiente (figuras 113, 114 e 115).

Gráfico 26: Taxa de renovação de ar/hora em função do aumento da distância entre os sheds, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada.

Gráfico 27: Variação (%) da taxa de renovação de ar/hora em função do aumento da distância entre sheds, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada.

Gráfico 28: Coeficientes de pressão médio (C_p) nas aberturas de entrada e saída de ar em função do aumento da distância entre os *sheds* para diferentes ângulos de incidência dos ventos externos, em cada geometria analisada.

Figura 113: Vetores de velocidade no CR, em função da variação da distância entre os *sheds* (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d) CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 0°

Figura 114: Vetores de velocidade na G03, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d) CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 0°

Figura 115: Vetores de velocidade na G04, em função da variação da distância entre os *sheds* (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d) CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 0°

Essa redução no desempenho da ventilação natural no espaço interno para os *sheds* extratores foi confirmada pelos Cps, cujos valores nas aberturas dos *sheds* mais próximos da face a barlavento, possuem valores mais negativos, em virtude do fluxo de ar que tangencia os primeiro *sheds* com maiores velocidades. À medida que a distância foi aumentada, o vento incide na cobertura com uma redução na velocidade que ocasiona Cps menos negativos nos *sheds* mais afastados da face a barlavento (menores ΔCps) e, portanto, um fluxo de ar interno com menores velocidades (gráficos 26, 27 e 28).

A redução na renovação do ar interno foi mais significativa para 45° do que para 0° e o melhor desempenho foi registrado na G04. No entanto, para a situação de 45°, as diferentes geometrias apresentaram desempenhos similares. Nota-se que a redução das aberturas de saída de ar é um parâmetro que exerce uma grande influência na ventilação natural através de *sheds* extratores de ar e que quanto menores elas foram, menor o fluxo de ar interno (gráficos 26 e 27).

4.3.5.2 Situação neutra

Quando o edifício foi implantado com as aberturas paralelas aos ventos dominantes (90°), apesar do aumento da distância ter ocasionado uma leve modificação no fluxo de ar na região dos *sheds*, tanto na renovação do ar interno, quanto na distribuição do fluxo de ar interno não foram registradas alterações significativas (figura 116). A menor variação nas taxas de renovação foi de 0%, ou seja, os desempenhos foram exatamente iguais, atingindo um máximo de 6%. No entanto, ressalta-se novamente que como esses valores são baixos, essa porcentagem não corresponde a uma diferença significativa entre os casos. Além disso, embora tenham ocorrido alterações nos Cps entre os diferentes casos, os valores entre as aberturas de entrada e saída de ar foram similares, o que implica em ΔCp próximos a zero, comprovando a reduzida renovação do ar no ambiente interno (gráfico 28).

Figura 116: Vetores de velocidade no CR, em função da variação da distância entre os *sheds* (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d) CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 90°

4.3.5.3 *Sheds* captadores de ar

Já para a situação de captação o aumento da distância entre os *sheds* ocasionou um leve incremento nas taxas de renovação de ar. Quando a distância foi aumentada para 3,75m (CS8), esse aumento não foi muito significativo (3%, 4% e 8% em 135° e 2%, 3% e 2% em 180° para os CR, G03 e G04, respectivamente) sendo registradas taxas similares para todas as geometrias. Quando a distância passa a ser de 5,00m (CS9) um comportamento similar foi notado, com exceção da G04 para 135°, cujo incremento foi de 73%. Já para CS10 notou-se um aumento mais significativo e quando a distância é duplicada (CS11) tem-se o melhor desempenho, destacando que para 135°, esse incremento foi menor, mostrando uma estabilização na ventilação interna a partir de uma determinada distância (gráficos 27 e 28).

Esse incremento ocorreu, pois, apesar do aumento da distância ter reduzido o número das aberturas de entrada de ar, os espaços maiores entre os *sheds* possibilitaram uma recuperação da velocidade do vento no nível da cobertura, permitindo a captação pelos *sheds* posteriores. No caso com menor distância (CS7) tem-se 07 aberturas para a entrada do ar, com uma área total de 21,875m², ao contrário do caso cuja distância é 15m (CS11), onde se tem apenas 02 aberturas de captação, com uma área total de 6,25m². No entanto, no CS7 a captação do ar ocorreu apenas pelo primeiro dispositivo, pois a sombra de vento gerada nos *sheds* posteriores, pelo ar que tangencia a cobertura, ocasionou uma queda de pressão (Cps -) que proporciona a extração do ar (figuras 117, 118 e 119).

Já no CS11 isso não foi registrado, sendo a captação realizada pelas duas aberturas. Nesse caso, os Cps nas aberturas tornaram-se menos negativos, com uma forte tendência dos valores ficarem positivos à medida que a distância foi aumentada. Com isso, as aberturas se tornaram mais efetivas para a captação, evitando a extração da corrente de ar pelos *sheds* localizados na zona posterior ao primeiro dispositivo captador, conforme ocorria com CS7. Com o afastamento entre os *sheds* a zona de escoamento separado é menos intensa, uma vez que a curvatura das linhas de corrente é menos pronunciada e, conseqüentemente, a pressão não sofre uma grande redução (figuras 117, 118 e 119).

Figura 117: Vetores de velocidade no CR, em função da variação da distância entre os *sheds* (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d) CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 180°

Figura 118: Vetores de velocidade na G03, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d) CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 180°

Figura 119: Vetores de velocidade no G04, em função da variação da distância entre os sheds (a) CS7; (b) CS8; (c) CS9; (d) CS10 e (e) CS11 - ângulo de incidência de 180°

Nessas situações, a G03 foi a que apresentou o pior desempenho, sendo inclusive inferior ao CR. Tanto para o CR quanto para a G04, à medida que aumentamos a distância entre esses dispositivos, nota-se que a recirculação do ar também aumentou e o fluxo de ar com maiores velocidades captado pelo shed a barlavento atingiu uma região maior do espaço interno. Isso ocorreu em função das geometrias dos *sheds* e o aumento da distância que possibilitou uma parte reta na cobertura, que direcionou o fluxo de ar para a região mais afastada do *shed* captador (figuras 117 e 119). No entanto, isso não ocorreu para a G03, cujo formato em meio arco direcionou o fluxo de ar captado para baixo, independente da distância entre os *sheds*. Assim, o fluxo de ar atinge a mesma região interna e isso ocasionou velocidades reduzidas nas regiões mais afastadas do *shed* captador, formando zonas de calmaria no espaço interno (figura 118).

4.3.5.4 Análise geral

De maneira geral, para os *sheds* extratores, o aumento da distância entre esses dispositivos reduziu significativamente as taxas de renovação, para todas as geometrias. Isso ocorreu principalmente pela redução da área total de saída de ar, que apresenta uma influência significativa na vazão volumétrica do edifício e, portanto, na velocidade do fluxo de ar interno. Além disso, o acréscimo da distância entre os *sheds* aumentou o tamanho dos trechos de deslocamento horizontal que o ar percorre sob a cobertura até atingir uma abertura, o que provocou uma perda da sua velocidade. Isso foi comprovado pelos ΔCps entre as aberturas, cujos maiores valores foram registrados para o CS7, quando os *sheds* estão mais próximos. À medida que a distância foi aumentada, o vento incide na cobertura com menores velocidades, o que ocasiona Cps menos negativos nos *sheds* mais afastados da face a barlavento, o que gera menores ΔCps e um fluxo de ar interno com velocidades reduzidas. Essa redução foi maior para 45° do que para 0°, sendo o melhor desempenho registrado na G04. Para o ângulo de 45° as diferentes geometrias apresentaram desempenhos similares. A tabela 28 apresenta os casos em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação, para o uso dos *sheds* extratores de ar.

Tabela 28: Desempenho da ventilação natural de *sheds* extratores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	<i>Sheds</i> extratores de ar					
	0°			45°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
<p>Melhor</p> <p>Pior</p>				CS7		CS7
				CS8		CS8
					CS7	CS9
					CS9	
	CS7		CS7/CS8/CS9			CS10
			CS10	CS10	CS10	
	CS8 / CS9	CS7/CS8/CS9				
	CS10	CS10				
			CS11			
	CS11	CS11		CS11	CS11	CS11

Novamente, quando os ventos incidiram a 90°, tem-se o pior desempenho da ventilação natural do edifício. Além disso, o aumento da distância entre os *sheds* não ocasionou uma influência significativa nas taxas de renovação de ar do ambiente interno.

Já para os *sheds* como captadores notou-se um leve incremento no fluxo de ar interno, em todas as geometrias analisadas. Para o CS8, esse aumento não foi muito significativo (incremento de 3%, 4% e 8% no ângulo de 135° e 2%, 3% e 2% em 180° para os CR, G03 e G04, respectivamente). Já no CS11 registrou-se o maior incremento (26%, 82% e 66% em 180° e 12%, 48% e 113% em 135° para os CR, G03 e G04, respectivamente).

Esse leve incremento ocorreu, pois, apesar do aumento da distância ter reduzido o número das aberturas de entrada de ar, possibilitou uma recuperação da velocidade do vento no nível da cobertura e, portanto, a zona de escoamento separado foi menos intensa, o que não provocou uma maior redução na pressão. Assim, os valores de C_p nas aberturas dos *sheds* mais afastados da face a barlavento são menos negativos (com uma tendência para valores positivos) tornando os *sheds* posteriores mais efetivos para a captação do ar. Nessas situações, a G03 teve o pior desempenho, devido à geometria em meio arco, cujo fluxo de ar captado foi direcionado para baixo, e independente da distância entre os *sheds*, ele atingiu a mesma porção interna, ocasionando velocidades

reduzidas nas regiões afastadas do *shed* captador. A tabela 29 apresenta os casos em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação, em termos de uso dos *sheds* captadores de ar.

Tabela 29: Desempenho da ventilação natural de *sheds* captadores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	Sheds captadores de ar					
	135°			180°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
				CS10/CS11		CS11
			CS10/CS11	CS7/CS8/CS9	CS11	CS10
	CS7/CS8/CS9 / CS10/CS11	CS10/CS11	CS9		CS10	CS7/CS8/CS9
		CS8/CS7/CS9	CS8/CS7		CS7/CS8/CS9	

4.3.6 VARIAÇÃO NA DISTÂNCIA ENTRE OS *SHEDS* MANTENDO A ÁREA TOTAL DAS ABERTURAS NA COBERTURA

Analisa-se nessa seção a influência da variação na distância entre os *sheds* no desempenho da ventilação natural. No entanto, ao contrário da seção anterior, a área total de suas aberturas foi mantida constante. Como o aumento da distância reduz o número de *sheds* e, conseqüentemente, a área total dessas aberturas, aumentaram-se as suas alturas de forma que todos os casos possuem essa área igual. Três casos foram analisados: CS7 (7 *sheds* distantes em 2,50m, com aberturas de 0,625m de altura, totalizando 21,875m²); CS12 (4 *sheds* distantes em 5m, com aberturas de 1,09375m de altura, totalizando 21,875m²) e CS13 (3 *sheds* distantes em 7,50m, com aberturas de 1,4583m de altura, totalizando 21,875m²).

Os gráficos 29 e 30 apresentam a taxa de renovação de ar e a variação (%) nesses valores com a alteração da distância e da altura das aberturas dos *sheds*, em relação ao CS7, respectivamente e o gráfico 31 apresenta os Cps médios nas aberturas de entrada e saída de ar, para os diferentes ângulos de incidência dos ventos em cada caso analisado.

Gráfico 29: Taxa de renovação de ar/hora em função da alteração da distância e da altura das aberturas dos sheds, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada.

Gráfico 30: Variação (%) da taxa de renovação de ar/hora em função da alteração da distância e da altura das aberturas dos sheds, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada.

Gráfico 31: Coeficientes de pressão médios (C_p) nas aberturas de entrada e saída de ar em função do aumento da distância entre os *sheds* mantendo a área total das aberturas desses dispositivos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada.

4.3.6.1 Sheds extratores de ar

De modo geral, para os *sheds* como extratores de ar, à medida que se aumentou a distância entre esses dispositivos, mantendo a área total de suas aberturas iguais (saída de ar), ocorreu um incremento nas taxas de renovação de ar/hora, sendo mais significativo para o ângulo de 0° do que para 45°, em todas as geometrias estudadas. Isso ocorreu, pois, embora o número de aberturas tenha sido reduzido, para manter igual a área total dos *sheds*, houve um aumento da altura dessas aberturas, o que fez com que a corrente de ar tangenciasse a cobertura com maiores velocidades, gerando uma queda de pressão mais intensa nos orifícios dos *sheds* (maior velocidade – menor pressão). Assim, os valores de Cps nesses dispositivos dos CS12 e CS13 foram mais negativos, o que indica maiores ΔC_p e, conseqüentemente, um maior fluxo interno do ar. Esse efeito foi intensificado no CR, em virtude do aumento da inclinação desses dispositivos (14° para CS7, 24° para CS12 e 30° para CS13), conforme apresentado nos gráficos 29, 30 e 31.

Notou-se que com os *sheds* dispostos mais próximos um dos outros (CS7), as massas estacionárias de ar nas aberturas dos *sheds* são mais evidentes, sendo que à medida que a distância entre eles e as aberturas foram aumentadas, a recirculação de ar nesses dispositivos diminuiu. Esse efeito, em conjunto com a maior velocidade do ar que tangencia a cobertura e com a maior queda da pressão nas aberturas, provoca a extração do ar com maior força (figura 120). Além disso, da mesma forma como registrado na análise anterior, o acréscimo do comprimento dos trechos de deslocamento horizontal que o ar percorre sob a cobertura até atingir uma abertura para a saída de ar, propicia a perda expressiva da sua velocidade. No entanto, para esses casos o aumento das alturas das aberturas dos *sheds* ocasionou alterações nos Cps que impulsionou o ar para fora do edifício com maior força, incrementando o fluxo de ar no ambiente interno. Apesar do maior acréscimo nas taxas de renovação ter sido registrado em G03 (90% e 173%), o melhor desempenho foi constatado novamente em G04, para ambos os ângulos. As geometrias G03 e CR tiveram um desempenho bastante similar, principalmente em 0°.

Figura 120: Vetores velocidade do ar para 0° (a) CS7, (b) CS12 e (c) CS13 para o CR, G03 e G04

4.3.6.2 Situação neutra

Novamente para 90°, essas alterações projetuais ocasionaram o aumento da velocidade do ar nos *sheds*, mas internamente as velocidades permaneceram reduzidas e não foi registrado um incremento significativo nas taxas de renovação de ar/hora. Além disso, os valores de Cps nas aberturas foram muito similares, com ΔCps próximo a zero, o que indica uma movimentação interna do ar praticamente nula (figura 121).

Figura 121: Velocidade do ar para 90° (a) CS7, (b) CS12 e (c) CS13 para o CR, G03 e G04

4.3.6.3 Sheds captadores de ar

Na situação de captação do ar, à medida que se aumentou a distância entre os *sheds*, mantendo a área total de suas aberturas iguais (saída de ar), ocorreu um leve incremento nas taxas de renovação de ar/hora. No entanto, os valores registrados para essas taxas foram expressivamente reduzidas em comparação aos *sheds* extratores de ar (gráficos 29 e 30). Apesar das porcentagens de incremento terem sido elevadas (de 216% e 217% para G03 e G04, respectivamente, para 135°), ressalta-se que como essas taxas são

reduzidas, esse incremento não indica um grande aumento nos valores absolutos da renovação do ar. Isso ocorreu, pois, apesar das aberturas de entrada de ar terem sido aumentadas, o que poderia ocasionar a captação de uma maior quantidade de ar pela cobertura, os *sheds* dispostos na mesma altura continuaram sofrendo a influência do dispositivo que se localiza na região frontal (barlavento). Dessa forma, os *sheds* localizados na região de sombra de vento possuem Cps negativos e, portanto, tem-se a saída no lugar da entrada de ar.

À medida que a distância foi aumentada, notaram-se valores de Cp nas aberturas levemente mais negativos, o que indica maiores ΔC_p (gráfico 31). Com o afastamento entre os *sheds* e o aumento da altura de suas aberturas a zona de escoamento separado foi mais intensa, ocasionando a recirculação do ar com maiores velocidades e, consequentemente, uma maior redução nos valores de pressão nas aberturas (figura 122). No entanto, ressalta-se que essa diferença não foi muito elevada, o que realmente indica um menor incremento da renovação do ar interno do que para os *sheds* extratores de ar.

Além disso, conforme constatado na seção anterior, tanto para o CR quanto para a G04, à medida que aumentamos a distância entre esses dispositivos, nota-se que a recirculação do ar também aumentou e o fluxo de ar com maiores velocidades captado pelo shed a barlavento atinge uma região maior do espaço interno. Isso ocorreu em função das geometrias dos *sheds* e o aumento da distância que possibilitou uma parte reta na cobertura, que direcionou o fluxo de ar para a região mais afastada do *shed* captador. No entanto, como o fluxo não é direcionado para a região inferior do espaço, nota-se que a corrente de ar que é captada com altas velocidades não atinge essa região com a mesma intensidade, sofrendo uma redução ao longo do percurso. Já no caso de G03, a sua geometria em meio arco direcionou o fluxo de ar para baixo, atingindo a mesma profundidade do espaço interno, independente da distância entre os *sheds*. No entanto, ao contrário da seção anterior, o aumento das aberturas dos *sheds* ocasionou maiores velocidades na zona de ocupação dos usuários (figura 122). Todas as geometrias analisadas apresentaram desempenhos similares entre si.

Figura 122: Vetores velocidade para 180° (a) CB, (b) C01 e (c) C02 para o CR, G03 e G04

4.3.6.4 Análise geral

De modo geral, quando os *sheds* funcionaram como extratores de ar, à medida que se aumentou a distância entre esses dispositivos, mantendo a área total de suas aberturas iguais (saída de ar), ocorreu um incremento nas taxas de renovação de ar. Isso ocorreu, principalmente, pois, para manter a área total das aberturas dos *sheds* igual, houve um aumento da altura desses orifícios, em todos os casos, o que fez com que a corrente de ar tangenciasse o primeiro shed com maiores velocidades, gerando uma queda de pressão mais intensa nas aberturas (Cps mais negativos). Esse efeito foi intensificado no CR, em virtude do aumento da inclinação desses dispositivos. Além disso, com os *sheds* dispostos mais próximos um dos outros (CS7), tem-se massas estacionárias de ar nas aberturas desses dispositivos, em que à medida que a distância entre eles e a altura das aberturas foram aumentadas elas foram reduzidas, auxiliando a saída do ar pela cobertura com maiores velocidades. Apesar do maior incremento nas taxas de renovação ter sido registrado em G03 (90% e 173%, respectivamente), o melhor desempenho foi constatado em G04. A tabela 30 apresenta os diferentes casos em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação natural, em termos de uso dos *sheds* extratores de ar.

Tabela 30: Desempenho da ventilação natural de *sheds* extratores de ar

Nível de desempenho com relação a ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	Sheds extratores de ar					
	0°			45°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
Melhor Pior			CS13		CS13	CS13
					CS13	
	CS13	CS13		CS13	CS12	CS12
				CS12		
			CS12			
	CS12	CS12		CS7		CS7
					CS7	
	CS7		CS7			
		CS7				

Quando os ventos incidiram no edifício a 90°, apesar do aumento da distância entre os *sheds* e de suas aberturas terem incrementado a velocidade do ar nesses dispositivos, o

desempenho da ventilação natural no espaço interno não foi alterado. Novamente, os valores de Cps entre as aberturas de entrada e saída foram similares, o que indica uma movimentação interna do ar praticamente nula.

Quando os *sheds* funcionaram como captadores de ar, à medida que se aumentou a distância entre os *sheds*, mantendo a área total de suas aberturas iguais (saída de ar), ocorreu um leve incremento nas taxas de renovação, sendo que os valores registrados para essas taxas foram expressivamente reduzidas em comparação aos *sheds* extratores de ar. Isso ocorreu, principalmente, pois, apesar das aberturas de entrada de ar terem sido aumentadas, os *sheds* dispostos na mesma altura continuaram sofrendo a influência da sombra de vento gerada pelo primeiro dispositivo à barlavento, o que ocasionou Cps negativos nas aberturas dos *sheds* localizados posteriormente (sotavento) e, conseqüentemente a extração de ar.

Com o afastamento entre os *sheds* e o aumento da altura de suas aberturas, a região de escoamento separado foi mais intensa, ocasionando zonas de recirculação com maiores velocidades do ar e, conseqüentemente, uma maior redução nos valores de pressão nas aberturas. Apesar de ter sido registrado um incremento mais significativo nas taxas de renovação nos casos de G03 e G04, todas as geometrias apresentaram desempenhos similares entre si. A tabela 31 apresenta os casos em ordem do melhor para o pior desempenho, em relação à ventilação, em termos de uso dos *sheds* captadores de ar.

Tabela 31: Desempenho da ventilação natural de *sheds* captadores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	Sheds captadores de ar					
	135°			180°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
Melhor	CS13	CS13	CS13	CS13	CS13	CS13
		CS12	CS12	CS12	CS12	CS12
	CS12			CS7		
	CS7				CS7	
		CS7	CS7			CS7
Pior						

4.3.7 VARIAÇÃO NA DISTÂNCIA E NO ALINHAMENTO ENTRE OS *SHEDS*

Analisa-se nessa seção a influência da variação da distância e do alinhamento entre os *sheds* no desempenho do fluxo de ar no espaço interno, em função dos diferentes ângulos de incidência dos ventos externos. Os gráficos 32 e 33 apresentam a taxa de renovação de ar/hora e a variação (%) nesses valores com a alteração no alinhamento e com o aumento da distância entre os *sheds*, em relação ao CS7, respectivamente e o gráfico 34 apresenta os coeficientes de pressão (Cps) médios nas aberturas de entrada e saída de ar, para os diferentes ângulos de incidência dos ventos externos, em cada geometria analisada.

De modo geral, para todas as geometrias estudadas a alteração no alinhamento dos *sheds*, juntamente com a distância entre esses dispositivos, exerceu uma influência significativa na configuração e na velocidade do fluxo de ar interno, uma vez que modificou a área das aberturas dos *sheds*, o percurso das correntes de ar na cobertura e, conseqüentemente, os valores de Cps nas aberturas dos *sheds*. Para esses dispositivos como extratores de ar (0° e 45°), o desalinhamento e o aumento da distância entre os *sheds*, devido à redução da área das aberturas de saída de ar, diminuiu significativamente a renovação do ar no ambiente interno. Essa redução foi mais intensa quando os ventos incidiram perpendicularmente nas aberturas (0°) do que obliquamente (45°). Novamente quando os ventos incidiram paralelamente as aberturas (90°), não foram registradas alterações significativas no desempenho do fluxo de ar interno, registrando em todos os casos uma movimentação interna do ar bastante reduzida. Já quando os *sheds* funcionaram como captadores de ar (135° e 180°), o desalinhamento desses dispositivos e o aumento da distância entre eles ocasionou uma melhora no desempenho da ventilação natural no espaço interno. O incremento nas taxas de renovação de ar/hora foi levemente superior quando os ventos incidiram perpendicularmente nas aberturas (180°), conforme apresentado nos gráficos 32 e 33.

Gráfico 32: Taxa de renovação de ar/hora em função do alinhamento dos *sheds* e do aumento da distância entre esses dispositivos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada

Gráfico 33: Variação (%) nas taxas de renovação de ar/hora em função do alinhamento dos *sheds* e do aumento da distância entre esses dispositivos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, em cada geometria analisada

Gráfico 34: Coeficientes de pressão (C_p) nas aberturas de entrada e saída de ar para o CS7, CAD1, CAD2, CAD3 e CAD4, para diferentes ângulos de incidência dos ventos externos analisados, em cada geometria analisada

4.3.7.1 Sheds extratores de ar

Para o CS7 e o CAD1 de todas as geometrias analisadas, nota-se claramente um fluxo de ar perpendicular aos *sheds* e com altas velocidades no shed mais próximo a face barlavento. Posteriormente, ao longo do edifício, as velocidades são reduzidas com a formação de vórtices na região a sotavento do primeiro *shed*, devido à sombra de vento gerada pela corrente de ar que tangencia a cobertura. No entanto, para a G03 e G04, foram registradas zonas de recirculação de ar com maiores velocidades em função da geometria aerodinâmica dos *sheds*, que não apresentam interrupções à circulação do ar, aumentando assim a velocidade dos ventos e possibilitando um melhor desempenho da ventilação, em relação ao CR (figuras 123, 124, 125).

No CAD2, tem-se um maior desvio da corrente de ar entre os *sheds* e com maiores velocidades, em função das diferenças de pressão ocasionadas pelo desalinhamento desses dispositivos. No entanto, nas aberturas dos *sheds* tem-se o registro de reduzida passagem da corrente de ar, o que indica a queda nas taxas de renovação e a baixa extração do ar pela cobertura. Embora esse desvio do fluxo que incide na cobertura tenha ocorrido de forma mais intensa na G03 e G04, nota-se essa mesma redução nas aberturas dos *sheds*, diminuindo o desempenho da ventilação natural no ambiente interno (figuras 123, 124 e 125).

Essa redução foi mais significativa para o CAD3, que apresenta a maior redução nas áreas das aberturas dos *sheds* e Cps menos negativos (menores ΔC_p) e, portanto, é a situação menos favorável para a ventilação natural. Isso ocorreu pelo desvio da corrente de ar com menores velocidades, devido ao maior distanciamento entre os *sheds*, propiciando bolhas de separação menos intensas e, portanto, uma velocidade reduzida do ar nas aberturas. Além disso, ressalta-se a similaridade nas taxas de renovação para o CAD2 e para o CAD4, que apesar da configuração da cobertura ser bastante diferente, as áreas das aberturas de saída de ar são iguais e, além disso, os valores de C_p são similares (gráficos 32 e 33 e figuras 123, 124 e 125). Isso ressalta novamente a importância das dimensões das aberturas de saída (*sheds*) para a extração do ar pela cobertura.

Figura 123: Vetores de velocidade no ponto médio das aberturas dos sheds para o caso de referência, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 0°

Figura 124: Vetores de velocidade no ponto médio das aberturas dos *sheds* para a geometria três, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 0°

Figura 125: Vetores de velocidade no ponto médio das aberturas dos *sheds* para a geometria quatro, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 0°

Esse efeito é reforçado pelos Cps nas aberturas dos *sheds*, onde à medida que aumentamos a distância entre os dispositivos intercalados, tem-se uma redução nos seus valores absolutos (mais próximo de valores positivos), o que diminui os ΔC_p . Isso acontece, como mencionado anteriormente, pela formação de bolhas de separação menos intensas e, portanto, uma menor velocidade do ar nas aberturas com reduzida extração do ar pela cobertura. Além disso, a área de sucção do ar é menor, o que também reduz a vazão de saída do ar. Calculando a vazão mássica do sistema pela relação dos Cps com as áreas das aberturas de entrada e saída de ar do edifício, comprova-se a redução desses valores, em função da diminuição das áreas das aberturas de saída. Nota-se que a porcentagem de redução da vazão é proporcional à redução das áreas dos *sheds*, comprovando, a influência da dimensão dessas aberturas para *sheds* como extratores de ar (tabela 32).

Tabela 32: Vazão mássica em função das áreas das aberturas e dos Cps

Casos		Sheds extratores de ar	
		0°	45°
CR	CS7	12,53	28,22
	CAD1	6,42 (↓49%)	11,91 (↓58%)
	CAD2	3,36 (↓73%)	6,56 (↓77%)
	CAD3	2,49 (↓80%)	2,67 (↓90%)
	CAD4	3,30 (↓74%)	5,86 (↓79%)
G03	CS7	15,03	28,77
	CAD1	6,57 (↓56%)	11,68 (↓59%)
	CAD2	3,84 (↓74%)	6,81 (↓76%)
	CAD3	3,23 (↓78%)	4,33 (↓85%)
	CAD4	4,82 (↓68%)	6,57 (↓77%)
G04	CS7	14,90	12,34
	CAD1	6,39 (↓57%)	7,04 (↓43%)
	CAD2	2,81 (↓80%)	4,08 (↓67%)
	CAD3	1,67 (↓88%)	2,73 (↓78%)
	CAD4	3,90 (↓73%)	4,15 (↓66%)

4.3.7.2 Situação neutra

Para 90°, apesar da alteração do alinhamento dos *sheds* ocasionarem diferenças de pressão que alteraram a trajetória e a intensidade do fluxo de ar na cobertura e, portanto, nas aberturas, novamente o desempenho da ventilação natural não apresentou alteração significativa. Essa configuração gerou alterações nos Cps nas aberturas, mas novamente os valores similares implicam em ΔC_p próximos a zero, comprovando o reduzido fluxo de ar interno (figuras 126, 127 e 128).

Figura 126: Vetores de velocidade no ponto médio das aberturas dos sheds para o caso de referência, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 90°

Figura 127: Vetores de velocidade no ponto médio das aberturas dos *sheds* para a geometria três, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 90°

Figura 128: Vetores de velocidade no ponto médio das aberturas dos sheds para a geometria quatro, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 90°

4.3.7.3 Sheds captadores de ar

Para os *sheds* captadores, à medida que alteramos o alinhamento e aumentamos a distância entre esses dispositivos, tem-se uma melhora na captação do ar pela cobertura, aumentando as taxas de renovação. O pior e o melhor desempenho foram registrados no CS7 e no CAD3, respectivamente, para todas as geometrias analisadas. O CS7 tem a maior área total de aberturas para a entrada de ar. No entanto, nota-se claramente que apenas o primeiro shed é efetivo para a captação. Isso ocorre, pois, os *sheds* desenhados em fileiras e distantes entre si em 2,50m projetam uma sombra de vento sob os dispositivos posteriores, no sentido oposto à direção do vento principal, desviando o ar das aberturas. Assim, têm-se zonas de recirculação do ar com valores negativos de C_p nas janelas posteriores que ocasionam a extração de ar. À medida que vai se afastando da região a barlavento, a sombra de vento vai aumentando e os *sheds* se tornam menos efetivos para a captação.

Com o desalinhamento dos *sheds* e o aumento da distância entre eles, apesar da redução das aberturas na cobertura (entrada de ar), elas se tornam mais efetivas para a captação, registrando uma melhora significativa na ventilação natural. A disposição sinuosa dos *sheds* aproveita os ventos que seriam desviados, direcionando o ar para as aberturas dos *sheds* localizados posteriormente. Já o aumento da distância reduz a sombra de vento, comprovado pelos C_p s, cujos valores registrados no CAD2 e CAD3 foram positivos para todos os *sheds* (gráfico 34). Isso é registrado através da direção dos vetores de velocidade, que indicam a entrada de ar por todos os dispositivos na cobertura. No CAD1, embora os *sheds* tenham sido desalinhados, a distância entre eles foi mantida em 2,50m, o que ocasionou vórtices nas regiões entre os *sheds* e, consequentemente, valores negativos de C_p nas aberturas (figuras 129, 130 e 131).

Já no CAD4, percebemos uma redução na renovação do ar devido a disposição dos *sheds* em 3 fileiras, criando regiões de recirculação com velocidades reduzidas e alterações na pressão (C_p s -), diminuindo a captação por esses dispositivos mais afastados da região a barlavento. No entanto, apesar desse comportamento, seu desempenho foi superior ao CS7, mostrando uma renovação do ar mais efetiva do que com os *sheds* alinhados (figuras 129, 130 e 131).

Figura 129: Vetores de velocidade no ponto médio das aberturas dos sheds para o caso de referência, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 180°

Figura 130: Vetores de velocidade no ponto médio das aberturas dos sheds para a geometria três, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 180°

Figura 131: Vetores de velocidade no ponto médio das aberturas dos sheds para a geometria quatro, para o ângulo de incidência dos ventos externos de 0°

Por fim, ressalta-se que nos *sheds* captadores, as áreas e a quantidade das aberturas de entrada de ar são importantes juntamente com outros parâmetros, como o alinhamento e a distância entre os *sheds*. Essas diferentes configurações influenciam nas sombras de vento, nos Cps e, conseqüentemente, na efetividade das aberturas localizadas na cobertura para a captação de ar.

4.3.7.4 Análise geral

A alteração no alinhamento dos *sheds* e o aumento da distância entre eles influenciaram significativamente no fluxo de ar interno. Para os *sheds* extratores de ar, a alteração desses parâmetros diminuiu as taxas de renovação devido à redução nas aberturas dos *sheds* (saída). Esse efeito foi mais significativo para o CAD3, que apresentou a maior redução nas áreas de saída e Cps menos negativos sendo, portanto, menos favorável para a ventilação natural. Além disso, ressalta-se a similaridade nessas taxas para o CAD2 e para o CAD4, onde a configuração da cobertura é bastante diferente, mas as áreas das aberturas dos *sheds* são iguais, o que reforça a importância das áreas de saída para a extração. A tabela 33 apresenta os diferentes casos em ordem do melhor para o pior desempenho, em termos de uso dos *sheds* extratores de ar.

Tabela 33: Desempenho da ventilação natural de *sheds* extratores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho o dos casos	Sheds extratores de ar					
	0°			45°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
<div>Melhor</div> <div>Pior</div>				CS7		CS7
	CS7		CS7		CS7	
		CS7	CAD1			
	CAD1	CAD1	CAD2/CAD4	CAD1	CAD1	CAD1
		CAD2/ CAD4	CAD3			CAD2/ CAD4
	CAD2/ CAD4	CAD4		CAD2/ CAD4	CAD2/ CAD4	CAD2
	CAD3			CAD3	CAD3	

Como era esperado, novamente na situação neutra o desempenho não foi alterado significativamente para os ventos incidindo paralelamente as aberturas do edifício (90°).

Conforme as análises anteriores, os valores de Cps entre as aberturas de entrada e saída de ar permaneceram muito similares ($\Delta Cps \sim 0$), o que ocasiona uma movimentação interna do ar praticamente nula.

Por fim, ao contrário da extração, para os *sheds* captadores à medida que alteramos o alinhamento e aumentamos a distância entre esses dispositivos, tem-se um incremento nas taxas de renovação no ambiente interno. O pior e o melhor desempenho foram registrados no CS7 e no CAD3, respectivamente. O CS7 tem a maior área de aberturas para a entrada de ar. No entanto, nota-se claramente que apenas o primeiro shed é efetivo para a captação. Isso ocorre, pois, os *sheds* em fileiras e distantes entre si em 2,50m projetam uma sombra de vento sob os dispositivos posteriores, desviando o ar das aberturas. À medida que vai se afastando da região a barlavento, a sombra de vento vai aumentando e os *sheds* se tornam menos efetivos para a captação. Já no caso CAD3, apesar da redução das aberturas para a entrada de ar, elas se tornam mais efetivas para a captação (Cps +), registrando uma melhora na ventilação natural nos espaços internos. Por fim, no CAD4, percebemos uma redução nas taxas de renovação devido a disposição dos *sheds* em 3 fileiras, criando regiões de recirculação com velocidades reduzidas e alterações nos campos de pressão (Cps –), diminuindo a captação pelos *sheds* mais afastados da região a barlavento. A tabela 34 apresenta os diferentes casos em ordem do melhor para o pior desempenho, em termos de uso dos *sheds* captadores de ar.

Tabela 34: Desempenho da ventilação natural de *sheds* captadores de ar

Nível de desempenho com relação à ventilação natural						
Escala de desempenho dos casos	Sheds captadores de ar					
	135°			180°		
	CR	G03	G04	CR	G03	G04
CAD3	
				CAD3	CAD2	CAD3
			CAD3	CAD2/CAD4		
			CS15/CS17	CS7/CAD4		CAD2/CAD4
	CAD2/CAD4	CAD2/CAD4	CAD1		CAD1	CS7/CAD1
	CS7/CAD1	CS7/CAD1	CS7		CS7	

4.4 MODELOS OTIMIZADOS: RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

A partir das análises paramétricas, selecionaram-se modelos otimizados para realizar novamente a verificação dos resultados numéricos com experimentais. Tem-se claramente que a G04 foi a que apresentou o melhor desempenho, em relação ao CR e a G03, na maioria das situações, para extração de ar. Além disso, também apresentou um bom desempenho para a captação, se destacando como uma excelente opção em situações que o entorno modifica a direção dos ventos predominantes. Diante desse desempenho adequado nas diversas situações, essa geometria foi a selecionada nos modelos otimizados.

Os casos avaliados foram os de *7sheds*. Selecionaram-se o CS7, que é o modelo de referência e os casos CAD2 e o CAD3, primeiramente, por serem configurações que não são usuais em edifícios com *sheds*. Segundo, por apresentarem bons desempenhos para a captação, tornando os dispositivos localizados a sotavento mais efetivos para a entrada do ar (valores positivos de Cps nas aberturas).

O uso de *sheds* extratores e captadores de ar para a incorporação da ventilação natural nos edifícios, não tem sido muito estudado pelas pesquisas nacionais e internacionais, o que gera dúvidas quanto ao desempenho desses dispositivos. Além disso, o sentido da trajetória do fluxo de ar nas aberturas dos modelos não segue um único padrão (para *sheds* extratores, nem sempre todos esses dispositivos extraem o ar e para *sheds* captadores, nem todos captam o ar) em virtude da alteração nos campos de pressões nas aberturas e ao redor delas, ocasionada pela configuração desses dispositivos, o que modifica, muitas vezes, o comportamento esperado da ventilação natural. Sendo assim, buscando a verificação do desempenho do fluxo de ar interno nesses modelos finais, essa etapa foi realizada em duas fases: 1) análise qualitativa do sentido do fluxo de ar nas aberturas, através dos vetores de velocidade com a direção e intensidade da corrente de ar nas simulações computacionais e pela técnica de fios de lã nos ensaios experimentais; 2) análise quantitativa através da medição dos Cps e da velocidade do ar nas aberturas de entrada e saída de ar.

4.4.1 ANÁLISE QUALITATIVA: TRAJETÓRIA DO FLUXO DE AR INTERNO

As figuras 132, 133 e 134 comparam a direção do escoamento do fluxo de ar nas aberturas dos modelos, numericamente e experimentalmente, para o CS7, o CAD2 e o CAD3, respectivamente, para os *sheds* como extratores de ar (0° e 45°).

Figura 132: Resultados numérico e experimental do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar no CS7 para os ângulos de (a) 0° e (b) 45°

De maneira geral, as imagens apresentaram uma boa concordância entre as duas ferramentas, para os cinco ângulos de incidência dos ventos analisados. Em todos os casos na abertura a barlavento tem-se a entrada do ar e nos *sheds*, devido à sombra de vento que é ocasionada pelo efeito de separação da corrente de ar que tangencia a cobertura, tem-se a formação de uma zona de sombra com a queda de pressão ($C_{ps} -$) que provoca

a extração de ar. No entanto, nota-se uma recirculação de ar nas aberturas dos *sheds*, que geram vórtices e, conseqüentemente, a entrada e a saída de ar. Isso é mais evidente para o ângulo de 45°, devido à distribuição assimétrica das pressões nessas regiões, o que ocasiona diferenças significativas nos Cps na mesma abertura. Esse efeito é visível no CFX pela direção alternada dos vetores e nos experimentos, pela oscilação constante dos fios de lã.

Figura 133: Resultados numérico e experimental do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar no CAD2 para os ângulos de (a) 0° e (b) 45°

Nos CAD2 e CAD3, da mesma forma como no CS7, tem-se o efeito de sombra nos *sheds* posteriores, com a queda de pressão (Cps –) e, conseqüentemente, a extração de ar. No entanto, nota-se uma diferença na trajetória do fluxo de ar nos *sheds*. Nesses casos foi registrada a recirculação com entrada e saída do ar apenas no ultimo shed para 45°, em

função do efeito da incidência oblíqua do vento em conjunto com o aumento da distância entre esses dispositivos e das suas posições desalinhadas (figuras 133 e 134).

Figura 134: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída do CAD3 de ar para os ângulos de incidência de (a) 0° e (b) 45°

A figura 135 apresenta a direção do fluxo de ar nas aberturas do CS7, CAD2 e CAD3, numericamente e experimentalmente, para a situação neutra (90°). A corrente de ar que tangencia as aberturas do edifício gera zonas de subpressão e sobrepressão, ocasionando entrada e saída de ar em todas as aberturas. No CFX isso é notado pela direção alternada dos vetores de velocidades, enquanto nos ensaios experimentais, nota-se essa recirculação de ar pela constante mudança de direção dos fios de lã.

Figura 135: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar para o ângulo de incidência de 90° (a) CS7, (b) CAD2 e (c) CAD3

Por fim, as figuras 136, 137 e 138 apresentam o sentido do escoamento do fluxo de ar nas aberturas dos modelos para *sheds* captadores de ar (135° e 180°). Para o CS7, devido à configuração da cobertura (distância entre os *sheds* de 2,50m e a disposição alinhada desses dispositivos) tem-se a captação de ar apenas pelo primeiro shed. Nota-se novamente o efeito de separação com altas velocidades, devido ao fluxo de ar que tangencia o shed a barlavento, formando uma grande sombra de vento nos *sheds* posteriores e, conseqüentemente, a extração do ar. Diante disso, o fluxo de ar interno apresenta baixas velocidades, uma vez que o ar captado é extraído pelos outros dispositivos, não atingindo a zona de ocupação dos usuários.

Figura 136: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar do CS7 para os ângulos de (a) 135° e (b) 180°

Com o desalinhamento e o aumento da distância entre os *sheds* para 5,00m (CAD2) e 7,50m (CAD3), nota-se a entrada de ar por todos os dispositivos. Embora tenha ocorrido uma redução da área das aberturas a barlavento, diminui-se a sombra de vento gerada nos *sheds* posteriores e, conseqüentemente, temos valores de Cps positivos, aumentando a efetividade das aberturas para a entrada de ar. O vento desloca-se para os lados quando encontra obstáculos e no CS7, cujas correntes de ar que tangenciavam a cobertura eram desviadas para cima, no CAD2 e CAD3 estas são recuperadas e direcionadas para o ambiente interno através das aberturas dos *sheds* posteriores. Assim, tem-se uma melhor captação pela cobertura e um incremento do fluxo de ar no espaço interno (figuras 137 e 138).

Figura 137: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar do CAD2 para os ângulos de incidência de (a) 135° e (b) 180°

Figura 138: Resultados numérico e experimental do sentido do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar do CAD3 para os ângulos de incidência de (a) 135° e (b) 180°

O arranjo escalonado dos *sheds* (CAD2 e CAD3) diminui a área de sombra na região a sotavento quando comparado à disposição alinhada desses dispositivos do CS7, reduzindo assim a subpressão pela cobertura. Além disso, nota-se que a distância entre eles também interfere na configuração do fluxo de ar ao redor dos edifícios. Os *sheds* afastados entre si e desalinhados apresentam um melhor desempenho, no caso de captação de ar, do que a configuração em que estão mais próximos entre si e alinhados. Nesses casos, a porção da corrente de ar que seria desviada acima do edifício é direcionada para dentro do ambiente, incrementando a ventilação natural no espaço interno.

4.4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA: CPs E VELOCIDADE DE AR NAS ABERTURAS

Os Cps médios nas aberturas de entrada e saída de ar do CS7, CAD2 e CAD3 adquiridos nos ensaios numéricos são comparados com os resultados experimentais nos gráficos 35, 36 e 37, respectivamente, em função de cada ângulo de incidência dos ventos externos. Em seguida, o gráfico 38 apresenta os Cps medidos numericamente e experimentalmente para os três casos analisados, adotando um limite de erro entre as duas ferramentas de 10%.

Gráfico 35: Cps nas aberturas do CS7, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para os ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.

4. Apresentação e análise dos resultados

Em geral, os resultados adquiridos no túnel de vento e nas simulações apresentaram uma concordância adequada para todos os casos e todos os ângulos de incidência dos ventos analisados. Para o CS7, notaram-se algumas discrepâncias, especialmente na abertura S7 para o ângulo de 0° , onde foi registrada a maior diferença entre as duas ferramentas (o valor simulado foi quase o dobro do medido). Por outro lado, nessa mesma abertura para os ângulos de 135° e 180° , foram registrados valores experimentais e numéricos muito similares (erro de apenas 2%), conforme apresentado nos gráficos 35 e 38a.

Gráfico 36: Cps nas aberturas do CAD2, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para os ângulos de incidência dos ventos (a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135° e (e) 180° .

No CAD2, a maioria dos valores de C_p s obtidos experimentalmente e numericamente apresentaram uma diferença inferior a 10%, ressaltando que nas aberturas A1 (180°) e S4 (0°) os valores foram iguais. No entanto, foram registradas maiores discrepâncias nas medidas experimentais e numéricas em S3 e S4, para o ângulo de 135° , onde o CFX subestimou os valores de C_p (gráficos 36 e 38b).

Gráfico 37: Cps nas aberturas do CAD3, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para os ângulos de incidência dos ventos (a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135° e (e) 180° .

Para o CAD3, obteve-se novamente uma boa concordância entre os valores numérico e experimental, registrando uma diferença inferior a 10% para a maioria dos pontos monitorados. As duas ferramentas utilizadas apresentaram uma grande similaridade

nos valores de C_p em diversos pontos monitorados, com erros próximos a 2%. Por outro lado, destaca-se a abertura A1 para o ângulo de 0° , onde o CFX subestimou o valor de C_p , sendo registrada a maior diferença entre os dados numérico e experimental (erro acima dos 10% adotados), conforme apresentado nos gráficos 37 e 38c.

Gráfico 38: Comparação entre os valores de C_p nas aberturas de entrada e saída de ar, medidos através de ensaios no túnel de vento e simulações CFD para (a) CS7, (b) CAD2 e (c) CAD3, respectivamente. As linhas pontilhadas indicam uma porcentagem de erro de 10%.

De maneira geral, na maioria dos casos analisados, notou-se uma boa concordância entre os valores experimentais e numéricos dos Cps médios nas aberturas dos modelos, para todos os ângulos de incidência dos ventos externos analisados. As diferenças de até 10% entre as duas ferramentas de análise, registradas para a maioria dos pontos monitorados, foram compatíveis com o que foi encontrado na literatura especializada (BALBASTRO; SONZOGNI, 2012; CALAUTIT; HUGHES, 2014; COOK, 1990; JIANG et al., 2003; MONTAZERI; BLOCKEN, 2003), confirmando, novamente, a compatibilidade entre os métodos numérico e experimental utilizados nessa pesquisa.

Com relação à velocidade do ar nas aberturas dos casos analisados, os gráficos 39, 40 e 41 apresentam a velocidade média em cada abertura, em função da velocidade de referência externa, medida na cota da cobertura, para o CS7, CAD2 e CAD3, respectivamente, para cada ângulo de incidência dos ventos externos. Em seguida, o gráfico 42 apresenta a velocidade média em cada abertura, em função da velocidade de referência externa, medidas numericamente e experimentalmente para os três casos analisados, adotando como limite um erro entre as duas ferramentas de 10%.

As análises da velocidade do ar nas aberturas foram realizadas em função da velocidade externa de referência, medida na cota da cobertura, a fim de alcançar uma comparação mais confiável entre as duas ferramentas. Por mais próximas que sejam as condições da camada limite atmosférica do entorno suburbano nos ensaios no túnel de vento e nas simulações computacionais, é difícil representar fielmente as mesmas condições em ambas as ferramentas. Diferenças na rugosidade do entorno podem gerar alterações significativas nos valores da velocidade do ar. Sendo assim, a relação da velocidade medida nas aberturas com um valor de referência externa, possibilita uma maior confiabilidade na comparação dos resultados numéricos com os experimentais.

De maneira geral, os resultados de velocidade adquiridos no túnel de vento e nas simulações CFD apresentaram uma concordância adequada para o CS7, o CAD2 e o CAD3, para todos os ângulos de incidência dos ventos analisados. Notaram-se em alguns casos discrepâncias entre os valores medidos e os simulados, principalmente para o CS7, cujas porcentagens de erro foram as maiores encontradas. Por outro lado, foram registrados

pontos cujos valores foram bastante similares, tendo inclusive um ponto cujo erro foi de 0%, ou seja, o valor simulado foi exatamente igual ao valor medido (gráficos 39 e 42a).

Gráfico 39: Velocidade média nas aberturas do CS7, em função da velocidade externa de referência medida na cota da cobertura, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.

No CAD2 e no CAD3, a compatibilidade entre o túnel de vento e o software CFX foi maior, ou seja, os valores obtidos experimentalmente e numericamente apresentaram uma maior similaridade. Os pontos medidos se encontraram mais próximos do limite de erro adotado (10%) entre as duas ferramentas, sendo menor o número de pontos que obtiveram

valores acima dessa faixa. Ressalta-se que para o CAD3 a similaridade entre as ferramentas foi ainda maior, existindo apenas um ponto (S1 - 135°) com diferença entre o túnel de vento e o CFX superior ao limite de erro adotado (erro registrado de 15%), conforme nota-se nos gráficos 40, 41, 42b e 42c.

Gráfico 40: Velocidade média nas aberturas do CAD2, em função da velocidade externa de referência na cota da cobertura, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.

Gráfico 41: Velocidade média nas aberturas do CAD3, em função da velocidade externa de referência na cota da cobertura, adquiridos nos ensaios experimentais e numéricos, para diferentes ângulos de incidência dos ventos (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°.

De acordo com a literatura especializada, pode-se afirmar que a verificação do modelo CFD com os ensaios no túnel de vento foi bastante compatível. Na pesquisa de Wong e Heryanto (2004) a porcentagem mínima e máxima de discrepância entre os valores das velocidades do fluxo de ar obtidas nas simulações e no túnel de vento foi de 42% e 57%, respectivamente. Por outro lado, os resultados de Jiang et. al. (2003) apresentaram uma excelente concordância, sendo a diferença menor que 5% para a maioria das regiões. No

entanto, em alguns pontos acima da cobertura os valores simulados foram 30% maior que os experimentais. Já Calautit e Hughes (2014) encontraram um erro máximo e médio de 12% e 9%, respectivamente. As medidas de velocidades registradas por esses autores também apresentaram uma boa concordância entre os dois métodos de análise, apresentando um erro menor que 10% nas medidas, com exceção de um ponto localizado na região de exaustão, que registrou um erro de 16,6%. O erro médio entre os pontos foi de 8,6%.

Gráfico 42: Comparação entre os valores de U/U_{ref} nas aberturas de entrada e saída de ar, medidos através de ensaios no túnel de vento e simulações CFD para (a) CS7, (b) CAD2 e (c) CAD3, respectivamente. As linhas pontilhadas indicam uma porcentagem de erro de 10%.

Essa etapa final de verificação dos resultados numérico com o experimental teve uma importância significativa para a pesquisa, uma vez que comprovaram novamente a compatibilidade dessas ferramentas para estudos de ventilação natural. De maneira geral, as análises quantitativas e qualitativas mostraram uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, apesar de terem sido registradas algumas discrepâncias nos valores de C_p e da velocidade do ar nas aberturas, principalmente para o CS7. No entanto, apesar dessas diferenças, as duas ferramentas registraram a mesma tendência do fluxo de ar para todos os ângulos avaliados, ou seja, fenomenologicamente apresentaram desempenhos coerentes. Além disso, notou-se também uma concordância qualitativa com relação à trajetória do fluxo de ar nas aberturas de entrada e saída de ar, através dos ensaios no túnel de vento com fios de lã e da análise da direção e intensidade dos vetores de velocidade do ar pelas simulações CFD.

Diretrizes projetuais

capítulo 5

5. DIRETRIZES PROJETUAIS: *SHEDS* EXTRATORES E CAPTADORES DE AR

Nesse capítulo, os resultados da análise paramétrica sobre a influência dos diversos parâmetros projetuais no desempenho da ventilação natural, através de *sheds* extratores e captadores de ar, são agrupados e sintetizados em forma de gráficos, tabelas e fluxogramas, a fim de discutir possíveis recomendações para o uso desses dispositivos nos edifícios. Os casos analisados foram organizados em 3 grupos, cujos critérios de divisão foram a relação entre eles e a possibilidade de comparação dos resultados: **1)** geometria dos *sheds*; **2)** variação das dimensões das aberturas para o modelo com 3 *sheds*; **3)** variação das dimensões das aberturas, da distância e do alinhamento entre os *sheds* para o modelo com 7 *sheds*. As tabelas 35, 36 e 37 apresentam os casos referentes a cada grupo. As características projetuais em destaque são as que sofreram alterações.

Tabela 35: Casos analisados do grupo 01: geometria dos *sheds*

Geometria analisadas		
Caso de referência (CR)	Geometria um (G01)	Geometria dois (G02)

N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03
Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m
Altura <i>Sheds</i> e A1= 0,625m	Altura <i>Sheds</i> e A1= 0,625m	Altura <i>Sheds</i> e A1 = 0,625m
Geometria três (G03)		Geometria quatro (G04)

N. <i>sheds</i> = 03		N. <i>sheds</i> = 03
Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m		Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m
Altura <i>Sheds</i> e A1= 0,625m		Altura <i>Sheds</i> e A1= 0,625m

Tabela 36: Casos analisados do grupo 02: variação das aberturas de entrada e saída de ar

Casos	Caso de referência	Geometria três	Geometria quatro
CA
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Altura abertura A1 = 0,625m	Altura abertura A1 = 0,625m	Altura abertura A1 = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
CA1
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Alt. Abert. A1 = 0,9375m	Alt. Abert. A1 = 0,9375m	Alt. Abert. A1 = 0,9375m
	Área abertura A1 = 4,68m ²	Área abertura A1 = 4,68m ²	Área abertura A1 = 4,68m ²
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
CA2
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Alt. Abert. A1 = 1,25m	Alt. Abert. A1 = 1,25m	Alt. Abert. A1 = 1,25m
	Área abertura A1 = 6,25m ²	Área abertura A1 = 6,25m ²	Área abertura A1 = 6,25m ²
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
CS1
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Alt. Abert. A1 = 0,625m	Alt. Abert. A1 = 0,625m	Alt. Abert. A1 = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Altura abert. Sheds = 0,937m	Altura abert. Sheds = 0,937m	Altura abert. Sheds = 0,937m
CS2
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Alt. Abert. A1 = 0,625m	Alt. Abert. A1 = 0,625m	Alt. Abert. A1 = 0,625m
	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²	Área abertura A1 = 3,12m ²
	Altura abert. Sheds = 1,25m	Altura abert. Sheds = 1,25m	Altura abert. Sheds = 1,25m

Tabela 37: Casos analisados do grupo 03: abertura, distância e alinhamento dos *sheds*

Casos	Caso de referência	Geometria três	Geometria quatro
CS7
	N. <i>sheds</i> = 07	N. <i>sheds</i> = 07	N. <i>sheds</i> = 07
	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 2,50m
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
	Área total <i>Sheds</i> = 21,875m ²	Área total <i>Sheds</i> = 21,875m ²	Área total <i>Sheds</i> = 21,875m ²
CS8
	N. <i>sheds</i> = 05	N. <i>sheds</i> = 05	N. <i>sheds</i> = 05
	Distância entre <i>sheds</i> = 3,75m	Distância entre <i>sheds</i> = 3,75m	Distância entre <i>sheds</i> = 3,75m
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
CS9
	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04	N. <i>sheds</i> = 04
	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
CS10
	N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03	N. <i>sheds</i> = 03
	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m	Distância entre <i>sheds</i> = 7,50m
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
CS11
	N. <i>sheds</i> = 02	N. <i>sheds</i> = 02	N. <i>sheds</i> = 02
	Distância entre <i>sheds</i> = 15,0m	Distância entre <i>sheds</i> = 15,0m	Distância entre <i>sheds</i> = 15,0m
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
CS11	Área total <i>Sheds</i> = 6,25m ²	Área total <i>Sheds</i> = 6,25m ²	Área total <i>Sheds</i> = 6,25m ²

Tabela 37 (continuação): Casos do grupo 03: abertura, distância e alinhamento dos sheds

Casos	Caso de referência	Geometria três	Geometria quatro
CS12
	N. sheds = 04	N. sheds = 04	N. sheds = 04
	Distância entre sheds = 5,00m	Distância entre sheds = 5,00m	Distância entre sheds = 5,00m
	Altura abert. Sheds = 1,0937m	Altura abert. Sheds = 1,0937m	Altura abert. Sheds = 1,0937m
	Área total Sheds = 21.875m ²	Área total Sheds = 21.875m ²	Área total Sheds = 21.875m ²
CS13
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Distância entre sheds = 7,50m	Distância entre sheds = 7,50m	Distância entre sheds = 7,50m
	Altura abert. Sheds = 1,4583m	Altura abert. Sheds = 1,4583m	Altura abert. Sheds = 1,4583m
	Área total Sheds = 21.875m ²	Área total Sheds = 21.875m ²	Área total Sheds = 21.875m ²
CAD1
	N. sheds = 07	N. sheds = 07	N. sheds = 07
	Distância entre sheds = 2,50m	Distância entre sheds = 2,50m	Distância entre sheds = 2,50m
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
	Área total Sheds = 10,9375m ²	Área total Sheds = 10,9375m ²	Área total Sheds = 10,9375m ²
CAD2
	N. sheds = 04	N. sheds = 04	N. sheds = 04
	Distância entre sheds = 5,00m	Distância entre sheds = 5,00m	Distância entre sheds = 5,00m
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
	Área total Sheds = 6,25m ²	Área total Sheds = 6,25m ²	Área total Sheds = 6,25m ²
CAD3
	N. sheds = 03	N. sheds = 03	N. sheds = 03
	Distância entre sheds = 7,50m	Distância entre sheds = 7,50m	Distância entre sheds = 7,50m
	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m	Altura abert. Sheds = 0,625m
	Área total Sheds = 4,6875m ²	Área total Sheds = 4,6875m ²	Área total Sheds = 4,6875m ²

Tabela 37 (continuação): Casos do grupo 03: abertura, distância e alinhamento dos *sheds*

Casos	Caso de referência	Geometria três	Geometria quatro
CAD4
	N. <i>sheds</i> = 06	N. <i>sheds</i> = 06	N. <i>sheds</i> = 06
	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m	Distância entre <i>sheds</i> = 5,00m
	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m	Altura abert. <i>Sheds</i> = 0,625m
	Área total <i>Sheds</i> = 6,25m ²	Área total <i>Sheds</i> = 6,25m ²	Área total <i>Sheds</i> = 6,25m ²

5.1 ESTRATÉGIAS DE PROJETO E O CONFORTO ADAPTATIVO

A principal função de um edifício é proporcionar conforto aos seus ocupantes, sendo que essas condições não são únicas e nem universais, variando em função de diferentes aspectos. Diante disso, é imprescindível que o ambiente interior esteja adaptado aos aspectos locais e sazonas. No território brasileiro, cada região possui especificidades que determinam características do projeto diferenciadas. Considerando as necessidades locais de cada região do país, a ventilação natural tem se mostrado uma solução aplicável, sendo que o seu controle e/ou incremento pode ser feito por meio de decisões projetuais, buscando a adequação de um projeto a diferentes regiões. Tanto a direção quanto a velocidade dos ventos externos de determinada região não podem ser alteradas pelo arquiteto. No entanto, este pode atuar tirando o melhor partido dessas características através de estratégias projetuais, como a implantação do edifício, dimensões das aberturas de entrada e saída de ar, entre outras, visando o incremento ou o controle dos ventos externos disponíveis nas edificações.

Para isso, é necessário o conhecimento da potencialidade das diferentes estratégias projetuais, buscando utilizá-las adequadamente, evitando erros que ocasionam o desconforto dos usuários. Para cada parâmetro analisado nesse trabalho, nos *sheds* extratores e captadores de ar, foram discutidos os níveis aceitáveis da velocidade do fluxo de ar interno, em função da velocidade dos ventos externos (1,5m/s – 3,0m/s – 7,0m/s). Essa análise foi realizada, visando o conforto dos usuários para regiões do Brasil de clima quente

e úmido, por a maior parte do território brasileiro ser classificada dessa forma e por serem os locais que mais necessitam da ventilação natural para o alcance do conforto térmico.

Geralmente, os limites aceitáveis da velocidade do ar são fornecidos por normas internacionais como ASHRAE 55 (2004), ISO 7730 (2005) e EN15251 (2007). No entanto, esses e outros documentos especificam valores para a velocidade do ar inferiores⁴³ aos desejados pelos usuários dessas regiões do Brasil, que demandam por maior movimento do ar. Diante disso, obtiveram-se os valores de velocidade média do ar no ambiente interno, em função das velocidades dos ventos externos analisadas nesse trabalho, para cada caso analisado, e utilizou-se os limites propostos no trabalho de Cândido et al. (2010), onde os autores questionaram os limites de aceitabilidade do movimento do ar previsto pelas referidas normas. Experimentos práticos realizados no Brasil demonstraram que nossos limites são diferentes dos praticados em países europeus, uma vez que em climas quentes, ou até mesmo moderadamente quentes, o mesmo movimento de ar que é considerado como desconfortável em climas frios e temperados, pode ser tido como extremamente bem-vindo pelos usuários para fins de conforto térmico. Através da pesquisa desses autores, notou-se que velocidades maiores podem ser não apenas bem aceitas como até desejadas pelos usuários. A tabela 38 apresenta a escala elaborada com base no trabalho de Cândido et al. (2010), que amplia os limites máximos da velocidade média do ar nos espaços internos.

Tabela 38: Limites de aceitabilidade da velocidade do ar nos ambientes internos

Velocidade do ar (m/s)	Situação ocasionada
0 – 0,2	Ventilação natural imperceptível
0,2 – 0,4	Ventilação natural perceptível
0,4 – 0,8	Ventilação natural satisfatória (há redução da carga térmica e contribui para o conforto)
Acima de 0,8	Controle necessário (causa incômodos como levantamento de papéis, desordem de cabelos, roupas e objetos)

Fonte: Adaptado de Cândido et al. (2010)

⁴³ Ver apêndice 8.8

Gráfico 44: Velocidade média do ar interno para o grupo 2, indicando os limites de aceitabilidade da velocidade do ar interno, em função da velocidade dos ventos externos (m/s), para os *sheds* extratores e captadores de ar.

Gráfico 45: Velocidade média do ar no ambiente interno para o grupo 3, indicando os limites de aceitabilidade da velocidade do ar interno, em função da velocidade dos ventos externos (m/s), para os *sheds* extratores e captadores de ar.

5.1.1 SHEDS EXTRATORES DE AR

A variação da geometria dos *sheds* modifica significativamente a velocidade do ar interno o que influencia no conforto térmico dos usuários. Para edifícios implantados em regiões cujos ventos disponíveis no exterior apresentam baixas velocidades (1,5m/s), o CR, a G01 e a G03 registraram valores reduzidos da velocidade do fluxo de ar interno (abaixo dos 0,4m/s), o que demanda o uso de estratégias de incremento da ventilação interna. Já G04 e G02 apresentaram valores internos dentro do limite da zona de ventilação natural satisfatória, contribuindo na redução da carga térmica e no conforto dos usuários.

Nessas situações, o incremento pode ser realizado tanto pelo aumento da abertura de entrada de ar (CA1 e CA2) quanto das aberturas de saída (CS1 e CS2), ressaltando que o aumento é maior para a segunda situação. Com essas alterações, têm-se velocidades internas adequadas para o alcance do conforto térmico dos usuários. No entanto, para os ventos incidindo obliquamente no edifício (45°), apesar dessas estratégias aumentarem a velocidade do fluxo de ar interno não foram suficientes para atingir velocidades internas satisfatórias. O CS2 (aumento das aberturas dos *sheds* em 100%) de todas as geometrias foi o que mais se aproximou do limite de 0,4m/s.

Ainda para essas condições climáticas externas, independente do formato dos *sheds*, o uso de edifícios com maior profundidade (CS7) não se apresenta como uma boa alternativa para o incremento do fluxo de ar interno. Isso se agrava se a distância entre os *sheds* for aumentada isoladamente ou em conjunto com o desalinhamento dos *sheds* (CS8, CS9, CS10, CS11, CAD1, CAD2, CAD3 e CAD4), pois a velocidade interna registrada é ainda menor do que nos casos anteriores, atingindo valores imperceptíveis pelos usuários. Isso ocorre, pois, essas alterações reduzem significativamente a área total das aberturas dos *sheds*, o que diminui a movimentação do fluxo de ar interno. O maior incremento foi registrado através do aumento da distância entre os *sheds* em conjunto com o aumento das suas aberturas (CS12 e CS13), mas mesmo assim os valores foram reduzidos.

Quando os ventos externos apresentam uma velocidade média de 3,0m/s, as cinco geometrias analisadas propiciam uma velocidade interna satisfatória para o conforto

térmico dos usuários (CA). Sendo assim, recomenda-se manter as aberturas de entrada e saída de ar iguais, uma vez que o aumento de suas dimensões demandam o controle da entrada do fluxo de ar no ambiente interno. Outras estratégias adequadas para essa situação são: a) edifícios com maior profundidade com os *sheds* mais próximos entre si (CS7 e CS8); b) intercalar os *sheds* em 2 fileiras, sem aumentar demasiadamente a distância entre eles, uma vez que isso implica na redução das aberturas de saída de ar (CAD1 e CAD2); e c) se for aumentar a distância entre esses dispositivos, deve-se aumentar as aberturas de saída do ar (CS12 e CS13), que incrementam a ventilação natural interna, tornando-a satisfatória para o alcance do conforto.

Por fim, em regiões cujos ventos externos apresentam velocidades elevadas (7,0m/s) todos os casos analisados atingiram valores da velocidade do ar interno expressivamente acima do que é considerado satisfatório (em torno de 1,5 – 2,0m/s). Sendo assim, os edifícios implantados nessas regiões requerem estratégias de controle da entrada de ar a fim de evitar incômodos como levantamento de papéis e desordem nos usuários. Nessas condições o aumento das aberturas de entrada e saída do ar não é uma boa solução, uma vez que admitiria uma quantidade de ar ainda maior nos espaços internos.

5.1.2 *SHEDS* CAPTADORES DE AR

Nota-se que para os *sheds* captadores, as baixas velocidades dos ventos externos (1,5m/s) não possibilitam a entrada do fluxo de ar com velocidades satisfatórias no ambiente interno, o que demanda o uso de estratégias de incremento da ventilação natural. Ressalta-se que para as geometrias CR e G01 as velocidades médias internas foram bastante reduzidas, estando na faixa de ventilação natural imperceptível. Nesses casos, o aumento das aberturas de entrada e saída de ar aumentou a velocidade do fluxo de ar interno, mas mesmo assim, o edifício com *sheds* em dente-de-serra permaneceu com uma ventilação natural insatisfatória. Já para G03 e G04 somente com o aumento da abertura de saída de ar (CA2 e CA1) o incremento atingiu valores satisfatórios para o conforto térmico dos usuários. Com relação às estratégias do grupo 3, nenhuma delas foi suficiente para

incrementar o fluxo de ar interno, mantendo o edifício com uma ventilação natural insatisfatória para as três geometrias analisadas.

Para uma velocidade média dos ventos externos (3,0m/s), as geometrias analisadas propiciam uma velocidade interna satisfatória para o conforto térmico dos usuários, com exceção dos casos CR e G01, cujos valores se encontram abaixo de 0,3m/s, requerendo o uso de estratégias de incremento da velocidade do fluxo de ar interno. Nesses casos, o aumento das aberturas de saída de ar (CA1 e CA2) proporcionam velocidades satisfatórias para o CR, enquanto o aumento das aberturas de entrada de ar (*sheds*) não ocasiona um incremento suficiente para o resfriamento fisiológico dos usuários. Já nas G03 e G04, os aumentos das aberturas de entrada de ar levemente incrementam a velocidade do fluxo de ar interno, mas é suficiente para ocasionar o conforto nos usuários. Nota-se novamente o melhor desempenho das geometrias aerodinâmicas em relação às ortogonais. Já quando se aumenta a abertura de saída, a vazão volumétrica é significativamente superior, necessitando o uso de estratégias de controle. Com relação às estratégias do grupo 3, todas elas são suficientes para reduzir a carga térmica e propiciar o conforto térmico nos usuários.

Por fim, quando os ventos externos apresentam velocidades elevadas, assim como nos *sheds* extratores, a velocidade interna atinge valores expressivamente acima do que é considerado satisfatório (em torno de 1,2 e 1,6m/s), necessitando do uso de estratégias de controle da entrada de ar no edifício. Velocidades internas satisfatórias para o conforto térmico dos usuários foi alcançada apenas para as geometrias CR e G01, no grupo 1.

De modo geral, os *sheds* extratores atingem velocidades internas superiores aos captadores. Na situação de extração, G04 e G02 são adequadas tanto para baixas velocidades dos ventos externos, quanto para médias. Já as CR, G01 e G03 atinge a faixa de ventilação satisfatória apenas para velocidades médias. Para ventos externos com velocidades elevadas, todas as geometrias necessitam de estratégias de controle dos ventos no ambiente interno. Já para a captação, para ventos externos de 1,5m/s, nenhuma das geometrias analisadas apresenta uma ventilação interna satisfatória. Quando os ventos são de 3,0m/s, as G02, G03 e G04 aproveitam os ventos de forma satisfatória no ambiente

interno, ao contrário da CR e da G01 que necessitam de estratégias para o incremento da velocidade interna do ar. Essa situação se inverte em regiões com velocidades externas altas (7,0m/s), uma vez que as CR e G01 se tornam boas soluções para o conforto dos usuários enquanto as G02, G03 e G04 necessitam de estratégias de controle da entrada do ar no edifício.

Para os *sheds* extratores, o incremento do ar nos espaços internos pode ser realizado tanto pelo aumento das aberturas de entrada de ar, quanto pelas de saída, ressaltando que esse incremento é maior no segundo caso. Já os modelos do grupo 3 não se apresentam como alternativas viáveis para se atingir o conforto dos usuários, uma vez que as aberturas de saída de ar foram reduzidas. Somente CS12 e CS13 apresentaram-se como boas soluções quando as velocidades são em torno de 3,0m/s, pois, as aberturas dos *sheds* sofreram um aumento, o que possibilita uma ventilação natural satisfatória nos espaços internos.

Já para os *sheds* captadores de ar, o alcance do conforto térmico pode ocorrer através do aumento da dimensão das aberturas de saída de ar e pelas modificações projetuais dos casos contidos no grupo 3. Isso ocorre, pois, o aumento da distância entre esses dispositivos, apesar de reduzir as aberturas de entrada de ar, tornam os *sheds* posteriores mais efetivos para a captação, o que incrementa o fluxo de ar interno.

A tabela 39 apresenta de forma resumida as estratégias projetuais dos grupos 1, 2 e 3, com os limites de aceitabilidade da velocidade do ar interno, em função da velocidade dos ventos externos (m/s), indicando as estratégias adequadas para o conforto dos usuários e quais são necessárias para o incremento e para o controle do fluxo de ar interno, para *sheds* extratores e captadores de ar.

Tabela 39: Estratégias projetuais e os limites de aceitabilidade da velocidade média interna do ar

	Limites de aceitabilidade da vel.interna do ar	Sheds EXTRATORES de ar			Sheds CAPTADORES de ar			
		Velocidade dos ventos externos (m/s)			Velocidade dos ventos externos (m/s)			
GEOMETRIA DOS SHEDS		1,5	3,0	7,0	1,5	3,0	7,0	
	INCREMENTO ¹	- Uso das geometrias CR / G01 / G03 CR G01 G03	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CR G01 G02 G04	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CR G01 G02 G03 G04	CR G01 G02 G03 G04	- Geometrias ortogonais CR / G01 CR G01	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CR G01	
	USO ²	- Geometrias aerodinâmicas G02 G04	CR G01 G02 G03 G04	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CR G01 G02 G03 G04	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CR G01 G02 G03 G04	- Geometrias aerodinâmicas G03 G02 G04	- Geometrias CR / G01 CR G01	
	CONTROLE ³	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. G03 G02 G04	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. G03 G02 G04	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. CR G01 G02 G03 G04	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. CR G01 G02 G03 G04	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. G03 G02 G04	- Geometrias aerodinâmicas G03 G02 G04	
DIMENSÃO DAS ABERTURAS (3 SHEDS)	INCREMENTO ¹	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Aumento das aberturas de entrada do ar - CR CS1 CS2	- Aumento das aberturas de entrada do ar CA1 CA2	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. G03 G04	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CA1 CA2
	USO ²	- Aumento das aberturas de saída e entrada do ar CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Aumento da abertura de saída do ar - G03 e G04 CA1 CA2	- Aumento da abertura de saída do ar CS1 CS2	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CA1 / CA2 CS1 / CS2
	CONTROLE ³	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Aumento das aberturas de entrada e saída do ar CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Aumento das aberturas de entrada e saída do ar CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. CA1 CA2	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. CS1 CS2	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. CA1 / CA2 CS1 / CS2	- Aumento das aberturas de entrada e saída do ar. CA1 / CA2 CS1 / CS2
DIMENSÃO DAS ABERTURAS, DISTÂNCIA E ALINHAMENTO ENTRE OS SHEDS (7 SHEDS)	INCREMENTO ¹	- Aumento da distância/aumento da abt. dos sheds/alinhamento dos sheds CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Aumento da distância/aumento da abt. dos sheds/alinhamento dos sheds CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de incremento do fluxo de ar interno. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4
	USO ²	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Aumento da distância/aumento da abt. dos sheds/alinhamento dos sheds CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Aumento da distância/aumento da abt. dos sheds/alinhamento dos sheds CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Nenhum dos casos analisados apresentou velocidade do fluxo de ar interno suficiente para o conforto térmico dos usuários. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4
	CONTROLE ³	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Em nenhum dos casos analisados é necessário o uso de estratégias de controle do fluxo de ar interno. CS7 CS8 CS9 CS10 CS11 CS12 CS13 CAD1 CAD2 CAD3 CAD4	- Aumento da distância/aumento da abt. dos sheds/alinhamento dos sheds CS				

¹ (0 m/s - 0,4 m/s): Valores reduzidos de velocidade do ar interno - necessidade do uso de estratégias para incremento da ventilação natural nos edifícios² (0,4 m/s - 0,8 m/s): Valores de velocidade do ar interno satisfatórios para o alcance do conforto térmico dos usuários³ (Acima de 0,8 m/s): Valores elevados de velocidade do ar interno - necessidade do uso de estratégias para controle da entrada do ar nos edifícios

LEGENDA

..... necessidade de incremento

..... necessidade de controle

5.2 RECOMENDAÇÕES DO USO DE *SHEDS* EXTRATORES E CAPTADORES DE AR

5.2.1 *SHEDS* EXTRATORES DE AR

Os gráficos 46 e 47 apresentam, de forma resumida, as taxas de renovação de ar e a variação nesses valores (%), em relação ao CR, CA e CS7 para os casos dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente, destacando o que obteve o melhor desempenho, para os *sheds* extratores de ar. De modo geral, para a extração recomendam-se as seguintes diretrizes:

1) o uso de geometrias aerodinâmicas de formato contínuo, sem interrupções ou obstáculos ao fluxo de ar que tangencia a cobertura, pois, essa configuração reduz o efeito de separação, ocasionando o aumento da velocidade dos ventos e uma queda mais significativa nos valores de Cps nas aberturas dos *sheds*. Assim, têm-se maiores ΔCps entre as aberturas e, conseqüentemente, um maior fluxo de ar no espaço interno. Nesse caso, a G04 registrou o melhor desempenho (tabela 35). No entanto, ressalta-se a importância de analisar os diferentes formatos aerodinâmicos, uma vez que a trajetória do ar interno é influenciada qualitativamente pela forma, o que pode modificar os parâmetros quantitativos (como os valores de Cps) e, portanto, o desempenho da ventilação, conforme ocorreu na G03, cujo comportamento foi semelhante ao do CR, embora tenham formatos totalmente diferentes (gráficos 46 e 47).

2) o aumento da dimensão das aberturas de saída de ar, pois são responsáveis por maiores valores absolutos de Cps (maiores ΔCp) e pelo aumento da vazão volumétrica na saída do edifício, propiciando taxas de renovação do ar no ambiente interno mais elevadas. A maior vazão é obtida quando as aberturas situadas a sotavento do edifício são maiores. Nesse caso, o CS2 registrou o melhor desempenho, sendo que este é maior ainda quando ele apresenta geometria aerodinâmica, como a G04 (tabela 36). No entanto, ressalta-se também o bom desempenho quando ocorre o aumento da abertura de entrada de ar, uma vez que o fluxo de ar é admitido no ambiente com menor perda de carga localizada, devida à obstrução, resultando em um maior aproveitamento dos ventos externos no espaço interno, como o CA2 analisado nesse trabalho (gráficos 46 e 47).

Gráfico 46: Taxas de renovação de ar em cada caso analisado para sheds extratores de ar

Gráfico 47: Variação (%) nas taxas de renovação de ar/hora em cada caso analisado para *sheds* extratores de ar

3) uso de edifícios com menor número de *sheds* e, conseqüentemente, uma menor profundidade, pois, apesar do incremento de *sheds* na cobertura aumentar o número de aberturas de saída, a velocidade do fluxo de ar no espaço interno e na região próxima dos *sheds* foi reduzida. Isso ocorre, pois, o aumento isolado desse parâmetro projetual reduziu os ΔCps entre as aberturas de entrada e saída de ar e, portanto, a sucção do ar interno para fora do edifício. Os Cps nos *sheds* próximos a face barlavento, possuem valores mais negativos, devido ao ar que tangencia esses dispositivos apresentar maiores velocidades. À medida que vai se afastando dessa face, o vento tem uma redução na sua velocidade o que altera os valores de Cps (Cps menos negativos). É essa redução no diferencial de pressão entre as aberturas que diminui, principalmente, a renovação do ar no ambiente interno (gráficos 43 e 44).

4) no caso do edifício com maior profundidade, (com 7 *sheds* e comprimento de 17,5m), recomenda-se o aumento da distância entre os *sheds* juntamente com o aumento das aberturas de saída de ar (*sheds*), pois essa configuração possibilitou o melhor desempenho da ventilação natural (CS13 – tabela 37). Essas alterações aumentam a velocidade do ar que tangencia a cobertura, ocasionando uma queda de pressão mais intensa nas aberturas (valores de Cps mais negativos). Assim, têm-se maiores ΔCp e, conseqüentemente, um maior fluxo do ar no espaço interno (gráficos 43 e 44).

5) no caso do edifício com maior profundidade, se for aumentar apenas a distância entre os *sheds* ou a distância com o desalinhamento entre esses dispositivos, sem aumentar as aberturas de saída, recomenda-se manter os *sheds* mais próximos entre si, em virtude da maior área total das aberturas de saída do ar (CS7 - tabela 37). O aumento isolado da distância entre os *sheds* ou o aumento da distância com o desalinhamento desses dispositivos reduzem significativamente a área total das aberturas de saída de ar e, com isso, tem-se o registro da passagem do fluxo nessas aberturas com velocidades reduzidas, o que indica a baixa extração do ar pela cobertura e reduzidas taxas de renovação de ar no ambiente interno (gráficos 43 e 44). Nota-se claramente que a área total das aberturas de saída do ar é o parâmetro projetual que exerce a maior influência no desempenho da ventilação natural para esses dispositivos como extratores de ar.

6) para os casos mais profundos, recomenda-se novamente o uso de geometrias aerodinâmicas (G04), cujo desempenho foi superior em todas as situações analisadas. No entanto, os desempenhos das diferentes geometrias (CR, G03 e G04) foram bastante similares o que possibilitaria, por exemplo, o uso da geometria em dente de serra (CR) aumentando a dimensão das aberturas de saída. Assim, o desempenho seria similar ao de G04, com a vantagem da redução dos custos para a execução de uma cobertura curva (gráficos 43 e 44).

Por fim, de todos os casos analisados, para os *sheds* extratores de ar, o melhor desempenho foi registrado no CS2 (tabela 35), cujas características projetuais são: a) geometria aerodinâmica (G04); b) edifício com menor profundidade (3 *sheds*) e c) aberturas de saída de ar (*sheds*) com maiores dimensões (gráficos 43 e 44).

5.2.2 SHEDS CAPTADORES DE AR

Os gráficos 48 e 49 apresentam, de forma resumida, as taxas de renovação de ar e a variação nesses valores (%), em relação ao CR, CA e CS7 para os casos dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente, destacando o que obteve o melhor desempenho, para os *sheds* captadores de ar. De modo geral, para a captação recomendam-se as seguintes diretrizes:

1) o uso de geometrias aerodinâmicas de formato contínuo, sem interrupções ou obstáculos à circulação do ar, pois, essa configuração reduz o efeito de separação, ocasionando o aumento da velocidade dos ventos e uma queda mais significativa nos valores de C_{ps} nas aberturas dos *sheds*. Assim, têm-se maiores ΔC_{ps} entre as aberturas e, conseqüentemente, um maior fluxo de ar no espaço interno. Nesse caso, apesar dos formatos diferentes, tanto a G03 como a G04 apresentaram bons desempenhos para a captação do ar pela cobertura (gráficos 48 e 49), pois desviam o fluxo de ar para baixo de forma mais intensa, que aumenta a velocidade na zona de ocupação dos usuários.

Gráfico 48: Taxas de renovação em cada caso analisado para *sheds* captadores de ar

2) o aumento da abertura de saída de ar (CA2 – tabela 36), pois, proporciona um incremento na velocidade do ar em A1 e, portanto, a vazão de ar na saída é mais intensa com taxas de renovação no ambiente interno mais elevadas. Novamente, o caso CA2 registrou um desempenho superior com o uso de geometrias aerodinâmicas, como a G03 e a G04. Além disso, destaca-se que o aumento das dimensões das aberturas de entrada de ar (*sheds*) também ocasionou um leve incremento nas taxas de renovação, mas significativamente inferior ao aumento da abertura de saída de ar (sotavento). O incremento nas dimensões das aberturas de entrada de ar (*sheds*), sem a alteração de outros parâmetros projetuais, não tornam as aberturas posteriores efetivas para a entrada do ar e assim o incremento da velocidade do fluxo de ar interno não é tão significativo, como com o aumento da abertura de saída (gráficos 48 e 49).

3) o uso de edifícios com menor profundidade (3 *sheds*), pois, embora o aumento da profundidade do edifício tenha aumentado o número de *sheds* na cobertura e, com isso, as entradas de ar, nota-se uma redução significativa nas taxas de renovação, uma vez que nem todas se tornam efetivas para a captação do ar, devido à sombra de vento gerada pelos ventos que tangenciam os *sheds*. Isso ocorre, pois, o aumento do número desses dispositivos ocasionou valores menos negativos de C_p s nas aberturas dos dispositivos localizados mais distantes da face a barlavento (menores ΔC_p entre as aberturas), devido o aumento da profundidade do edifício. Nesses casos, a captação continuou ocorrendo apenas pelo primeiro shed, conforme ocorria no caso com 3 *sheds*, sendo que o fluxo captado é extraído pelos outros dispositivos, não ocorrendo um incremento do ar na zona de ocupação dos usuários. Desse modo, a corrente de ar captada pela cobertura atingiu a mesma distância interna, independente da quantidade desses dispositivos, o que proporcionou um fluxo de ar interno com baixas velocidades na zona de ocupação mais afastada do shed captador e, portanto, uma menor renovação do ar no ambiente interno. Para a situação de captação, os melhores desempenhos foram registrados novamente para G03 e G04. No entanto, ressalta-se que a diferença entre as diferentes geometrias foi praticamente insignificante. Isso reforça que parâmetros projetuais como o aumento do número de *sheds* e da profundidade do edifício influenciam mais no desempenho da

300 LUKIANTCHUKI, M. A. Tese de Doutorado (IAU/USP)

ventilação natural nos espaços internos do que unicamente a mudança na geometria desses dispositivos.

4) no caso do edifício com maior profundidade, (com 7 *sheds* e profundidade de 17,5m), recomenda-se o aumento da distância entre esses dispositivos. Isso ocorreu, pois, apesar do aumento da distância reduzir o número de aberturas de entrada de ar, os maiores espaços entre os *sheds* possibilitaram uma recuperação da velocidade do vento no nível da cobertura, permitindo a captação pelos *sheds* posteriores (CS11 – ver tabela 37). No caso com os *sheds* mais próximos entre si, a entrada de ar ocorre apenas pelo primeiro shed, uma vez que o fluxo de ar que tangencia esse dispositivo a barlavento, ocasiona uma sombra de vento nos *sheds* localizados na região posterior e, portanto, uma queda significativa de pressão (Cps -) nas suas aberturas com a extração do ar. À medida que esses dispositivos foram distanciados entre si, os Cps nas aberturas dos *sheds* posteriores tornaram-se menos negativos, com uma tendência a ficarem positivos, uma vez que a zona de separação é menos intensa e, assim, a pressão não sofre uma grande redução. Diante disso, as aberturas localizadas na região posterior ao shed a barlavento se tornam mais efetivas para a entrada de ar, permitindo, maiores taxas de renovação de ar/hora.

5) novamente no caso do edifício com maior profundidade, o aumento da distância entre esses dispositivos aliado ao aumento das aberturas de entrada de ar, ocasiona o melhor desempenho dos *sheds* como captadores de ar (CS13 – ver tabela 37). Com essas modificações, a zona de separação foi mais intensa, ocasionando recirculações do ar com maiores velocidades e, conseqüentemente, uma maior redução nos valores de Cps nas aberturas. O fluxo de ar com maiores velocidades captado pelo shed a barlavento atinge uma região maior do espaço interno, direcionando-o para a região mais afastada do shed captador, propiciando uma maior renovação do ar no espaço interno (gráficos 45 e 46).

6) outra solução para aumentar o desempenho nos edifícios mais profundos é aliar o aumento da distância entre os *sheds* com a alteração do alinhamento desses dispositivos, intercalando-os em duas fileiras na cobertura (CAD3 – ver tabela 37). Novamente, apesar das aberturas de entrada de ar serem reduzidas, elas se tornam mais efetivas para a captação. No caso do aumento da distância, isso ocorre devido a redução da sombra de

vento nos *sheds* posteriores, que tendem a ficar com valores positivos de Cps. Já com relação à disposição sinuosa dos *sheds*, esse efeito se dá pelo aproveitamento do ar que seria desviado para cima do edifício, direcionando-o para as aberturas posteriores. O desalinhamento dos *sheds* em 2 fileiras tem um melhor desempenho para a captação do ar do que quando os *sheds* são intercalados em 3 fileiras. No entanto, destaca-se que seu desempenho foi superior ao caso com os *sheds* totalmente alinhados e mais próximos entre si (gráficos 48 e 49).

Por fim, de todos os casos analisados, para os *sheds* captadores de ar, o melhor desempenho foi registrado no CA2 (tabela 35), cujas características projetuais são: a) geometria aerodinâmica (G03 e G04); b) edifício com menor profundidade (3 *sheds*) e c) aberturas de saída de ar (A1) com maiores dimensões (gráficos 45 e 46).

5.2.3 SHEDS EXTRATORES E CAPTADORES DE AR

Os *sheds* podem funcionar como extratores ou captadores de ar, dependendo da sua orientação em relação aos ventos dominantes. Conforme apresentado nesse trabalho, o uso desses dispositivos, em cada uma dessas situações, requer a adoção de parâmetros projetuais específicos que otimizem o uso da ventilação natural nos ambientes internos. No entanto, notou-se que algumas configurações apresentaram um bom desempenho para ambas as situações. O fato de apresentarem um desempenho adequado tanto para a extração quanto para a captação é interessante quando as mudanças no entorno, como a inclusão de vegetações, construção de novos edifícios, alterações climáticas, entre outros, influenciam na direção dos ventos externos. Sendo assim, esses modelos apresentam a maior viabilidade de uso em situações que exigem uma adaptação às mudanças dos ângulos de incidência dos ventos. A tabela 40 apresenta de forma resumida os casos com melhores desempenhos de *sheds* extratores e captadores de ar para os diferentes parâmetros analisados e que apresentaram bons comportamentos nas duas situações.

Tabela 40: Diferentes parâmetros projetuais analisados para extração/captação

Parâmetro projetual 01: Geometria dos <i>sheds</i>		
<i>Sheds</i> EXTRATORES de ar	<i>Sheds</i> CAPTADORES de ar	<i>Sheds</i> EXTRATORES e CAPTADORES de ar
G04	G03 G04	G04

Para a extração do ar a G04 foi a que apresentou o melhor desempenho. Já para a captação, tanto a G03 quanto a G04 apresentaram-se como boas opções, destacando-se, então, a G04 como o formato dos *sheds* que pode ser utilizado em ambas as situações com um desempenho satisfatório. Em todas as geometrias analisadas, os *sheds* como extratores de ar tiveram um desempenho significativamente superior aos *sheds* captadores. Isso ocorreu, pois, no caso da captação, independente do formato desses dispositivos, o ar é captado apenas pelo primeiro shed, uma vez que a corrente de ar que tangencia a cobertura ocasiona uma sombra de vento nos *sheds* posteriores com significativa queda de pressão. Esse efeito aumenta a probabilidade de ocorrência de um fluxo reverso nas aberturas localizadas a sotavento, que ao contrário de captarem o ar, passam a extraí-lo. Desse modo, o ar captado pelo primeiro shed atinge apenas a zona superior do espaço, não alcançando a região de ocupação com altas velocidades. Diante disso, não se tem uma grande renovação do ar no espaço interno, como acontece com os extratores de ar.

Parâmetro projetual 02: Número de <i>sheds</i> na cobertura		
<i>Sheds</i> EXTRATORES de ar	<i>Sheds</i> CAPTADORES de ar	<i>Sheds</i> EXTRATORES e CAPTADORES de ar
CS3 + G04	CS3 + G03 CS3 + G04	CS3 + G04

Com relação ao número de *sheds* na cobertura, fica claro que tanto para os *sheds* extratores quanto para os captadores tem-se um melhor desempenho quando o edifício apresenta menor profundidade (3 *sheds*). À medida que o número de dispositivos na cobertura foi aumentado para 5 e 7 *sheds*, aumentou-se a profundidade do edifício e reduziu-se o desempenho da ventilação natural no espaço interno. No caso da extração é pela redução do fluxo interno à medida que este se distancia da abertura a barlavento. Já na captação é porque apesar do aumento do número das aberturas de entrada, o ar é captado apenas pelo primeiro shed, atingindo a mesma região interna e, portanto, menor renovação do ar. Novamente, os *sheds* como extratores de ar tiveram um desempenho superior aos *sheds* captadores.

Tabela 40: Diferentes parâmetros projetuais analisados para extração/captação

Parâmetro projetual 03: Dimensão das aberturas de entrada e saída de ar		
Sheds EXTRATORES de ar	Sheds CAPTADORES de ar	Sheds EXTRATORES e CAPTADORES de ar
<p>CS2 + G04 CA2 + G04</p>	<p>CA2 + G03 CA2 + G04</p>	<p>CA2 + G04</p>

Para o edifício com 3 *sheds*, tanto para os extratores quanto os captadores, o melhor desempenho foi registrado quando as aberturas de saída de ar tiveram um aumento (*sheds* e A1 para extração e captação respectivamente). No entanto, ressalta-se que o aumento de A1 também propiciou um incremento na renovação do ar para os *sheds* extratores, ocorrendo, inclusive, em algumas situações, valores superiores aos captadores. Diante disso, nota-se que na extração o aumento da dimensão das aberturas de saída de ar exerce uma maior influência no bom desempenho desses dispositivos. No entanto, o aumento da abertura de entrada de ar também é um fator importante. Já para a captação, o aumento da abertura de saída de ar é muito mais relevante, uma vez que o aumento isolado dos *sheds* sofre a influência de outros fatores, como os *sheds* localizados mais próximos e na mesma altura, que impossibilita a entrada de ar pelos dispositivos posteriores e, portanto, um melhor desempenho. Para a situação de mudanças do entorno (extração e captação) sugere-se edifícios cujas aberturas de entrada e saída apresentem maiores dimensões.

Parâmetro projetual 04: Dimensão das aberturas dos <i>sheds</i> e distância entre esses dispositivos (edifícios mais profundos – casos com 7 <i>sheds</i>)		
Sheds EXTRATORES de ar	Sheds CAPTADORES de ar	Sheds EXTRATORES e CAPTADORES de ar
<p>CS7 + G04</p>	<p>CS11 + G03 CS11 + G04</p>	<p>-----</p>
<p>CS13 + G04</p>	<p>CS13 + G03 CS13 + G04</p>	<p>CS13 + G04</p>

Para o caso do edifício com maior profundidade, o aumento da distância entre os *sheds* reduz a área total das aberturas desses dispositivos, o que reduz as taxas de renovação de ar para os *sheds* extratores. Já para a captação, essas alterações possibilitaram um leve incremento nessas taxas. Diante disso, para a extração seria melhor o uso de edifícios com os *sheds* dispostos mais próximos um dos outros, devido a maior área total das aberturas de saída de ar (CS7), enquanto para a captação, recomenda-se o espaçamento entre esses dispositivos (CS11). No entanto, apesar desses casos terem registrados incrementos nas taxas de renovação de ar para captação e uma redução para os extratores de ar, novamente o desempenho foi superior para a segunda situação de incidência dos ventos dominantes.

Para os edifícios mais profundos, tem-se uma melhora significativa quando se alia o aumento da distância com o aumento das aberturas dos *sheds* (aberturas de saída e de entrada do ar para os *sheds* extratores e captadores, respectivamente), tanto para a situação de extração quanto para a de captação. Em ambas as situações analisadas, o CS13 apresentou o melhor desempenho, se mostrando como o caso mais viável para o uso em situações que exigem uma adaptação às mudanças dos ângulos de incidência dos ventos.

Tabela 40 (continuação): Diferentes parâmetros projetuais analisados para extração/captação

Parâmetro projetual 04: Dimensão das aberturas dos <i>sheds</i> , distância e o alinhamento entre esses dispositivos (edifícios mais profundos – casos com 7 <i>sheds</i>)		
<i>Sheds</i> EXTRATORES de ar	<i>Sheds</i> CAPTADORES de ar	<i>Sheds</i> EXTRATORES e CAPTADORES de ar
<p>CS7 + G04</p>	<p>CAD3 + G03</p> <p>CAD3 + G04</p>	<p>-----</p>

Com relação ao aumento da distância e o desalinhamento dos *sheds*, intercalando-os em duas fileiras, tem-se uma redução da renovação do ar no ambiente interno para os *sheds* extratores de ar, em virtude da redução das aberturas de saída de ar. Já para os *sheds* captadores de ar, tem-se um leve aumento do desempenho da ventilação no ambiente interno. Diante disso, para a extração recomenda-se o uso de edifícios com os *sheds* dispostos mais próximos um dos outros e alinhados, devido a maior área total das aberturas de saída de ar (CS7), enquanto para a captação, recomenda-se o maior espaçamento entre esses dispositivos e o desalinhamento dos *sheds* em 2 fileiras (CAD3). Já quando esse alinhamento ocorre em 3 fileiras, o desempenho da captação do ar pela cobertura é menos efetivo, diminuindo a entrada de ar pelos *sheds* mais afastados da região a barlavento. No entanto, ressalta-se que esse caso apresentou um melhor desempenho do que quando os *sheds* estão alinhados e mais próximos entre si. Para esses casos, apesar dos *sheds* extratores terem registrados uma redução nas taxas de renovação de ar/hora enquanto que os captadores tiveram um incremento, novamente o desempenho foi superior para a extração do ar pela cobertura.

O fluxograma a seguir apresenta, de forma resumida, as principais recomendações para os *sheds* extratores e captadores de ar e os modelos mais viáveis para serem utilizados em ambas as situações.

Síntese dos parâmetros relevantes no desempenho de sheds EXTRATORES e CAPTADORES de ar

Sheds EXTRATORES de ar: G04 registrou o melhor desempenho. O uso de geometrias aerodinâmicas de formato contínuo, sem interrupções ou obstáculos ao fluxo de ar que tangencia a cobertura, reduz o efeito de separação, ocasionando o aumento da velocidade dos ventos e uma queda mais significativa nos valores de Cps nas aberturas dos sheds. Assim, tem-se maiores ΔCps entre as aberturas e, portanto, um maior fluxo de ar no espaço interno, com maiores taxas de renovação de ar/hora.

Sheds CAPTADORES de ar: o uso de geometrias aerodinâmicas de formato contínuo, sem obstáculos à circulação do ar, da mesma forma como nos sheds extratores de ar. Apesar dos formatos diferentes, tanto G03 quanto G04 possibilitaram o escoamento do ar com maiores velocidades e, portanto, uma maior renovação do ar no ambiente interno. Além disso, essas geometrias desviam o fluxo de ar para baixo de forma mais intensa, o que aumenta a velocidade do ar na zona de ocupação dos usuários.

Sheds EXTRATORES de ar: apresentam melhor desempenho à medida que tem-se o aumento das aberturas de saída de ar (sheds), pois são responsáveis por maiores valores absolutos de Cps nas aberturas (maiores ΔCps) e, portanto, pelo aumento da vazão do ar na saída do edifício, incrementando as taxas de renovação no ambiente interno. Nesse caso, o CS2 teve o melhor desempenho, sendo maior quando a geometria é aerodinâmica (G04). Ressalta-se também um bom desempenho com o aumento da abertura de entrada de ar (CA2).

Sheds CAPTADORES de ar: o melhor desempenho é registrado à medida que o aumento da abertura de saída de ar (A1) tem sua dimensão aumentada (CA2), pois, isso incrementa a velocidade do ar nessa abertura e, portanto, a vazão na saída é mais intensa com taxas de renovação no ambiente interno mais elevadas. Tanto a G03 quanto a G04 apresentaram bons desempenhos. Nesse caso, o aumento das aberturas dos sheds (entrada) não propiciou um aumento muito significativo, uma vez que a alteração desse parâmetro isolado não tornam as aberturas tão efetivas para a entrada de ar e, assim, o incremento no fluxo de ar interno é baixo.

Sheds EXTRATORES de ar: no caso do edifício possuir uma maior profundidade, recomenda-se o aumento da distância entre os sheds em conjunto com o aumento das aberturas de saída de ar (sheds), pois, essa configuração apresentou o melhor desempenho para a ventilação natural do espaço interno (CS13). Essas alterações possibilitam o aumento da velocidade do ar que tangencia a cobertura, ocasionando uma queda de pressão mais intensa nas aberturas. Assim, têm-se maiores ΔCps com um maior fluxo de ar no espaço interno. Se for aumentar apenas a distância entre os sheds ou a distância com o desalinhamento entre esses dispositivos, sem alterar as aberturas de saída, recomenda-se manter os sheds mais próximos entre si, em virtude da maior área total das aberturas de saída do ar (CS7). O aumento isolado da distância entre os sheds ou o aumento da distância com o desalinhamento desses dispositivos reduzem significativamente a área total das aberturas de saída de ar e, com isso, as taxas de renovação. Nota-se claramente que a área total das aberturas de saída de ar é o parâmetro projetual que exerce a maior influência no desempenho da ventilação para esses dispositivos como extratores de ar. Recomenda-se novamente o uso de geometrias aerodinâmicas (G04). No entanto, a geometria ortogonal em dente-de-serra teve um desempenho similar, o que possibilita seu uso com o aumento da dimensão das aberturas de saída. Assim, tem-se um desempenho próximo ao da G04, com a vantagem da redução de custos para a execução de uma cobertura curva, como as geometrias aerodinâmicas analisadas nesse trabalho.

Sheds CAPTADORES de ar: à medida que aumentamos a distância entre os sheds, tem-se um leve incremento nas taxas de renovação de ar/hora (CS11). O aumento dessa distância aliado ao aumento das aberturas dos sheds possibilita o melhor desempenho para a captação do ar (CS13). No caso de intercalar os sheds na cobertura, o melhor desempenho foi alcançado com os sheds dispostos em duas fileiras e mais distantes entre si (CAD3), devido as aberturas dos sheds localizados a sotavento se tornarem mais efetivas para a entrada de ar. O desalinhamento em 2 fileiras apresenta um melhor desempenho do que em 3 fileiras. No entanto, todas essas opções são melhores do que as sheds dispostos alinhados e mais próximos entre si.

Sheds EXTRATORES de ar: soluções de melhor desempenho

1) Geometria: uso de geometrias aerodinâmicas de formato contínuo, sem interrupções ou obstáculos ao fluxo de ar que tangencia a cobertura.

Melhor desempenho: **G04**

2) Dimensão das aberturas de entrada e saída de ar: aumento das aberturas de saída de ar, pois aumentam a vazão de ar na saída do edifício. Nesse caso o CS2 tem melhor desempenho quando possui geometria aerodinâmica (G04). Ressalta-se que o aumento da abertura de entrada de ar também proporciona um bom desempenho (CA2 + G04).

Melhor desempenho: **CS2 + G04**

3) Número de sheds na cobertura/Profundidade do edifício: uso de edifícios com menor número de sheds e, conseqüentemente, menor profundidade (3 sheds), pois incrementa a sucção do ar interno para fora do edifício e, com isso, aumenta a velocidade do fluxo de ar no espaço interno.

Melhor desempenho: **caso com 3 sheds**

4) Edifícios com maior profundidade: aumento da distância entre os sheds juntamente com o aumento das aberturas de saída do ar (sheds). Recomenda-se novamente o uso de geometrias aerodinâmicas (G04).

Melhor desempenho: **CS13 + G04**

5) Edifícios com maior profundidade: se for aumentar apenas a distância entre os sheds, ou a distância com o desalinhamento entre esses dispositivos, sem aumentar as aberturas de saída, recomenda-se mantê-los mais próximos entre si, em virtude da maior área total das aberturas de saída de ar (CS7).

Melhor desempenho: **CS7 + G04**

6) Edifícios com maior profundidade: o uso de geometrias aerodinâmicas (G04). No entanto, a geometria em dente-de-serra teve um desempenho similar, o que possibilita seu uso com o aumento da dimensão das aberturas de saída. Assim, tem-se a redução de custos para a execução de uma cobertura curva.

Melhor desempenho: **CS13 + CR**

Melhor desempenho: **CS2 + G04**

Sheds EXTRATORES de ar:
caso final com melhor desempenho

Geometria aerodinâmica - G04
Edifício com menor profundidade (3 sheds)
Aberturas de saída de ar com maiores dimensões (sheds)

Melhor desempenho: **CS2 / CA2 + G04**

Caso de edifícios com menor profundidade (3 sheds)

Geometria aerodinâmica - G04
Abertura de entrada de ar com maior dimensão
Abertura de saída de ar com maior dimensão

Sheds EXTRATORES e CAPTADORES:
casos com bons desempenhos

Sheds CAPTADORES de ar: soluções de melhor desempenho

1) Geometria: uso de geometrias aerodinâmicas de formato contínuo, sem interrupções ou obstáculos ao fluxo de ar que tangencia a cobertura.

Melhor desempenho: **G03 / G04**

2) Dimensão das aberturas de entrada e saída de ar: aumento das aberturas de saída de ar, pois aumentam a vazão de ar na saída do edifício. Nesse caso o CA2 tem melhor desempenho quando possui geometria aerodinâmica (G03 e G04).

Melhor desempenho: **CA2 + G03 / CA2 + G04**

3) Número de sheds na cobertura/Profundidade do edifício: uso de edifícios com menor número de sheds e, conseqüentemente, menor profundidade (3 sheds), pois, apesar do caso com 7 sheds aumentar o número de aberturas de entrada de ar, a captação continuou ocorrendo apenas pelo primeiro dispositivo. Assim, o fluxo de ar captado pela cobertura atinge a mesma distância interna, o que proporcionou um fluxo interno com baixas velocidades na zona de ocupação dos usuários.

Melhor desempenho: **caso com 3 sheds**

4) Edifícios com maior profundidade: aumento da distância entre os sheds, uma vez que tornam as aberturas a sotavento mais efetivas para a captação do ar. Recomenda-se novamente o uso de geometrias aerodinâmicas (G03 e G04).

Melhor desempenho: **CS11 + G03 / CS11 + G04**

5) Edifícios com maior profundidade: aumento da distância entre os sheds juntamente com o aumento das aberturas de entrada do ar (sheds). Recomenda-se novamente o uso de geometrias aerodinâmicas (G03 e G04).

Melhor desempenho: **CS13 + G03 / CS13 + G04**

6) Edifícios com maior profundidade: outro parâmetro que melhora o desempenho de sheds captadores é aliar o aumento da distância entre os sheds com o desalinhamento desses dispositivos, intercalando-os em 2 fileiras. Recomenda-se novamente o uso de geometrias aerodinâmicas (G03 e G04).

Melhor desempenho: **CAD3 + G03 / CAD3 + G04**

Melhor desempenho: **CA2 + G03 / CA2 + G04**

Sheds CAPTADORES de ar:
caso final com melhor desempenho

Geometria aerodinâmica - G03 e G04
Edifício com menor profundidade (3 sheds)
Aberturas de saída de ar com maiores dimensões (abertura A1)

Melhor desempenho: **CS13 + G04**

Caso de edifícios com maior profundidade (7 sheds)

Geometria aerodinâmica - G04
Aumento da distância entre os sheds
Aumento da dimensão das aberturas dos sheds

Esses parâmetros apresentaram um bom desempenho tanto para extração quanto para captação do ar. O fato de apresentarem um bom comportamento para essas duas situações, é interessante quando alterações no entorno (inclusão de vegetações, construção de novos edifícios, alterações climáticas, entre outros), influenciam na direção dos ventos externos. Sendo assim, esses modelos são aqueles que apresentam a maior viabilidade de uso em situações que exigem uma adaptação às mudanças dos ângulos de incidência dos ventos externos.

Considerações finais

capítulo 6

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foram apresentados resultados numéricos e experimentais sobre o desempenho de *sheds* extratores e captadores de ar, com relação à ventilação natural. A análise se deu principalmente através de estudos paramétricos por meio de simulações CFD. Com os resultados foram identificados parâmetros projetuais e climáticos que proporcionam melhor desempenho para extração e/ou para captação do ar. Com base nesses resultados, elaborou-se um fluxograma final com possíveis recomendações para uso de *sheds* extratores e captadores, fornecendo diretrizes que irão contribuir para o uso desses dispositivos durante a fase de desenvolvimento do projeto. A seguir são apresentadas as principais conclusões desse trabalho de pesquisa.

6.1 O USO DE SOFTWARES CFD EM ANÁLISES DE VENTILAÇÃO NATURAL

O uso da simulação computacional é uma ferramenta auxiliar de grande importância que permite a análise prévia de fatores que podem interferir na qualidade dos projetos. Um dos estágios mais importantes de uma simulação CFD é a definição da malha computacional, pois, exerce uma grande influência na confiabilidade dos resultados. Tanto o nível de convergência como os valores de y^+ são parâmetros que indicam a qualidade dessa malha, sendo imprescindível a realização de testes para atingi-los. Através desse trabalho notou-se a dificuldade em atingir valores de y^+ sugeridos pelo manual do CFX e por Cost (2004), pois, estes são bastante reduzidos o que dificulta o fechamento das soluções. Por outro lado, testes realizados sobre a influência dos valores de y^+ nos Cps nas aberturas dos modelos, mostraram que a redução dos seus valores não exerceu uma diferença significativa nos valores de Cps, sendo registradas variações de no máximo 0,1, o que não altera significativamente o fluxo de ar interno. Sendo assim, conclui-se que o valor de y^+ não mostrou uma influência tão expressiva nos resultados como o nível de convergência e as condições de contorno, já discutidos em diversas pesquisas científicas. No entanto, ressalta-

se a necessidade de um maior número de testes e uma discussão mais aprofundada sobre a influência desses e de outros parâmetros nos resultados numéricos, buscando contribuir na redução de problemas no fechamento das soluções.

6.2 VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS COM OS EXPERIMENTAIS

O uso das simulações CFD é uma ferramenta eficaz e vantajosa na definição de estratégias durante a fase de desenvolvimento do projeto. No entanto, a verificação da confiabilidade dos resultados numéricos através de métodos experimentais é fundamental. Com relação aos testes de verificação da simulação computacional com o túnel de vento realizados nesse trabalho, tanto os resultados quantitativos quanto os qualitativos apresentaram uma concordância adequada. Com relação às análises quantitativas, a maioria dos pontos monitorados apresentaram erros inferiores a 10%, sendo registradas divergências maiores em poucos pontos. No entanto, os resultados foram compatíveis com o que tem sido encontrado na literatura e fenomenologicamente as duas ferramentas apresentaram a mesma tendência, o que comprova seus desempenhos similares e coerentes. O mesmo ocorreu com a análise qualitativa, onde as imagens apresentaram uma boa concordância com relação à trajetória do fluxo de ar, para todos os ângulos de incidência dos ventos externos analisados. Diante disso, a compatibilidade dessas ferramentas para estudos de ventilação natural foi reafirmada. Por fim, ressalta-se que é fundamental a realização de mais testes de validação desses procedimentos como forma de organizar as futuras simulações e obter resultados precisos.

6.3 SHEDS EXTRATORES E CAPTADORES DE AR PARA VENTILAÇÃO NATURAL

Com relação às simulações computacionais, os resultados mostraram que o desempenho dos *sheds* é fortemente influenciado pela velocidade e pelos ângulos de incidência dos ventos externos. Nota-se claramente que a ventilação natural através de *sheds* pode ser eficaz, desde que devidamente projetados, ressaltando a necessidade de orientar o projeto de maneira adequada aos ventos dominantes do local em que a

edificação será implantada. Aliado a esses fatores a alteração de diferentes parâmetros projetuais também exercem uma influência significativa no desempenho da ventilação natural dos espaços internos.

Foi possível notar que existem diferenças nos parâmetros projetuais para um shed extrator e para um shed captador de ar e que é possível otimizar o uso da ventilação natural através desses dispositivos. No entanto, ressalta-se que alguns parâmetros apresentaram bons desempenhos nas duas situações analisadas.

Com relação aos *sheds* extratores, o uso de geometrias aerodinâmicas apresentou um melhor desempenho uma vez que reduzem o efeito de separação, ocasionando o aumento da velocidade dos ventos e uma queda mais significativa nos valores de Cps nas aberturas dos *sheds*. Nesse caso, G04 se destacou apresentando um desempenho significativamente superior. Outro fator de grande influência do desempenho dos extratores foi o aumento das aberturas de saída de ar, que incrementaram significativamente o fluxo de ar interno. A maior vazão volumétrica é obtida quando as aberturas situadas a sotavento do edifício são maiores. No entanto, ressalta-se também o bom desempenho quando ocorre o aumento da abertura de entrada de ar, uma vez que o fluxo de ar é admitido no ambiente com menor perda de carga localizada, devida à obstrução, resultando em um maior aproveitamento dos ventos externos no espaço interno.

O uso de edifícios com menor número de *sheds* e, portanto, menor profundidade também apresentou um melhor desempenho para os extratores. Apesar do incremento de *sheds* na cobertura aumentar o número de aberturas de saída, tem-se uma redução no diferencial de pressão entre as aberturas que diminui, principalmente, a renovação do ar no ambiente interno. Isso ocorre, pois, os Cps nos *sheds* próximos a face barlavento, possuem valores mais negativos, devido ao ar que tangencia esses dispositivos apresentar maiores velocidades. À medida que vai se afastando dessa face, o vento tem uma redução na sua velocidade o que diminui os valores de Cps.

Quando forem utilizar edifícios com maior profundidade (caso com 7 *sheds*), recomenda-se o aumento da distância entre os *sheds* juntamente com o aumento das aberturas de saída de ar (*sheds*), pois essa configuração possibilitou o melhor desempenho

da ventilação natural. O aumento isolado da distância entre os *sheds* ou o aumento da distância com o desalinhamento desses dispositivos reduzem significativamente a área total das aberturas de saída de ar e, com isso, tem-se o registro da passagem do fluxo nessas aberturas com velocidades reduzidas, o que indica a baixa extração do ar pela cobertura e reduzidas taxas de renovação de ar no ambiente interno. Para essas situações é melhor então manter os *sheds* mais próximos entre si, em virtude da maior área total das aberturas de saída do ar. Nota-se claramente que a área total das aberturas de saída do ar é o parâmetro projetual que exerce a maior influência no desempenho da ventilação natural para esses dispositivos como extratores de ar.

Para os *sheds* captadores, o uso de geometrias aerodinâmicas também apresentou um melhor desempenho para a ventilação natural. Fica claro também que o uso de edifícios com menor profundidade possibilita um melhor desempenho, pois, embora o aumento da profundidade do edifício tenha aumentado o número de *sheds* na cobertura e, com isso, as aberturas para a entrada de ar, nem todas se tornam efetivas para a captação do ar, devido à sombra de vento gerada pelo ar que tangencia os *sheds* à barlavento. No caso com 7 *sheds*, a captação continuou ocorrendo apenas pelo primeiro shed, conforme ocorria no caso com 3 *sheds*, sendo que o fluxo captado é extraído pelos outros dispositivos, não ocorrendo um incremento do ar na zona de ocupação dos usuários.

Assim como nos *sheds* extratores, novamente, tem-se que o aumento da abertura de saída de ar proporciona um incremento na velocidade do ar interno. Já o aumento das dimensões das aberturas de entrada de ar (*sheds*) ocasionou um leve incremento nas taxas de renovação, mas significativamente inferior ao aumento da abertura de saída de ar (sotavento). O incremento isolado das dimensões das aberturas de entrada de ar (*sheds*), sem a alteração de outros parâmetros projetuais, como a distância e o alinhamento entre os *sheds*, não tornam as aberturas posteriores efetivas para a entrada do ar e assim o incremento da velocidade do fluxo de ar interno não é tão significativo, como com o aumento da abertura de saída do ar.

Com relação ao edifício com maior profundidade, recomenda-se o aumento da distância entre esses dispositivos, pois, apesar do aumento da distância reduzir o número de

aberturas de entrada de ar, os maiores espaços entre os *sheds* possibilitaram uma recuperação da velocidade do vento no nível da cobertura, permitindo a captação pelos *sheds* posteriores, o que não ocorre com os *sheds* mais próximos entre si, cuja entrada de ar ocorre apenas pelo primeiro shed. O desempenho fica ainda maior se o aumento da distância entre esses dispositivos for aliado ao aumento das aberturas de entrada de ar. Além disso, o aumento da distância entre os *sheds* em conjunto com a alteração do alinhamento desses dispositivos, intercalando-os em duas fileiras na cobertura, torna, novamente, as aberturas de entrada de ar mais efetivas para a captação, melhorando o desempenho do sistema. Para a captação, ressalta-se que a diferença entre as geometrias foi praticamente insignificante, o que reforça que parâmetros projetuais como o aumento do número de *sheds* e da profundidade do edifício influenciam mais no desempenho da ventilação natural nos espaços internos do que unicamente a mudança no formato desses dispositivos.

Quando os ventos incidem paralelamente às aberturas (90°), foi registrado o pior desempenho em todos os casos analisados, com zonas de estagnação do ar ao longo de todo o espaço interno. Além disso, notaram-se desempenhos similares entre os diferentes parâmetros de projeto analisados, indicando que, para essa situação, o uso dessas estratégias sem uma orientação adequada aos ventos dominantes não se mostraram como parâmetros projetuais influentes no desempenho da ventilação natural do edifício. A implantação do edifício no lote se apresenta como um fator decisivo no desempenho da ventilação do ambiente interno.

Por fim, os *sheds* podem funcionar como extratores ou captadores de ar, dependendo da sua orientação em relação aos ventos dominantes. Conforme apresentado, o uso desses dispositivos, em cada uma dessas situações, requer a adoção de parâmetros projetuais específicos que otimizem o uso da ventilação natural nos ambientes internos. No entanto, notou-se que algumas configurações apresentaram um bom desempenho para ambas as situações. Nesses casos, o desempenho adequado tanto para a extração quanto para a captação é interessante quando as mudanças no entorno

alteram a direção dos ventos externos, o que representa uma maior viabilidade de uso em situações que exigem uma adaptação às mudanças dos ângulos de incidência dos ventos.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através dessa pesquisa foi observado que o desempenho de *sheds* extratores e captadores de ar, com relação à ventilação natural, podem fornecer uma grande contribuição para o desenvolvimento da área de projeto arquitetônico e conforto ambiental. Apresentam-se a seguir, algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

- 1) Avaliação do desempenho de *sheds* extratores e captadores de ar sobre a influência do efeito chaminé, a fim de identificar como os diferentes parâmetros projetuais se comportam sobre a diferença da temperatura interna e externa.
- 2) Avaliação da influência de outros parâmetros projetuais, como a diferença de altura entre os *sheds*, no desempenho desses dispositivos como extratores e captadores de ar.
- 3) Avaliar diferentes estratégias projetuais quando o vento incidir paralelamente as aberturas (90°), visando melhorar o desempenho da ventilação natural através de edifícios com *sheds* implantados nessa direção.
- 4) Avaliação do desempenho do sistema com divisórias internas, uma vez que as obstruções ao escoamento interno influenciam no nível de ventilação natural global e em cada espaço interior.

Referências bibliográficas

capítulo 7

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acervo CTRS** - Centro de Tecnologia da Rede Sarah. 2008
- ADAMS, S.; BECKER, M.; KRAUSS, D.; GILMAN C. M. Not a Dry Subject: Optimizing Water Trombe Walls. In: SOLAR 2010 Conference Proceedings, American Solar Energy Society. **Anais...**, 2010.
- AFONSO, C.; OLIVEIRA, A. Solar chimneys: simulation and experiment. **Energy and Buildings** 2000; 32: 71-79, 2000.
- ALLARD, F. **Natural ventilation in buildings: a design handbook**. London: James & James, 1998.
- ALLARD, F.; GHIAUS, C.; MANSOURI, Y. Natural ventilation for health, comfort and energy efficiency. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 7, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ENCAC, 2003. 21p. CD-ROM.
- ALLOCA, C.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L. R. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 35: 785-795, 2003.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE 7 – Minimum Desing Loads for Building and others structures**. Virginia, 1995.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE handbook: fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 2005.
- ANDERSON, J. **Computational fluid dynamics**. New York: McGranHill, 1995.
- ANSYS CFX**. Disponível em: <http://www.ansys.com/products/cfx.asp#>. Acesso em out. 2011.
- ARAÚJO, C. V. de A. **Análise de componentes arquitetônicos para potencialização da ventilação natural com ênfase em captadores de vento**. 2011. 130 f. Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.
- ARCH DAILY**. Disponível em: <[www. archdaily.com](http://www.archdaily.com)> Acesso em 11/10/2012.
- ASCE Wind tunnel model studies of buildings and structures. **Manuals and reports on engineering practice**. ASCE. New York, 1987.
- ASFOUR, O. S.; GADI, M. B. A comparison between CFD and network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. **Building and Environment**, v. 42, p. 4079-4085, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123: Força devida aos ventos nas edificações**. Rio de Janeiro, Brasil, jun, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, Set. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. ABNT: Rio de Janeiro, Brasil, set, 2003.

- AUGENBROE, G. Building simulation trends going into the New Millennium. In: Building simulation, 7. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2001.
- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 1170.2. Structural Design Actions Part 2: Wind Actions**. Australian, 1989.
- AWBI, H. B. **Ventilation of buildings**. London: E & FN Spon, 1998.
- BAHADORI, M. N. Viability of wind towers in achieving Summer comfort in the hot arid regions of the middle east. In: Proceedings of the third world renewable energy congress, Reading, UK, 11-16 september, P.879-892. **Anais...** 1994.
- BALBASTRO, G. C.; SONZOGNI, V. E. Uso de CFD para estudo de pressões del viento em cubiertas curvas aisladas. **Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño em ingeniería**, v. 28(1): 49-54, 2012.
- BASSIOUNY, R.; KOURA, N. An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 40, n.5, p. 865-873, Mai., 2008.
- BHATNAGAR, N. K.; GUPTA, P. K.; AHUJA, A. K. Wind pressure distribution on low-rise building with saw-tooth roof. VI National Conference on Wind Engineering, **Anais...**, 2012.
- BITTENCOURT, L. S. **Ventilation as a cooling resource for warm-humid climates: na investigation on perforated block wall geometry to improve ventilation inside low-rise building**. Environment and Energy Studies programme. London: Architectural Association Graduate School, AA, 1993.
- BITTENCOURT, L. S.; DUARTE, E.; NASCIMENTO, A.; CRUZ, D. F. M. O uso de captador de vento em arquitetura: o caso do edifício do núcleo de pesquisa multidisciplinar da UFAL. In: XVII Congresso Brasileiro de Arquitetos. Rio de Janeiro: IAB. **Anais...** 2003.
- BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. **Introdução a ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2006.
- BITTENCOURT, L. S.; SACRAMENTO, A. S.; CÂNDIDO, C.; LEAL, T. Estudo do desempenho do peitoril ventilado para aumentar a ventilação natural em escolas de Maceió/AL. **Revista ambiente construído**, Porto Alegre, v.7, n.3, p. 59-69, jul./set., 2007.
- BITTENCOURT, L.; S. CÂNDIDO, C. **Ventilação natural em edificações**. Rio de Janeiro: UFAL, 2010.
- BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J. CFD simulation of the Atmospheric Boundary Layer: wall function problems. **Atmospheric Environment**, v. 41, n.2, p. 238-252, 2007.
- BRANDÃO, R. S. **As interações espaciais urbanas e o clima**. Tese (doutorado em arquitetura e urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- BROWN, G. Z.; DEKAY, M. **Sol, vento e luz: estratégias para projeto de arquitetura**. 2ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- BURNETT, J.; BOJIC, M.; YIK, F. Wind-induced pressure at external surfaces of a high-rise residential building in Hong Kong. **Building and Environment**, v. 40: 765-777, 2005.

- CALAUTIT, J. K.; HUGHES, B. R. Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower. **Building and environment**, v. 80, p. 71-83, 2014.
- CÂNDIDO, C.; DEAR, R. J. de; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and environment**, v. 45, p. 222-229. 2010.
- CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L.; DEAR, R. J. de. Aplicabilidade dos limites de velocidade do ar para efeito de conforto térmico em climas quentes e úmidos. **Revista ambiente construído**, Porto Alegre, v. 10, n.4, p.59-68, out/dez 2010.
- CARACOGLIA, L. JONES, N. P. Analysis of full-scale wind and pressure measurements on a low-rise building. **J. Wind Eng. Ind. Aerodyn**, v. 97: 157-73, 2009.
- CARVALHO, P. **Geração eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003.
- CASTANHO, A. F. S. **Avaliação experimental do conforto pedestre em ambiente urbano**. Dissertação (mestrado em engenharia civil). Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2012.
- CAVALCANTI, F. A. M. **Chaminé solar como alternativa para incrementar a ventilação natural em espaços internos**. Dissertação (mestrado em construção civil). Pós-Graduação em construção civil, Universidade Federal de São Carlos, 2010.
- CAVALCANTI, F. S.; LUKIANTCHUKI, M. A.; ANDRADE, N. C.de; PAIVA, R. C.; CARAM, R. M. Parede trombe como estratégia passiva promotora de eficiência energética em São Carlos-SP. IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2011, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: CBEE, 2011. CD-ROM.
- CAVALCANTI, F. ; RORIZ, M.; Ventilação Natural em espaços internos a partir da utilização de chaminé solar. Encontro Nacional e Latino-Americano sobre conforto no ambiente construído, 2011, Búzios. **Anais...** Búzios: ENCAC, 2011. CD-ROM
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 1ºed. McGraw-Hill Brasil, 2007.
- CHANDRA, S. **Ventilative cooling**. In: COOK, J. (Ed.) Passive cooling. Cambridge: MIT, 1989.
- CHEL, A., NAYAK, J.K., KAUSHIL, G. Energy conservation in honey storage building using Trombe wall, **International Journal of Energy and Building**, Vol.40, 2008.
- CHEN, Q. Y. Using computational tools to factor wind into architectural environment design. **Energy and Building**, v. 36, p. 1197-1209, oct, 2004.
- CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: a method overview and recent applications. **Building and environment**, 44 (2009) 848-858. 2009.
- CHENG, C. K.; LAM, K. M.; DEMIRBILEK, F. N. Effects of building wall arrangements on wind-induced ventilation through the refuge floor of a tall building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96: 656-664, 2008.
- COOK, N. J. The designer's guide to wind loading of building structures: static structures pt.2. **BRE Report, vol 1**. Butterworth-Heinemann Ltd. 1990.

COST. Cost Action 14: **Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment**. Bruxelas: COST, 2004.

COSTA, L. **Aproveitamento da ventilação natural nas habitações: um estudo de caso na cidade de Aracaju – SE**. Dissertação (mestrado em tecnologia da arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação**. Dissertação (mestrado em tecnologia da construção) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. Pressure coefficient simulated by CFD for wind-driven ventilation analysis. **Proceedings Building Simulation**, Beijing, China, 2007.

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. **Building and environment**, v. 10:2027-2036, 2009

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients. **Energy and Building**, v. 42 881 – 888, 2010.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de Pressão externos nas aberturas de um edifício. **Revista ambiente construído**, Porto Alegre, v.11, n.1, p. 145-158, 2011.

CUNHA, L. J. B. de F. **Análise de métodos para aplicação de ventilação natural para projeto de edificações em Natal – RN**. Dissertação (mestrado em arquitetura e urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

DEHGHAN, A. A.; KAZEMI ESFEH, M. DEHGHAN MANSHADI, M. Natural ventilation characteristics of one-sided wind catchers: experimental and analytical evaluation. **Energy and building**, v. 61, 366-377, 2013.

DING W, HASEMI Y, YAMADA T. Natural ventilation performance of a double-skin façade with a solar chimney. **Energy and Buildings** 2005; 37: 411-418, 2005.

EDWARDS, B.; HYETT, P. **Guía básica de la sostenibilidad**. Barcelona, G. Gilli, 3°. Ed, 2005.

ELSADIG, A. K. **Energy Efficiency in commercial Buildings**. (Dissertation presented to Master Course of Science Sustainable Engineering) - University of Strathclyde, Glasgow, 2005.

ENCYCLOPAEDIA Iranica. Disponível em: < www.yazd.com>, acesso em 03/05/2011

ETHERIDGE D. W.; SANDBERG, M. **Building ventilation: theory & measurement**. Chichester, John Wiley & sons, 1996.

EVOLA, G.; POPOV, V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. **Energy and Building**, v. 38 (5), 491-501, 2006.

EUROCODE Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: **General actions – wind actions**. The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC, 2010.

FEUSTEL, H. E.; SHERMAN, M. H. A simplified model for predicting air flow in multizone structures. **Energy and Buildings**, v.13, n.13, p.217-230, Jun. 1989.

- FIGUEIREDO, C. A. **Ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo: Limites e possibilidades do ponto de vista do conforto térmico**. Dissertação (mestrado em tecnologia da construção) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: EDUSP, 2000.
- FREIRE, M. R. Iluminação natural de salas de aula: O caso das escolas "FAEC" em Salvador – BA. **Arqtexto1**. PROPAR: University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.
- FREIXANET, V. A. F.; VIQUEIRA. **Clima y arquitectura**. México: UAM, 2004.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel. 5 ed, 2000.
- GANDEMER, J.; BARNAUD, G. **Ventilation naturelle des habitations sous climat tropical humide: Approach aerodynamique**. Report for the CSTB. Nantes, 1989.
- GASCH, R. Windkraftanlagen: Grundlagen und Entwurf. B. G. Teubner, 1996.
- GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. London: Applied Science Publishers, 1976.
- GRATIA, E.; HERDE, A. de. Natural ventilation in a double-skin facade. **Energy and building**, v. 36, p.137-146, oct. 2004.
- HARRIES, A. Notas de aula. In: **Workshop: CFX – FAU/USP**. São Paulo, 2005.
- HEISELBERG, P.; LI, Y.; ANDERSEN, A.; BJERRE, M. CHEN, Z. Experimental and CFD evidence of multiple solutions in a naturally ventilated building. **Indoor Air**, Feb; 14, 43-54, 2004.
- HEISELBERG, P.; SANDBERG, M. (2006). Evaluation of discharge coefficients for window openings in wind driven natural ventilation. **International Journal of ventilation**, Vol. 5 (1), 43-52, 2006.
- HENSEN, J. L. M. **On the thermal interaction of building structure and heating and ventilation system**. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, 1999.
- HERAS, M. R.; JIMÉNEZ, M. J.; SAN ISIDRO, M. J.; ZARZALEJO, L. F.; PÉREZ, M. Energetic analysis of a passive solar design, incorporated in a courtyard after refurbishment, using an innovative cover component based in a sawtooth roof concept. **Solar energy**. N. 78, p. 85-96, 2005.
- HIEN, W. N. et al. The use of performance-based simulation tools for building design and evaluation – a Singapore perspective. **Building and environment**, v. 35, p. 709-736. 2000.
- HIRANO, T.; KATO, S.; MURAKAMI, S.; IKAGA, T.; SHIRAISHI, Y. A study on a porous residential building model in hot and humid regions: Part 1 – the natural ventilation performance and the cooling load reduction effect of the building model. **Building and Environment**, v. 41: 21-32, 2006.
- HOLMES, J. D. Wind loading of saw-tooth roof buildings – I. Point pressures. **Internal Rep. No. 83/17**. CSIRO. Div. of Building Research. Highett, Australia, 1983.
- HOLMES, J. D. Wind loading of saw-tooth roof buildings – II. Panel pressures. **Internal Rep. No. 84/1**. CSIRO. Div. of Building Research. Highett, Australia, 1984.

- HOLMES, J. D. Wind loading of multi-span buildings. **First national structural Engineering Conf., Institution of Engineers**. Australia, Melbourne, Australia, 1987.
- HONG, T., et al. Building simulation: an overview of developments and information sources. **Building and environment**, v.35, n.4, p.347-361, 2000.
- HOOFF, T. V.; BLOCKEN, A.; AANEN, B. B. A Venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. **Building and Environment**, v. 46, 1797-1807, 2011.
- HOSEGGEN, R. et al. Building simulation as na assisting tool iin decision making case study: with or without a double-skin façade? **Energy and building**, v. 40, p. 821-827, may 2008.
- HUANGA, S. et al. Numerical evaluation of wind effects on a tal steel building by CFD. **Journal of constructional steel Research**, volume 63, Issue 5, pages 612-627, 2007.
- Instituto Nacional de Meteorologia. **INMET**. 2011
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. (Trad. Horácio Macedo) 3. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1992.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – Inmet**. Disponível em < <http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em 21/11/2011.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment instruments for measuring physical quantities**. 1998.
- JIANG, Y.; CHEN, Q. Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation. **Building and Environment** 37, 379-386, 2002.
- 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. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 91, 331-353, 2003.
- JREIJRY, D. et al. Control of ventilation in buildings using SIMBAD and HVAC. In: Toolbox 8th International IBPSA Conference, 2003, Eindhoven, Netherlands. **Anais...** Eindhoven, Netherlands. August 2003.
- KARABUCHI, T. et al. Local Dynamics Similarity Modelo f Cross-Ventilation Paet 1 – Theoretical Framework. **The international Journal of Ventilation**, v.2, Issue 4, março, 2004.
- KATO, S.; MURAKAMI, S. MOCHIDA, A. AKABAYASHI, S.; TOMINAGA, Y. Velocity-pressure field of cross ventilation with open Windows analyzed by wind tunnel and numerical simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 44, 2575-2586, 1992.
- KHAN, N. et al. A review on wind driven ventilation techniques. **Energy and Building**, v.40, p. 1586-1604, 2008.
- KIM, T.; KIM, K.; KIM, B. S. A wind tunnel experiment and CFD analyss on airflow performance of enclosed-arcade markets in Korea. **Building and environment**, v.45, p. 1329-13384, 2010.
- KLEIVEN, T. **Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities**. Thesis (Doctor of Philosophy in architecture) - Norwegian University of science and technology, Trondheim, 2003.

- KOBAYASHI, T.; SANDBERG, M.; KOTANI, H.; CLAEISSON, L. Experimental investigation and CFD analysis of cross-ventilated flow through single room detached house model. . **Building and environment**, v. 45, 2723-2734, 2010.
- 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 de Tecnologia do Ambiente Construído e Qualidade no Processo Construtivo, 27-30 de Abril, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1998.
- LAGO, A. A. C. do et al. **Olhares: visões sobre a obra de João Filgueiras Lima**. Cláudia Estrela Porto, organização. Brasília: Editora da Universidade de Brasília. 176p, 2010.
- LAM, K. M.; LEUNG, M. Y. H.; ZHAO, J. G. Interference effects on wind loading of a row of closely spaced tal building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96: 562-583, 2008.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. Rio de Janeiro: PROCEL, 2014. 3° ed.
- LAMENHA, M.; BATISTA, J.; BITTENCOURT, L. Análise do projeto padrão de escolar técnica do MEC sob diferentes incidências de vento. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC: Maceió. **Anais...** Maceió, 2014.
- LAMENHA, M.; BITTENCOURT, L. (2014). O desempenho de dutos de ventilação natural em edifícios de apartamentos. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC: Maceió. **Anais...** Maceió, 2014.
- LATORRACA, G. **João Filgueiras Lima, Lelé**. Lina Bo e P. M. Bardi Institute, São Paulo, 1999.
- LEÃO, A. J. L. **Acervo de fotos** do Eng. Antônio José Leão. 2011.
- LECHNER, N. **Heating, cooling, lighting: Design methods for architects**. New York: John Wiley, 1991.
- LEITE, C. G. **Alterações da ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da avenida litorânea de São Luís/MA** - Dissertação (mestrado em arquitetura e urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- LEITE R. C. V. **Fortaleza: terra do vento. A influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido**. Dissertação (mestrado em arquitetura e urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- LEITE, R. C. V.; FROTA, A. B. Procedimentos para determinação de coeficientes de pressão em diferentes condições de adensamento urbano. XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e VIII Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 2013, Brasília. **Anais...** Brasília: ENCAC, 2013. CD-ROM
- Li, L.; MAK, C. M. The assessment of the performance of a windcatcher system using computational fluid dynamics. **Building and environment**, v.42, 1135 – 1141, 2007.

LIDDAMENT, M. **Air infiltration calculation technique: an application guide**. Bracknell: Air infiltration and ventilation Centre, 1986.

LIMA, J. F. **Centro de Tecnologia da Rede Sarah**. Brasília: Sarah Letras, São Paulo, 1999.

LIMA, A. B.; PEREIRA, F. R.; VERSAGE, R.; LAMBERTS, R. A influência de diferentes aberturas zenitais na distribuição da luz natural e na redução do consumo de energia elétrica. XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Búzios: ENCAC. CR-ROM, 2011.

LIMA, J. F. **Arquitetura – uma experiência na área de saúde**. São Paulo: MCB e Romano Guerra, 2013.

LÔBO, D. G. F.; BITTENCOURT, L. S. A influência dos captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas em climas quentes e úmidos. **Revista do ambiente construído**, Porto Alegre, V.3, n.2, p.57-67, abr./jun. 2003.

LOPES, A. M. S. **Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano: vento, ilha de calor de superfície e balanço energético**. Tese (Doutorado em Geografia Física). Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003.

LUKARIANTCHUKI, M. A. **A evolução das estratégias de conforto térmico e ventilação natural de João Filgueiras Lima, Lelé: hospitais Sarah de Salvador e do Rio de Janeiro**. 2010. 324 f. Dissertação (mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LUKARIANTCHUKI, M. A.; CARAM, R. M. The use of *sheds* to promote the natural ventilation: the work of Brazilian architect João Filgueiras Lima, Lelé. In: Windsor Conference, London. **Anais...** London, 2012.

MACIEL, A. A. **Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico**. Tese (doutorado em arquitetura e urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

MAEREFAT, M.; HAGHIGHI, A. P. Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney. **Renewable Energy**, v. 35: 2316-2324, 2010.

MALISKA, C. R. Issues on the integration of CFD to building simulation. In: Building simulation, 7. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2001.

MARCONDES, M.; UMAKOSI, E. Ferramentas computacionais para avaliação ambiental de áreas urbanas: estudo de caso em São Paulo. In: IX Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto, 2007.

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.

MARQUES DA SILVA, F. V.; SARAIVA, J. G. **Determination of pressure coefficients over simple shaped building models under different boundary layers**. PASCOOL. Modelling Development Group, CEC, 1993.

- MARQUES DA SILVA, F. V.; SARAIVA, J. G. **Determination of pressure coefficients over real shaped building models**. PASCOOL. Modelling Development Group, CEC, 1994.
- MARQUES DA SILVA, F. V. Aplicação da ventilação natural e mista em edifícios. As acções indutoras da ventilação natural. In: VIEGAS, J. (Org.). **Ventilação e qualidade do ar interior**. Lisboa: LNEC, 2010. p. 7-28.
- MARUYAMA, t. Surface and inlet boundary conditions for the simulation of turbulent boundary layer over complex rough surfaces. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** v. 81, 311-322, 1999.
- MATHUR, J.; MATHUR, S.; ANUPMA. Summer performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. **Energy and Buildings**, v.38, n.10, p. 1156-1163, out. 2006.
- MATSUMOTO, E; LABAKI, L. Túnel de vento. In: KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia**. Editora Singer, São Paulo, 2011.
- MAZON, A. A. O.; SILVA, R. G. O.; SOUZA, H. A. Ventilação natural em galpões: o uso de lanternins nas coberturas. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 2, Apr/June, 2006.
- MELARAGNO, M. **Wind in architectural design**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
- MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. da C. O uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Revista ambiente construído**, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez, 2005.
- 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, 137-149, 2013.
- MORAIS, J. M. S. C.; LABAKI, L. Ventilação natural em edifícios do “programa minha casa minha vida”: alerta aos projetistas. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO e VIII ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Brasília: ENCAC, 2013. CD-ROM.
- MORAIS, J. M. S. C.; LABAKI, L. (2014). Projetos de edifícios multifamiliares do “minha casa minha vida”: análise do ponto de vista da ventilação natural. In: XII Encontro Nacional de Tecnologia no ambiente construído. Maceió. **Anais...** Maceió: ENCAC, 2014. CD-ROM.
- MUNSON B.; YOUNG, D.; OKIISHI, T. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. Volumes 1 e 2 – Versão SI. São Paulo: Edgard Blucher, 1997.
- NEYMARK, J.; JUDKOFF, R. Hvac Bestest: a procedure for testing the ability of whole-building energy simulation programs to model space conditioning equipment. In: **Building simulation conference**. Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- NETO, R. H. C.; TIBIRIÇÁ, A. M. B.; TIBIRIÇÁ, A. C. G.; CAMPOS, J. C. C. Um roteiro para simulação CFD de ventilação natural por ação dos ventos em edificações. In: XI Encontro Nacional e Latino-Americano sobre conforto no ambiente construído e VII Encontro Latino

Americano de Conforto no Ambiente Construído. Búzios. **Anais...** Búzios: ENCAC, 2011. CD-ROM.

NEVES, L. O. **Chaminé solar como elemento indutor da ventilação natural em edificações**. Tese (doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

NEVES, L. O.; RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. **Revista ambiente construído**. Porto Alegre, v. 12, n. 1, 2012.

NICOL, F. Adaptive thermal comfort Standards in the hot-humid tropics. **Energy and building**, v. 36, n.7, p. 628-637, jul. 2004.

NIKAS, K. S.; NIKOLOPOULOS, A. Numerical study of a naturally cross-ventilated building. **Energy and Building**, v. 42, 422-434, 2010.

NORTON, T.; GRANT, J.; FALLON, R. SUN, D. W. Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor environmental homogeneity. **Building and Environment**, v. 45, 983-995, 2010.

ONG; CHOW, C. C. Performance of a solar chimney. **Solar energy**, v.74, n.1, p.1-17, jan., 2003.

PEDRINI, A.; SZOKOLAY, S. The architects approach to the project of energy efficient Office buildings in warm climate and the importance of design methods. In: Building simulation, 9. Montreal. **Anais...** Montreal, 2005.

PERÉN, J. I. M. **Ventilação e iluminação naturais na obra de João Filgueiras Lima, Lelé**. 2006. 262 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PERÉN, J. I. M.; GRECO, P.; CARAM, R. M. Análise computacional dos *sheds* da Rede de Hospitais Sarah Kubitschek utilizando o software ANSYS CFX. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Ouro Preto: ENCAC. CD-ROM, 2007.

PRATA, A. R. **Uma ferramenta computacional de avaliação da ventilação natural em projetos arquitetônicos**. Dissertação (mestrado em recursos hídricos e saneamento). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 154p, 1998.

PRATA, A. R. **Impacto da altura de edificios nas condições de ventilação natural no meio urbano**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PREVATT, D. O.; ASCE, P. E. M.; ASCE, M. B. C. Wind tunnel studies on sawtooth and monosloped roofs. **Journal of structural engineering**, v. 136:1161-1171. September, 2010.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation flow for diferente isolated building configurations: validation with tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 104-106 (2012) 408-418, 20125.

- RISÉRIO A. et al. **A arquitetura de Lelé: Fábrica e invenção**. Max Risselada e Giancarlo Latorraca, organização. São Paulo: Imprensa oficial, 2011.
- RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Relatório Interno, 2012 (a). Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em: 12 maio 2012.
- SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. **Passive cooling buildings**. James&James, 1996.
- SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS. **Passive cooling of buildings**. London: James&James (Science Publishers) Ltd, 2001.
- SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Building ventilation: the state of the art**. London: Earthscan, 2006.
- SARAIVA, J. G. **Aerodinâmica dos edifícios altos**. Tese para especialistas – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1983.
- SEIFERT, J.; LI, Y.; AXLEY, J. ROSLER, M. Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 94, 925-947, 2006.
- SHEN, J.; LASSUE, S.; ZALEWSKI, L.; HUANG D. Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls. **Energy and Buildings**, vol 39 issue 8, Science Direct, 2007.
- SHEN, X.; ZHANG, G.; BJERG, B. Comparison of different methods for estimating ventilation rates through wind driven ventilated buildings. **Energy and Building**, v. 54: 297-306, 2012.
- SPADAFORA, R. Green Building Construction and Daylighting: A chief officer's perspective. **fireengineering magazine**, 2010.
- STATHOPOULOS, T.; MOHAMMADIAN, A. R. Wind loads on low buildings with mono-sloped roofs. **J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.**, v. 23 (1-3), 81-97, 1985.
- STATHOPOULOS, T.; SAATHOFF, P. Codification of wind pressure coefficients for sawtooth roofs. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, 41-44, 1727 – 1738, 1992.
- STAVRAKAKIS, G. M.; KOUKOU, M. K. VRACHOPOULOS, M. G. MARKATOS, N. C. Natural cross-ventilation in buildings: building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. **Energy and Building**, v. 40 (9), 1666-1681, 2008.
- STRAW, M. P.; BAKER, C. J. ROBERTSON, A. P. Experimental measurements and computations of the wind-induced ventilation of a cubic structure. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 88, 213-230, 2000.
- TOLEDO, E. **Ventilação natural das habitações**. Edufal, 1999
- TOLEDO, A.; PEREIRA, F. O. R. Métodos e técnicas de visualização para a avaliação da ventilação natural pela ação do vento em edifícios. In: NUTAU – NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004.

- TOLEDO, A. M.; PEREIRA, F. O. R. O potencial da mesa d'água para a visualização analógica da ventilação natural em edifícios. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. São Pedro. **Anais...** São Pedro, 2003.
- TORRES, D.; ADELINO, T.; BITTENCOURT, L. Análise da utilização de *sheds* como estratégia passiva de ventilação em casa geminada. XII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO e VIII ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Brasília: ENCAC. CD-ROM, 2013.
- TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Revista do ambiente construído**. V.10, n.4, p.37-58, out./dez. 2010.
- TREBILCOCK, M. **The integration of environmental sustainability issues in the design process of contemporary architectural practice**. Tese (doutorado). University of Nottingham, 2007.
- TROEN, I.; PETERSEN, E. L. **European Wind Atlas**. Roskilde: Riso National Laboratory, 1989.
- Banco de dados de Cps da Universidade de Tóquio. Disponível em: <http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>.
- WAEWSAK, J.; HIRUNLABH, K.; SHIN, UC. Performance evaluation of the BSRC multi purpose Bio-Climatic roof. **Building and Environment**, v. 38: 1297-1302, 2003.
- WANG, L.; WONG, N. H. Coupled simulations for naturally ventilated rooms between building simulation (BS) and computational fluid dynamics (CFD) for better prediction of indoor thermal environment. **Building and Environment**, v. 44, p. 95 – 112, 2009.
- WIERINGA, J. (1991). Updating the davenport roughness classification. 8th International Conference on Wind Engineering. London: Ontario. Canadá. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Vol 4, pp. 357-368.
- WIREN, B. G. **Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilation losses for single-family houses**. National Swedish Institute for Building Research, 1985.
- WONG, N. H.; HERYANTO, S. The study of active stack effect to enhance natural ventilation using wind tunnel and computational fluid dynamics (CFD) simulations. **Energy and building**, v. 36, 668-678, 2004.
- YANG, T. **CFD and field testing of a naturally ventilated full-scale building**. 2004. Tese (doutorado) – School of Civil Engineering, The University of Nottingham, Nottingham, 2004.
- ZHANG, R.; ZHANG, Y.; LAM, K. P.; ARCHER, D. H. A prototype mesh generation tool for CFD simulations in architecture domain. **Building and environment**, v. 45: 2253-2262, 2010.

Apêndices

capítulo 8

8. APÊNDICES

8.1 EDIFÍCIOS COM *SHEDS* PROJETADOS PELO ARQUITETO LELÉ

Nessa seção é apresentado o levantamento de dados dos edifícios projetados por Lelé que possuem *sheds*, organizados em ordem cronológica. O levantamento resultou em 38 edifícios com *sheds*, sendo que destes, 23 possuem formatos aerodinâmicos e se encontram em destaque na tabela a seguir.

<p>1980</p>	<p>Conventos de Brotas</p> <p>Salvador - BA</p>	<p>A cobertura é em abóbadas de tijolos cerâmicos, vencendo vãos de até 5,80m. As abóbadas inclinadas criam grandes empenas construídas com tijolos cerâmicos furados, dispostos inclinados para evitar a entrada de águas de chuva. Esses panos formam um sistema de iluminação filtrada e ventilação zenital para o ambiente da igreja.</p> <div data-bbox="1574 1133 2045 1136"> </div>
-------------	---	--

Fonte: Acervo CTRS (2008); acervo da autora (2008 e 2010); Latorraca (1999); Lima (1999)

DATA	EDIFÍCIO/CIDADE	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO/DETALHAMENTO
1980	Hospital Sarah Kubitschek Brasília - DF	Criaram-se elementos pré-fabricados com 60cm de altura por 1,15m de largura, vencendo vãos variáveis e permitindo a acoplagem de peças intercambiáveis para iluminação e ventilação naturais. Nos trechos com luz zenital, o espaçamento de 1,15m entre cada elemento possibilita a conexão de nódulos tipo shed pré-fabricados em ferro-cimento. Sistemas vigas calhas de concreto: abertura zenital em ferro-cimento.
1982 - 1984	Escolas rurais Abadiânia - GO	Vigamento principal norte-sul, de modo que os sheds fiquem voltados para sul.
1984	Sede da Associação Portuguesa Brasília - DF	Primeiro projeto de cobertura em aço. Ginásio coberto em vão livre, painéis de cobertura e paredes finas em aço, contornos da fachada expressivos e seus aspectos marcaram muitos projetos posteriores.
1987	Creches MAIS Salvador - BA	Sistema construtivo em ferro-cimento da FAEC com coberturas em arco e iluminação zenital, aplicado em cerca de 20 creches no estado da Bahia.
1987	Centro comunitário e sindical de Camaçari - FAEC Camaçari - BA
1988	Escolas FAEC Salvador - BA	Foram construídas mais de 40 escolas em Salvador. Sistema construtivo em ferro-cimento com cobertura plana e iluminação zenital aplicado em cerca de cem edifícios escolares.

Fonte: Acervo CTRS (2008); acervo da autora (2008 e 2010); Latorraca (1999); Lima (1999)

DATA	EDIFÍCIO/CIDADE	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO/DETALHAMENTO
1988	Hospital Psiquiátrico de Taguatinga – FAEC Taguatinga - DF	Apesar do shed apresentar um formato ortogonal, parecido com os dispositivos das escolas, o seu desenho permite uma entrada de ar por trás do shed, formando uma corrente de ar que impulsiona a retirada do ar quente do ambiente
1990	Centros Integrados de Ensino – CIACS Brasília - DF	O programa dos CIAC's era um desdobramento da experiência dos CIEPs do Rio de Janeiro. Pela primeira vez os <i>sheds</i> são orientados a barlavento e a sotavento, se complementando no sistema de ventilação natural.
1992	Centro de Tecnologia da Rede Sarah – CTRS Salvador - BA	Os <i>sheds</i> do CTRS apresentam a mesma geometria empregada no hospital de Salvador
1993	Hospital Sarah Kubitschek São Luís - MA	O formato dos <i>sheds</i> no projeto era parecido com o de Salvador. No entanto, durante a construção esses elementos foram adaptados e construídos no sistema convencional em concreto. Assim, a geometria desses elementos ficou ortogonal e completamente diferente da de Salvador.
1994	Centro comunitário de São Luís – CTRS São Luís - MA
1994	Hospital Sarah Kubitschek Salvador - BA	Projetado nos anos 80, o Sarah de Salvador só foi concluído em 1994. Os <i>sheds</i> estão localizados a sotavento, favorecendo o efeito de sucção. Do lado externo dessas barras verticais, são fixados "septos" triangulares que reforçam a estabilidade final do sistema dos <i>sheds</i> e contribuem também para a qualidade da luz, que em alguns casos é influenciada pela cor nele aplicada.

Fonte: Acervo CTRS (2008); acervo da autora (2008 e 2010); Latorraca (1999); Lima (1999)

DATA	EDIFÍCIO/CIDADE	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO/DETALHAMENTO
1996	Tribunal de Contas da União Salvador - BA	Sheds com o mesmo formato do Hospital Sarah Kubitschek de Salvador - BA.
1996	Tribunal de Contas da União Natal - RN	A estrutura da cobertura articulada, que compreende o shed com arco "quebrado" é desenhada especialmente com base no clima local, e muda abruptamente onde o corredor se conecta com o saguão.
1997	Tribunal de Contas da União Aracaju - SE	Os sheds são ligados entre si, de modo que se cria uma estrutura fluida de cobertura que abrange o todo.
1997	Tribunal de Contas da União Belo Horizonte - MG
1997	Hospital Sarah Kubitschek Belo Horizonte - MG	A forma dos sheds é idêntica ao do Sarah em Salvador. Exceções são os vãos de alguns espaços localizados nas bordas do edifício térreo. As salas de espera e o auditório são destacados pela adoção de uma abóbada, que em um dos lados se apoia na calha do sistema do edifício e, do outro, diretamente no terreno.
1997	Ampliação do hospital Sarah de Brasília - Centro Brasília - DF

Fonte: Acervo CTRS (2008); acervo da autora (2008 e 2010); Latorraca (1999); Lima (1999)

8. Apêndices

DATA	EDIFÍCIO/CIDADE	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO/DETALHAMENTO
1997	Posto Fiscal de Estiva Estiva - MA
1998	Tribunal de Contas da União Teresina - PI	Cobertura curva instalada sobre o pátio
1998	Tribunal de Contas da União Cuiabá - MT	Sua cobertura emprega o sistema de construção desenvolvido para o grande saguão de terapia no Centro de Reabilitação no Lago Norte, em Brasília.
1998	Tribunal de Contas da União Vitória - ES
1998	Tribunal Regional Eleitoral Salvador - BA	No Tribunal Regional Eleitoral, em Salvador, observa-se uma grande evolução. O seu desenho é a combinação das experiências anteriores, com vãos maiores e os diversos <i>sheds</i> se interligam, como se um fosse à continuação do outro.
1999	Hospital Sarah Kubitschek Natal - RN/ Recife - PE e Curitiba - PR	No caso de Recife, os <i>sheds</i> possuem uma orientação diferente: os maiores estão voltados para o norte, possibilitando a entrada parcial do sol e a captação da brisa que vem do mar; já os <i>sheds</i> menores estão voltados para o sul, impedindo a entrada do sol direto e permitindo a saída do ar captado pelos <i>sheds</i> maiores.

Fonte: Acervo CTRS (2008); acervo da autora (2008 e 2010); Latorraca (1999); Lima (1999)

DATA	EDIFÍCIO/CIDADE	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO/DETALHAMENTO
2001	Hospital Sarah Kubitschek Fortaleza - CE	A forma desse shed surgiu em consequência do clima tropical local. Aqui é desejável manter o ar aquecido no espaço mais elevado possível, de onde é levado para fora, no ponto mais alto, por meio de um efeito de sucção do vento e pela entrada do ar frio, vindo das galerias de tubulações. A curvatura desse shed se apresenta bem diferente da existente no Sarah de Salvador. A forma côncava de Salvador se transformou em uma superfície convexa a fim de evitar a entrada da radiação de calor para dentro dos <i>sheds</i> .
2001	Escola Pré-fabricada - BAC'S Ribeirão Preto - SP	Nessa obra, Lelé utiliza as mesmas características de seu repertório construtivo e formal que aparecem nos hospitais da rede Sarah, como as coberturas curvas em aço providas de iluminação e ventilação natural através de <i>sheds</i> .
2002	Centro de Reabilitação Infantil Sarah Rio de Janeiro - RJ	Embora, com relação à forma, elas se assemelhem à variante aplicada no Sarah em Fortaleza, a construção é totalmente diferente. A estrutura é composta por duas vigas curvas. Para os grandes espaços a estrutura de shed aplicada é idêntica à desenvolvida para a grande extensão do galpão de terapia do Centro do Lago norte, em Brasília. A cobertura é, portanto, não apenas uma coleção de formas funcionais, mas também uma composição com caráter próprio que determina a aparência do prédio.
2003	Centro de Apoio ao Grande Incapacitado Físico - Sarah Lago Norte. Brasília - DF	A forma dos <i>sheds</i> do edifício térreo é igual à dos outros hospitais localizados nesta zona climática. O repertório das formas de cobertura é ainda mais ampliado para abranger os grandes espaços. O vão do galpão da fisioterapia, com 25m de largura, é baseado nos mesmos princípios dos <i>sheds</i> . As formas aerodinâmicas curvas das duas metades também causam aqui uma pressão sob a borda superior do beiral da cobertura, o que faz com que o ar seja sugado de dentro para fora. A convecção é promovida por meio da grande altura do galpão. Desde os primeiros projetos para o Sarah foram feitas propostas para chegar a essa concepção da forma que, finalmente, foi realizada pela primeira vez aqui. A forma da cobertura também se baseia em princípios aerodinâmicos.

Fonte: Acervo CTRS (2008); acervo da autora (2008 e 2010); Latorraca (1999); Lima (1999)

8. Apêndices

DATA	EDIFÍCIO/CIDADE	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO/DETALHAMENTO
2005	Posto Avançado de Macapá Macapá - AM	Nesse complexo foi aplicada a cobertura-padrão desenvolvida para o hospital em Salvador. Para os vãos maiores, utilizou-se a variante desenvolvida para o Centro de Reabilitação Infantil do Rio de Janeiro.
2007	Posto Avançado de Belém Belém - PA	Os <i>sheds</i> foram construídos com os mesmos meios do complexo de Macapá.
2009	Hospital Sarah Kubitschek Rio de Janeiro - RJ	Nesse caso, os <i>sheds</i> , por causa de sua extensão e forma, perderam seu caráter individual original. Juntas formam uma unidade ondulada, cujo desenho está baseado nos mesmos princípios aerodinâmicos dos <i>sheds</i> individuais. Possui um desenho totalmente diferenciado dos outros edifícios da rede. Nesse caso, os <i>sheds</i> são orientados a barlavento para captar os ventos predominantes, e a sotavento, para a ventilação permanente da cobertura. Projetou-se uma grande cobertura com <i>sheds</i> , totalmente solta e independente dos ambientes internos, como se fossem árvores sombreando o edifício e filtrando a luz natural. Entre essa cobertura externa e os ambientes internos, têm-se forros móveis de policarbonato translúcidos. É a geometria que possui mais flexibilidade.
2011	Hospital Escola Municipal de São Carlos São Carlos - SP	A cobertura em <i>sheds</i> é completamente independente dos ambientes internos, possuindo forros móveis intermediários. Entre os forros móveis e os <i>sheds</i> existe um grande espaço de ar, que funciona como uma proteção térmica, reduzindo a entrada de calor nos ambientes internos pela cobertura.

Fonte: Acervo CTRS (2008); acervo da autora (2008 e 2010); Latorraca (1999); Lima (1999)

8.2 LEVANTAMENTO NO CTRS: DETALHAMENTO DOS PROJETOS COM *SHEDS*-LELÉ

Edifício/ilustração	Data	Local	Projeto	Detalhamento
<p>Hospital Sarah</p>	1980	Brasília - DF	Implantação e localização 01 planta baixa 02 cortes Detalhamento dos sheds
<p>Centro de Tecnologia da Rede Sarah - CTRS</p>	1992	Salvador - BA	Implantação e localização 01 planta baixa 02 cortes Detalhamento dos sheds
<p>Hospital Sarah</p>	1993	São Luís - MA	Implantação e localização 02 plantas baixas 02 cortes 01 fachada Detalhamento dos sheds
<p>Hospital Sarah</p>	1994	Salvador - BA	Implantação e localização 02 plantas baixas 04 cortes 04 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Tribunais de Contas da União</p>	1996	Salvador - BA	Implantação e localização 01 planta baixa 02 cortes 02 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Tribunais de Contas da União</p>	1996	Natal - RN	Implantação e localização 01 planta baixa 03 cortes 05 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Tribunais de Contas da União</p>	1997	Aracaju - SE	Implantação e localização 01 planta baixa 02 cortes 03 fachadas Detalhamento dos sheds

Edifício/ilustração	Data	Local	Projeto	Detalhamento
<p>Tribunais de Contas da União – TCU</p>	1997	Belo Horizonte - MG	Implantação e localização 01 planta baixa 01 corte 02 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Hospital Sarah</p>	1997	Belo Horizonte - MG	Implantação e localização 03 plantas baixas 05 cortes 03 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Tribunais de Contas da União – TCU</p>	1998	Teresina - PI	Implantação e localização 01 planta baixa 02 cortes 01 fachada Detalhamento dos sheds
<p>Tribunais de Contas da União – TCU</p>	1998	Cuiabá - MT	Implantação e localização 01 planta baixa 03 cortes 03 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Tribunais de Contas da União – TCU</p>	1998	Vitória - ES	Implantação e localização 01 planta baixa 02 cortes 02 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Tribunal Regional Eleitoral - TRE</p>	1998	Salvador - BA	Implantação e localização 02 plantas baixas 02 cortes 02 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Hospital Sarah</p>	2001	Fortaleza - CE	Implantação e localização 05 plantas baixas 04 cortes 04 fachadas Detalhamento dos sheds

Edifício/ilustração	Data	Local	Projeto	Detalhamento
<p>Centro de Reabilitação Infantil - CRI</p>	2001	Rio de Janeiro - RJ	Implantação e localização 01 planta baixa 04 cortes 04 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Sarah Lago norte</p>	2003	Brasília - DF	Implantação e localização 02 plantas baixas 05 cortes 05 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Hospital Sarah</p>	2005	Macapá - AM	Implantação e localização 01 planta baixa 03 cortes 03 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Hospital Sarah</p>	2007	Belém - PA	Implantação e localização 01 planta baixa 04 cortes 04 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Hospital Sarah</p>	2009	Rio de Janeiro - RJ	Implantação e localização 03 plantas baixas 06 cortes 04 fachadas Detalhamento dos sheds
<p>Hospital Municipal Escola</p>	2011	São Carlos - SP	Implantação e localização 02 plantas baixas 04 cortes 04 fachadas Detalhamento dos sheds

8.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS CLIMÁTICOS

A seguir, as tabelas 41 e 42 apresentam os dados de direção e velocidade dos ventos extraído do software *Climaec Consultant 5.3*, a partir dos arquivos Epw's elaborados por Roriz (2012).

Tabela 41: Rosa dos ventos com a frequência, direção e velocidade dos ventos para as cidades selecionadas

Tabela 41 (continuação): Rosa dos ventos com a frequência, direção e velocidade dos ventos das cidades selecionadas

Tabela 42: Resumo dos dados de vento das cidades selecionadas nos últimos 10 anos

Cidade	Frequência de ocorrência (%)	Velocidade dos ventos (m/s)
Belém - PA	63%	< 2,00
	36%	2,00 – 3,00
	0%	3,00 – 5,00
	0%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Manaus - AM	57%	< 2,00
	27%	2,00 – 3,00
	15%	3,00 – 5,00
	0%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Maceió - AL	15%	< 2,00
	34%	2,00 – 3,00
	33%	3,00 – 5,00
	16%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Natal - RN	0%	< 2,00
	5%	2,00 – 3,00
	57%	3,00 – 5,00
	36%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Salvador - BA	58%	< 2,00
	37%	2,00 – 3,00
	3%	3,00 – 5,00
	0%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Fortaleza - CE	29%	< 2,00
	26%	2,00 – 3,00
	37%	3,00 – 5,00
	6%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Recife - PE	36%	< 2,00
	29%	2,00 – 3,00
	34%	3,00 – 5,00
	0%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
João Pessoa - PB	12%	< 2,00
	36%	2,00 – 3,00
	48%	3,00 – 5,00
	2%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Aracaju - SE	0%	< 2,00
	8%	2,00 – 3,00
	78%	3,00 – 5,00
	12%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
São Luis - MA	32%	< 2,00
	22%	2,00 – 3,00
	40%	3,00 – 5,00
	3%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Macapá - AP	58%	< 2,00
	29%	2,00 – 3,00
	11%	3,00 – 5,00
	0%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Rio Branco- AC	47%	< 2,00
	34%	2,00 – 3,00
	17%	3,00 – 5,00
	0%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00
Rio de Janeiro - RJ	55%	< 2,00
	27%	2,00 – 3,00
	17%	3,00 – 5,00
	0%	5,00 – 9,00
	0%	> 9,00

8.4 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DOS EDIFÍCIOS DO ARQUITETO Lelé

A tabela 43 a seguir apresenta resumidamente os parâmetros gerais encontrados nos edifícios com *sheds* de Lelé.

Tabela 43: Parâmetros recorrentes nos edifícios de Lelé

Parâmetro construtivo	Justificativa
Modulação	Módulo de 0,625m. Esse módulo é seguido apenas na horizontal. Nas dimensões verticais e nas aberturas essa modulação não é adotada.
Forma do edifício	De modo geral, os edifícios tem formato retangular, com um único pavimento.
Fachadas	As fachadas são constituídas na maior parte de vidro comum e painéis de argamassa armada.
Aberturas	Galerias subterrâneas e grandes portas de vidro nas fachadas para a entrada de ar e aberturas na cobertura, por meio de <i>sheds</i> para a saída de ar
Materiais	Painéis de argamassa armada e estrutura metálica

Analisando as proporções dos edifícios com *sheds* projetados por Lelé, percebe-se que ele segue uma modulação na horizontal de 0,625m. No entanto, as dimensões na vertical e nas aberturas não seguem essa modulação. Conforme as geometrias dos *sheds* são modificadas, o tamanho das aberturas e do pé-direito também são alterados. Diante disso, os diferentes edifícios com esses dispositivos, apresentam aberturas e altura de diferentes dimensões (tabela 44).

Essa modulação de 0,625m define a distância entre os *sheds* e, pelo levantamento realizado, encontrou-se 11 diferentes valores pra essa distância. Dentre essas, o valor de 2,50m é a mais usual e a que está presente no maior número de diferentes geometrias de *sheds*. Sendo assim, este valor foi adotado no caso de referência (gráfico 50).

Tabela 44: Proporções dos edifícios com *Sheds* _Arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé

Pé-direito inferior do shed (m)	Módulos Sheds	Edifícios (Hospitais da Rede Sarah)									
		Brasília	São Luís	Salvador	Belo Horizonte	Fortaleza	Rio de Janeiro	Brasília	Macapá	Belém	Rio de Janeiro
	Módulo 01	Sheds que não seguem o padrão dos módulos selecionados			3,00						Sheds que não seguem o padrão dos módulos selecionados
	Módulo 02		3,00	3,00	3,00	3,00		3,00	3,00	3,00	
	Módulo 03				3,00	3,00		3,00	3,00	3,00	
	Módulo 04		3,00	3,00	3,00	3,00	2,50	3,00			
	Módulo 05				3,00		2,50	3,00			
	Módulo 06			3,00	3,00	3,00	2,50	3,00			
	Módulo 07					3,00					
	Módulo 08					3,00	2,50				
	Módulo 09					3,00					
	Módulo 10						2,50		3,00		
Módulo 11											
Pé-direito superior do shed (m)	Módulos Sheds	Edifícios (Hospitais da Rede Sarah)									
		Brasília	São Luís	Salvador	Belo Horizonte	Fortaleza	Rio de Janeiro	Brasília	Macapá	Belém	Rio de Janeiro
	Módulo 01	Sheds que não seguem o padrão dos módulos selecionados			3,63						Sheds que não seguem o padrão dos módulos selecionados
	Módulo 02		4,00 / 4,25	3,90	3,87	4,18		4,24/4,07	4,25	4,27	
	Módulo 03				4,11	4,49		4,58	4,58	4,57	
	Módulo 04		4,83	4,38	4,35	4,80	4,37	4,92			
	Módulo 05				4,80		4,78	5,23			
	Módulo 06			4,86	5,06	5,43	5,15	6,37			
	Módulo 07					5,74					
	Módulo 08					6,05	5,88				
	Módulo 09					6,68					
	Módulo 10						7,05		6,31		
Módulo 11											
Vão da abertura do shed (m)	Módulos Sheds	Edifícios (Hospitais da Rede Sarah)									
		Brasília	São Luís	Salvador	Belo Horizonte	Fortaleza	Rio de Janeiro	Brasília	Macapá	Belém	Rio de Janeiro
	Módulo 01	Sheds que não seguem o padrão dos módulos selecionados			0,63						Sheds que não seguem o padrão dos módulos selecionados
	Módulo 02		1,00 / 1,25	0,90	0,87	0,72		1,27/1,07	1,25	1,27	
	Módulo 03				1,11	0,90		1,58	1,58	1,57	
	Módulo 04		1,83	1,38	1,35	1,09	0,93	1,92			
	Módulo 05				1,80		1,32	2,23			
	Módulo 06			1,86	2,06	1,46	1,51				
	Módulo 07					1,65					
	Módulo 08					1,83	2,12				
	Módulo 09					2,21					
	Módulo 10						2,81		3,31		
Módulo 11											

Tabela 44 (continuação): Proporções dos edifícios com *Sheds* _Arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé

Tabela 44 (continuação): Proposições dos cadernos com sheds _Arquiteto João Nogueira Lima, LcLc										
Pé-direito inferior do shed (m)	Módulos <i>Sheds</i>	Edifícios (Tribunais de Contas da União)								
		Salvador	Cuiabá	Belo Horizonte	Teresina	Natal	Vitória	TER - Salvador	Aracajú	
	Módulo 01		<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados	<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados	<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados				<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados	<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados
	Módulo 02	2,40					2,50	2,50		
	Módulo 03									
	Módulo 04					2,50				
	Módulo 05									
	Módulo 06									
	Módulo 07					2,50				
	Módulo 08									
	Módulo 09									
	Módulo 10									
Módulo 11	2,40					2,50				
Pé-direito superior do shed (m)	Módulos <i>Sheds</i>	Edifícios (Hospitais da Rede Sarah)								
		Salvador	Cuiabá	Belo Horizonte	Teresina	Natal	Vitória	TER - Salvador	Aracajú	
	Módulo 01		<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados	<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados	<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados				<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados	<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados
	Módulo 02	3,64					3,73	3,74		
	Módulo 03									
	Módulo 04					4,32				
	Módulo 05									
	Módulo 06									
	Módulo 07					5,25				
	Módulo 08									
	Módulo 09									
	Módulo 10									
Módulo 11	7,53					7,10				
Vão da abertura do shed (m)	Módulos <i>Sheds</i>	Edifícios (Hospitais da Rede Sarah)								
		Salvador	Cuiabá	Belo Horizonte	Teresina	Natal	Vitória	TER - Salvador	Aracajú	
	Módulo 01		<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados	<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados	<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados				<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados	<i>Sheds</i> que não seguem o padrão dos módulos selecionados
	Módulo 02	1,24					1,23	1,24		
	Módulo 03									
	Módulo 04					1,08				
	Módulo 05									
	Módulo 06									
	Módulo 07					1,64				
	Módulo 08									
	Módulo 09									
	Módulo 10									
Módulo 11	5,13					4,60

Gráfico 50: Proporções das distâncias entre os sheds nos edifícios do arquiteto Lelé

8.5 FLUXOGRAMA GERAL COM OS PARÂMETROS ANALISADOS

A seguir, é apresentado um fluxograma geral de forma detalhada com todos os parâmetros projetuais (**parâmetro 1**: geometria dos *sheds*; **parâmetro 2**: dimensão da abertura A1; **parâmetro 3**: dimensão das aberturas dos *sheds*; **parâmetro 4**: número de *sheds* na cobertura; **parâmetro 5**: distância entre os *sheds* alterando a área total das aberturas dos *sheds*; **parâmetro 6**: distância entre os *sheds* mantendo a área total das aberturas dos *sheds*; e **parâmetro 7**: distância e o alinhamento entre os *sheds*) e os parâmetros climáticos (**parâmetro 1**: ângulos de incidência dos ventos externos: 0° e 45° – *sheds* extratores de ar; 90° – situação neutra e 135° e 180° – *sheds* captadores de ar e **parâmetro 2**: velocidade dos ventos externos: 1,5m/s; 3,0m/s e 7,0m/s) analisados, totalizando 795 casos simulados.

Fluxograma detalhado com os parâmetros projetuais e climáticos da análiseparamétrica

1° parâmetro climático:
Ângulo de incidência dos ventos externos

Nomenclatura e organização do fluxograma:
Parâmetros projetuais

2° parâmetro climático:
Velocidade dos ventos externos

8.6 SIMULAÇÕES CFD: ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DE QUALIDADE DA MALHA

Tabela 45: Síntese dos testes com as malhas tetraédricas

MALHA BÁSICA	Max element: 16	CONVERGIU: MAX 10^{-4}
	Min element: 4	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.30	
	Total de elementos: 192,544	
	Total de nós: 33603	
	Max element: 16	Y+= Vários pontos do edifício entre 20 e 100. Alguns pontos atingiram valores de no máximo 400.
	Min element: 4	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.20	
	Total de elementos: 300,228	
	Total de nós: 49661	
MALHA MÉDIA	Max element: 16	CONVERGIU: MAX 10^{-4}
	Min element: 4	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.30	
	Total de elementos: 954,701	
	Total de nós: 79076	
	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações)
	Min element: 2	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.10	
	Total de elementos: 221,990	
	Total de nós: 37143	
MALHA FINA	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações)
	Min element: 2	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.20	
	Total de elementos: 324,421	
	Total de nós: 53774	
	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações)
	Min element: 2	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.10	
	Total de elementos: 978,260	
	Total de nós: 161901	
MALHA FINA	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações)
	Min element: 0.5	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.30	
	Total de elementos: 447,746	
	Total de nós: 75104	
	Max element: 16	Y+= Valores de no máximo 400
	Min element: 0.5	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.20	
	Total de elementos: 474,609	
	Total de nós: 79133	
MALHA FINA	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações)
	Min element: 0.5	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.10	
	Total de elementos: 1.109,443	
	Total de nós: 183817	
	Max element: 16	Y+= Valores de no máximo 300
	Min element: 0.5	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.10	
	Total de elementos: 1.109,443	
	Total de nós: 183817	
MALHA FINA	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações)
	Min element: 0.5	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.10	
	Total de elementos: 1.109,443	
	Total de nós: 183817	
	Max element: 16	Y+= Valores de no máximo 180
	Min element: 0.5	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.10	
	Total de elementos: 1.109,443	
	Total de nós: 183817

Figura 139: Malha fina gerada para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10.

Figura 140: Valores de y^+ para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - malha fina

Figura 141: Níveis de convergência para refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10

Figura 142: Malha média gerada para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10.

Figura 143: Valores de y^+ para refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - malha média

Figura 144: Níveis de convergência para refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - malha média

Figura 145: Malha básica gerada para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10.

Figura 146: Valores de y^+ para os refinamentos de (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - malha básica

Figura 147: Níveis de convergência para refinamentos (a) 0,30, (b) 0,20 e (c) 0,10 - malha básica

Tabela 46: Síntese dos testes com as malhas tetraédricas com elementos prismáticos no edifício

MALHA BÁSICA	Max element: 16	CONVERGIU: MAX 10^{-4} Y+= Alguns pontos atingiram valores de no máximo 1200.
	Min element: 4	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.30 (com prismas)	
	Total de elementos: 149792	
	Total de nós: 33603	
	Max element: 16	CONVERGIU: MAX 10^{-4} Y+= Alguns pontos atingiram valores de no máximo 900.
	Min element: 4	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.20 (com prismas)	
	Total de elementos: 301715	
	Total de nós: 50117	
MALHA MÉDIA	Max element: 16	CONVERGIU: MAX 10^{-4} Y+= Alguns pontos atingiram valores de no máximo 800.
	Min element: 4	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.10 (com prismas)	
	Total de elementos: 480541	
	Total de nós: 79076	
	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações) Y+= Alguns pontos atingiram valores de no máximo 1000.
	Min element: 2	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.30 (com prismas)	
	Total de elementos: 197586	
	Total de nós: 43532	
MALHA FINA	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações) Y+= Alguns pontos atingiram valores de no máximo 900.
	Min element: 2	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.20 (com prismas)	
	Total de elementos: 326090	
	Total de nós: 54266	
	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações) Y+= Alguns pontos atingiram valores de no máximo 800
	Min element: 2	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.10 (com prismas)	
	Total de elementos: 980256	
	Total de nós: 163236	
MALHA FINA	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações) Y+= Alguns pontos atingiram valores de no máximo 1000
	Min element: 0,5	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.30 (com prismas)	
	Total de elementos: 363134	
	Total de nós: 71350	
	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações) Y+= Alguns pontos atingiram valores de no máximo 900
	Min element: 0,5	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.20 (com prismas)	
	Total de elementos: 473704	
	Total de nós: 79020	
MALHA FINA	Max element: 16	NÃO CONVERGIU (300 iterações) Y+= Alguns pontos atingiram valores de no máximo 800.
	Min element: 0,5	
	Cells in gap: 8	
	Refinamento no edifício: 0.10 (com prismas)	
	Total de elementos: 978260	
	Total de nós: 161901

Figura 148: Aspecto geral e corte da malha básica com elementos prismáticos no edifício

Figura 149: Níveis de convergência para a malha básica tetraédrica com prismas

Figura 150: Valores de y^+ para a malha básica tetraédrica prismática

Figura 151: (a) Níveis de convergência e (b) valores do y^+ para a malha média com prismas

8.7 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS NO CFX: PARÂMETROS DA MALHA

As tabelas 47 e 48 apresentam as informações sobre as malhas geradas para o parâmetro 01 analisado (geometria dos *sheds*), descrevendo os tipos de elementos da malha, número de elementos e de nós.

Tabela 47: Informações sobre as malhas geradas para cada geometria analisada

CASO DE REFERÊNCIA			
Ângulo de incidência	Tipo de elementos da malha	N. Elementos	N. Nós
0°	Tetraedros	144,773	24299
45°	Tetraedros	178,488	29772
90°	Tetraedros	159,773	26807
135°	Tetraedros	181,452	30275
180°	Tetraedros	165,371	27701
GEOMETRIA 01			
Ângulo de incidência	Tipo de elementos da malha	N. Elementos	N. Nós
0°	Tetraedros	188,006	311,46
45°	Tetraedros	313,827	518,98
90°	Tetraedros	189,500	313,98
135°	Tetraedros	313,932	518,99
180°	Tetraedros	188,838	313,16
GEOMETRIA 02			
Ângulo de incidência	Tipo de elementos da malha	N. Elementos	N. Nós
0°	Tetraedros	191,352	318,87
45°	Tetraedros	256,103	424,76
90°	Tetraedros	292,811	484,84
135°	Tetraedros	199,802	330,36
180°	Tetraedros	193,228	322,10
GEOMETRIA 03			
Ângulo de incidência	Tipo de elementos da malha	N. Elementos	N. Nós
0°	Tetraedros	195,260	325,77
45°	Tetraedros	198,400	328,06
90°	Tetraedros	194,113	324,38
135°	Tetraedros	310,384	512,54
180°	Tetraedros	193,423	322,20
GEOMETRIA 04			
Ângulo de incidência	Tipo de elementos da malha	N. Elementos	N. Nós
0°	Tetraedros	213,049	355,83
45°	Tetraedros	198,225	327,94
90°	Tetraedros	293,690	486,63
135°	Tetraedros	200,882	332,36
180°	Tetraedros	184,647	308,60

A tabela 48 a seguir apresenta as informações sobre níveis de convergência e os valores de y^+ para o caso de referência.

Tabela 48: Dados de convergência e y^+ da simulação do caso de referência

Direção dos ventos: 0° (<i>sheds</i> extratores)	
Equation	Final Max Res
U-Mom	9,3e-05
V-Mom	3,4e-05
W-Mom	4,0e-05
P-Mass	4,2e-06
K-TurbKE	3,9e-04
E-Diss.K	4,3e-05

Gráficos de convergência – CFX-Solver

Número de iterações da convergência MAX 10^{-4}

252 iterações

Valores de y^+ nos *sheds*

Valor máximo	332
Valor mínimo	10,3

Gráfico com valores de y^+ nos *sheds*

Tabela 48 (continuação): Dados de convergência e y+ da simulação do caso de referência
Direção dos ventos: 45° (*sheds* extratores)

Equation	Final Max Res
U-Mom	8,4e-05
V-Mom	9,9e-05
W-Mom	4,1e-05
P-Mass	1,8e-06
K-TurbKE	6,4e-05
E-Diss.K	3,1e-05

Gráficos de convergência – CFX-Solver

Número de iterações da convergência MAX 10⁻⁴ 252 iterações

Valores de yplus nos *sheds*

Valor máximo	296
Valor mínimo	7,5

Gráfico com valores de yplus nos *sheds*

Tabela 48 (continuação): Dados de convergência e y^+ da simulação do caso de referência

Direção dos ventos: 90° (situação neutra)	
Equation	Final Max Res
U-Mom	8,0e-05
V-Mom	7,2e-05
W-Mom	9,6e-05
P-Mass	8,1e-07
K-TurbKE	6,5e-05
E-Diss.K	3,1e-05
Gráficos de convergência – CFX-Solver	
Momentum and mass	Tubulence (KE)

Número de iterações da convergência MAX 10 ⁻⁴	348 iterações
Valores de y^+ nos sheds	
Valor máximo	297,4
Valor mínimo	10,1
Gráfico com valores de y^+ nos sheds

Tabela 48 (continuação): Dados de convergência e y^+ da simulação do caso-base

Direção dos ventos: 135° (<i>sheds</i> captadores)	
Equation	Final Max Res
U-Mom	9,6e-05
V-Mom	3,8e-05
W-Mom	9,0e-05
P-Mass	5,2e-05
K-TurbKE	1,2e-05
E-Diss.K	6,5e-05
Gráficos de convergência – CFX-Solver	
Momentum and mass	Tubulence (KE)

Número de iterações da convergência MAX 10 ⁻⁴	292 iterações
Valores de y^+ nos <i>sheds</i>	
Valor máximo	282
Valor mínimo	19,5
Gráfico com valores de y^+ nos <i>sheds</i>

Tabela 48 (continuação): Dados de convergência e y^+ da simulação do caso-base

Direção dos ventos: 180° (<i>sheds</i> captadores)	
Equation	Final Max Res
U-Mom	3,8e-05
V-Mom	1,0e-05
W-Mom	9,8e-05
P-Mass	1,6e-06
K-TurbKE	1,7e-04
E-Diss.K	1,8e-05

Gráficos de convergência – CFX-Solver

Número de iterações da convergência MAX 10⁻⁴

349 iterações

Valores de y^+ nos *sheds*

Valor máximo

385,9

Valor mínimo

18,9

Gráfico com valores de y^+ nos *sheds*

8.8 TAXAS DE VENTILAÇÃO DE NORMAS INTERNACIONAIS

A tabela 49 a seguir, apresenta um resumo dos valores de algumas das taxas de ventilação necessárias apresentadas por algumas normas internacionais. Os valores estão contidos em normas de ventilação ou em regulamentos que variam de país para país, sendo que em alguns deles esses documentos são inexistentes.

Tabela 49: Resumo de normas de ventilação

	Divisões principais	Coz.	Banho	WC	Tipo	Permeab. (50Pa/REN)
Austrália	$A_{ab} = 0,01 \text{ m}^2/\text{div.}$				VN	20
Bélgica	$1\text{m}^3/\text{s m}^2$	Exaustão mecânica			VN	10
Canadá (1)	$A_{ab} = 0,28 \text{ m}^2/\text{div.}$	$A_{ab} = 0,09 \text{ m}^2/\text{div.}$			VN	4 (até 1980) 2 (novas)
Canadá (2)	5; 10 1/s	30 1/s		10 1/s	VM	
Dinamarca (1)	> 0,5 REN	1,5 – 2,1 / s		1,5 1/s	VN	3 (estan.)
Dinamarca (2)		15 – 20 1 / s		15 1/s	VM	12 (média)
Finlândia	0,7 1/s m²	20 1/ s	15 1/s	10 1/s	VM	3
França		21 1/s ^A	4,2 (1 div.); 8,4 (3 div.)		VM	
Alemanha	1 – 1,5 REN	33 1/s	6 REN; 16,7/8,3 1/s ex.		VN	
Itália	0,42 1/s m²	1 REN	2 REN ^B		VN	
Japão	5,5 1/s pes				VN	13
Holanda	7 1/s pes	21 – 28 1/s	14 1/s	7 1/s	VN ^C	9
Nova Zel.	$A_{jan}>5\%A_{ch}$					10
Noruega	$A_{ab} = 30 \text{ cm}^2/\text{div.}$		$A_{ab} = 100$		VN ^D	5 ou 1 ^E
Suécia	0,35 1/s m²	10 1/s	10+1/m²; 30 (s/jan.)		VN/ M	4
R. Unido	1 REN	3REN $A_{ab}>5\%A_{ch} +40\text{cm}^2$ controlv.			VN	14
EUA	7,5 1/s pes	50 1/s ^G	25 1/s (interm.)/10 (cont.)		VN ^H	11; 6(ef. Energy.)
Portugal	1 REN	4 REN				
		> 60 m ^a / h ⁱ	> 40 m ^a / h	> 30 m ^a / h		

A – Acrescidos de 4 1/s por div. Princ. a mais; B – com janela, ou então VM; C – Vm em edifícios com mais de 13m de altura; D – VM também nas exaustões; E – unifamiliares convencionais e prédios, respectivamente; F – por casa 5 m^2 extra, de chão; G – em funcionamento intermitente e 12 1/s contínuos; H - em funcionamento intermitente e VM em contínuo. I – com aparelhos a gás $4,3 * P_{nom} [\text{k-W}] \text{ m}^3/\text{h}$ e com caldeiras $5 * P_{nom} [\text{k-W}] \text{ m}^3/\text{h}$

Fonte: Adaptado de MARQUES DA SILVA (2003)