Ventilação por Ação do Vento no Edifício: Procedimentos para Quantificação

Daniel Cóstola

Orientação: Profa. Dra. Marcia Peinado Alucci

Ventilação por Ação do Vento no Edifício: Procedimentos para Quantificação

Daniel Cóstola

Orientador: Profa. Dra. Marcia Peinado Alucci

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura
e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
Área de concentração: Tecnologia da Construção

São Paulo
Agosto de 2006

Cóstola, Daniel

Ventilação por Ação do Vento no Edifício: Procedimentos para Quantificação / Daniel Cóstola. -- São Paulo, 2006.

xxv, 214 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

Wind-driven ventilation in building: prediction methods

1. Ventilação. 2. Túnel de Vento. 3. Coeficiente de Pressão 4. Coeficiente de descarga 5. CFD

À Camila, Soraya e Zuzu
porque o importante
é manter a coerência.

Agradecimentos

Algumas pessoas tiveram papel fundamental no processo de execução desta pesquisa, e registro aqui a gratidão que nutro por elas:

Prof. Dra. Márcia Peinado Alucci, pela orientação, incentivo, companheirismo e exemplo de atitude perante a vida.

Prof. Dr. David Etheridge, não existem palavras em português ou inglês para agradecê-lo.

Profas. Dras. Anésia Barros Frota, Joana Gonçalves e Denise Duarte pelo apoio constante e incondicional a esta pesquisa.

Prof. Amauri Oliveira e Profa. Jacyra Soares pela acolhida no curso de micrometeorologia.

Alan Harris, pelo suporte abnegado nas simulações com o CFX.

Dra. Alessandra Prata, pelas discussões e por disponibilizar os dados e softwares de sua pesquisa, que foram fundamentais para esta dissertação.

Colegas do LABAUT pelo apoio e pelas ricas discussões.

Funcionários da FAUUSP no campus da Cidade Universitária e da Rua Maranhão.

Maria Teresa Pereira Pimenta, pelo apoio, confiança e carinho de longa data.

Carina Pimentel, por assumir como de sua responsabilidade, tarefas que eram nossas responsabilidades.

Carolina, pela confiança, companheirismo, e pelo amor que compartilhamos e sem o qual trabalho algum faz sentido.

E a algumas pessoas cuja importância não pode ser mensurada: Neusa, Dolar, Ermelinda, Zil, Kiko, Vânia, Renato, Antônio, Elvira, Alice, Dolar, Dimas, Diego, Danilo, Renata, Gabriel, Reinaldo e Ana.

Esta pesquisa foi financiada pelo CNPQ e pela CAPES, às quais agradeço imensamente.

Sumário

Lista de Figuras	ix	
Lista de Tabelas	xv	
Lista de Abreviaturas	xvii	
Lista de Símbolos	xix	
Resumo	xxi	
1	Introdução	1
2	Objetivos	5
3	Metodologia	7
4	Estado da arte da pesquisa em ventilação natural	9
4.1	Pesquisa em ventilação natural no Brasil	9
4.2	Estado da arte na pesquisa em ventilação natural no mundo	21
4.3	Arquitetura e ventilação natural	24
5	Introdução ao procedimento para predição da ventilação natural por ação dos ventos	27
6	Obtenção e tratamento dos dados de vento	29
6.1	Fundamentação teórica	30
6.2	O papel do dado de vento na PVN	51
6.3	Medidas de vento	51
6.4	Fontes de dados	56
7	Transposição dos dados de vento para o local do projeto	59
7.2	Correção de rugosidade	60
7.2.1	Fórmulas para correção de rugosidade	62
7.3	Topografia	63
8	Definição dos coeficientes de pressão no edifício	73
8.1	Fundamentação teórica	75
8.2	Coeficientes de pressão medidos em túnel de vento	83
8.3	Coeficientes de pressão por simulação de CFD	115
8.4	Coeficientes de pressão por modelos analíticos	137
8.5	Utilização de dados de Cp existentes na bibliografia	139
9	Coeficientes de descarga das aberturas	141
9.1	Fundamentação teórica	142
9.2	Determinação experimental de Cz	146
9.3	Determinação por simulação de CFD de Cz	148
9.4	Utilização de dados de Cz existentes na bibliografia	149
9.5	Considerações sobre o comportamento de Cz	153
10	Vazões internas pelo modelo de rede	157
10.1	Fundamentação teórica	157
10.2	Cálculo da vazão interna utilizando o software TAS	159
10.3	Solução das equações do modelo de rede	164
11	Considerações finais	175
Anexo 1: Vazão interna por simulação direta		177
Anexo 2: Modelo de Relatório de Simulação de CFD		191
Referências Bibliográficas		207

Listas de Figuras

Figura 1 . Zona de conforto adaptativo em ambientes naturalmente ventilados. A linha pontilhada representa a temperatura ideal e o espaço entre as linhas contínuas representa a zona de conforto para 80% de pessoas satisfeitas (DEAR, 1997)	3
Figura 2 . Zoneamento Bioclimático Brasileiro pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005)	12
Figura 3 . Imagens do trabalho de OLIVEIRA et. al. (2005)	15
Figura 4 . Imagem do edifício estudado em LOURA et. al. (2005)	16
Figura 5 . Posicionamento dos sensores (acima). Gráfico de velocidade no interior do edifício em função da intensidade do vento em uma dada direção (abaixo) (CÂNDIDO et. al., 2005)	17
Figura 6 . Simulações com os softwares COMIS e AIOLOS. (LOURA et. al., 2005)	19
Figura 7 . Visualização de escoamento OLGAY (1998)	21
Figura 8 . Frequência de ocorrência dos ventos em função da direção, para setores de 30°. Dados coletados simultaneamente em Santos e no Guarujá	29
Figura 9 . Circulação de ar no globo pela distribuição de temperatura e pressão (esquerda), e exemplo do Efeito Coriolis (direita)	30
Figura 10 . Exemplo de vento criado pelas características do local: brisas em área de orla (FROTA e SCHIFFER, 2000)	31
Figura 11 . Representações meteorológicas do vento	31
Figura 12 . Representação vetorial do vento	32
Figura 13 . Gráficos com variação da intensidade do vento no ano, no mês, no dia, na hora, no minuto (TROEN e PETERSEN, 1989)	33
Figura 14 . Ilustração da Hipótese de Taylor. (a) Um turbilhão de 100m de diâmetro apresenta uma diferença de temperatura de 5° C entre suas extremidades. (b) O mesmo turbilhão passa pelo sensor 10s depois, com velocidade de 10m/s.(STULL, 1988)	34
Figura 15 . Velocidade do vento em função do tempo (STULL, 1988)	34
Figura 16 . Inadequação do conceito de rugosidade para a região de interesse da PVN	35
Figura 17 . Rugosidade Aerodinâmica de alguns tipos de terreno. (STULL, 1988)	36
Figura 18 . Rugosidade Aerodinâmica de alguns tipos de terreno. (TROEN e PETERSEN, 1989)	37
Figura 19 . Modificações no perfil de velocidade do vento para diferentes tipos de terreno.	37
Figura 20 . Inadequação do conceito de rugosidade para a região de interesse à PVN	38
Figura 21 . Velocidade do vento em função da altura (z), rugosidade (z0) e deslocamento da superfície (zd) (STULL, 1988)	38
Figura 22 . Exemplo da tensão de Reynolds. (STULL, 1988)	39
Figura 23 . Influência de elementos sólidos no escoamento (MUNSON et. al., 1997)	40
Figura 24 . Camada limite planetária (STULL, 1988)	41
Figura 25 . Perfis da CLP Convectiva (STULL, 1988)	41
Figura 26 . Perfis da CLP Estável (STULL, 1988)	42
Figura 27 . Evolução da CLP durante um dia (STULL, 1988)	42
Figura 28 . Esquema dos fluxos de calor. (STULL, 1988)	43
Figura 29 . Correlação entre vento e outras variáveis climáticas, para São Paulo.	47
Figura 30 - Frequência de ocorrência do vento em São Paulo e Natal, respectivamente.	48
Figura 31 . Frequência de ocorrência e intensidade média das 60 leituras de vento de uma hora, agrupadas de

acordo com a direção do vento, em setores de 30°.	49
Figura 32 . Dados da Figura 31 e totalizações.	50
Figura 33 . Anemógrafo	53
Figura 34 . Anemômetro de copo	53
Figura 35 . Anemômetro ultra-sônico	54
Figura 36 . Redução na velocidade do vento devida a presença de obstáculo TROEN e PETERSEN (1989)	55
Figura 37 . Rede PCD e Modelo da estação. Acessado em 10.07.06 em http://tempo.cptec.inpe.br:9080/PCD/	57
Figura 38 . Exemplo de radiosondagem.	57
Figura 39 . Efeitos topográficos e de rugosidade nos dados de vento.	59
Figura 40 . Padrões de rugosidade: 0,002; 0,03; 0,1; 0,4 (TROEN e PETERSEN,1989)	60
Figura 41 . Perfis de velocidade do vento para CLP Neutra	61
Figura 42 . Transição entre áreas com diferentes rugosidades (ABNT, 1988)	61
Figura 43 . Altura da camada limite interna em função da distância (TROEN e PETERSEN,1989)	62
Figura 44 . Mudanças de rugosidade sucessivas (TROEN e PETERSEN,1989)	62
Figura 45 . Perfis exponenciais de velocidade para diferentes terrenos	63
Figura 46 . Modificação do perfil de vento pela topografia (STANGROOM, 2004)	64
Figura 47 . Modelo de morro testado (STANGROOM, 2004) e fluxo ao redor de um morro 3D e 2D (ISHIHARA apud STANGROOM, 2004)	64
Figura 48 . Linhas de corrente no escoamento ao redor de um morro (esq) e área de recirculação (direita) (STANGROOM, 2004)	65
Figura 49 . Topografia, direções dos ventos e posição dos mastros, e localização do experimento de Askervein Hill (TROEN e PETERSEN,1989) (STANGROOM, 2004)	66
Figura 50 . Velocidade do vento em relação ao escoamento não perturbado (pontos) e predição pelo modelo do WASP (quadrados) (TROEN e PETERSEN,1989)	67
Figura 51 . Exemplo de validação do WASP (TROEN e PETERSEN,1989)	67
Figura 52 . Malha criada no CFX para simulação em um morro (STANGROOM, 2004)	68
Figura 53 . Perfil de vento medido in loco no topo do morro e simulado em CFD (STANGROOM, 2004)	69
Figura 54 . Perfil de intensidade média (esq) e turbulência (dir) medidos in loco e simulados em CFD para o cume de Askervein Hill (STANGROOM, 2004)	69
Figura 55 . Simulação de CFD em relação aos dados da linha de mastros de Askervein Hill. Bons resultados (esq) e resultados ruins (dir) (STANGROOM, 2004)	70
Figura 56 . Topografia de São Paulo e resultados de simulação de KARAM et. al. (2003)	70
Figura 57 . Topografia de São Paulo e resultados de simulação de KARAM et. al. (2003)	71
Figura 58 . Edifício em corte. Sobrepressão (+) e subpressão (-)	73
Figura 59 . Esquema de ventilação cruzada em ambiente com duas aberturas em faces opostas	74
Figura 60 . Esquema de ventilação cruzada com aberturas na cobertura e na face a sotavento	74
Figura 61 . Distribuição de C_p na fachada a barlavento em função da direção de incidência do vento	79
Figura 62 . Distribuição de C_p na fachada, com vento ortogonal a mesma, para diferentes proporções de edifícios (largura:comprimento:altura)	80
Figura 63 . Formas de apresentação do C_p	81
Figura 64 . Distribuição de C_p médio, máximo e mínimo para uma mesma fachada	82
Figura 65 . Distribuição de C_p na face a barlavento para rugosidade respectivamente de (0,001) (0,01) (0,1)

Figura 66 . Fotos do túnel de vento de camada limite atmosférica do IPT. (Divulgação)	84
Figura 67 . Seção e planta do túnel de vento de camada limite atmosférica do IPT. (Divulgação)	84
Figura 68 . Planta do túnel de vento da SBE. (CAREY, 2005)	85
Figura 69 . Fotos do túnel de vento da SBE: Aletas para geração de perfil de camada limite, área de acesso ao túnel e colméia.	86
Figura 70 . Esquema (esquerda) e fotos (direita) do escoamento ao redor de cilindros	87
Figura 71 . Corte mostrando as áreas a serem cuidadosamente detalhadas no modelo a ser ensaiado em túnel de vento	88
Figura 72 . Parâmetros da CA14 para modelagem de obstruções na vizinhança (COST, 2004)	88
Figura 73 . Seção de um modelo cúbico com a distribuição dos coeficientes de pressão para anteparo sólido com a mesma altura do modelo, a diferentes distâncias do modelo. (FROTA e SCHIFFER, 2000)	89
Figura 74 . Vizinhança de um modelo para uma situação crítica.	89
Figura 75 . Exemplo de cálculo de área de obstrução.	91
Figura 76 . Escoamento ao redor de um cilindro. Re baixo (esquerda) e alto (direita). (AYNSLEY, 1977)	99
Figura 77 . Separação da camada limite (AYNSLEY, 1977)	99
Figura 78 . Modelos da asa de um avião. Linha branca em relevo no modelo para condicionar a camada limite. (RAE, 1984)	100
Figura 79 . Tomadas de pressão externa em um modelo em escala (BACCHI, 2005)	101
Figura 80 . Modelo com mangueiras internas da tomada de pressão (esq) e sensores de pressão com mangueiras identificadas (dir)	102
Figura 81 . Princípio de funcionamento do manômetro de coluna d'água.	102
Figura 82 . Transdutores de pressão piezoelétricos das marcas Furness, ONSET e Scanivalve. Fonte: websites dos fabricantes	103
Figura 83 . Placas de aquisição de dados analógico-digitais. À esquerda placa com alguns canais em uso, no túnel de vento da SBE. À direita, sistema de baixo custo com conexão USB da National Ins.	104
Figura 84 . Tubo de Pitot. Acessado em 10.08.06 http://www.efunda.com/designstandards/sensors/pitot_tubes/pitot_tubes_theory.cfm	105
Figura 85 . Termômetro e Barômetro para o cálculo da densidade do ar	105
Figura 86 . Sonda de fio quente. À direita sondas 1D, 2D e 3D respectivamente. Acessado em 10.08.06 http://www.dantec.dk	106
Figura 87 . Sistemas de controle para sondas de fio quente, de fabricação Dantec. À esquerda sistema MiniCTA, para controle de uma sonda 1D, usado no túnel da SBE Nottingham. À direita, sistema para três sondas, com sistema de calibração automático (a dire	107
Figura 88 . Sistema de calibração usado na SBE - Nottingham.	108
Figura 89 . Sonda com múltiplos furos e esquema mostrando o ângulo sólido no qual as leituras são possíveis.	108
Figura 90 . Sistema LDA tridimensional, fabricado pela Dantec. Acessado em 10.08.06 http://www.dantec.dk	109
Figura 91 . Esquema de funcionamento do LDA (esq) e padrão de franjas e sinal captado pela fotocélula (dir). Acessado em 10.08.06 http://www.dantec.dk	110
Figura 92 . LDA do IPT-CMF. Laser e divisão dos raios (à esquerda), sonda de emissão do laser e leitura do sinal luminoso (ao centro) e unidade de tratamento de sinal (à direita)	110
Figura 93 . Esquema de funcionamento do PIV. Acessado em 10.08.06 http://www.dantec.dk	111
Figura 94 . Exemplo de imagem do campo de velocidades ao redor de um cilindro (em corte), obtida com o PIV

da POLI-USP, em funcionamento em um túnel d'água. (GIORIA, 2005)	112
Figura 95 . Modelo para a determinação de C_p utilizado no túnel da SBE	113
Figura 96 . Relação entre o C_p da chaminé e a velocidade do vento no túnel	114
Figura 97 . Relação entre o C_p da abertura e a velocidade do vento no túnel	114
Figura 98 . Volume de controle de dimensões dx , dy e dz	117
Figura 99 . Vazão mássica que entra no volume de controle	118
Figura 100 . Vazão mássica que sai do volume de controle.	119
Figura 101 . Ilustração do comportamento dos primeiros três termos da Série de Taylor	121
Figura 102 . Exemplo de malha estruturada e não estruturada	123
Figura 103 . Malha após refinamento	124
Figura 104 . Simulação com DNS com resultados para 3 valores de Re	125
Figura 105 . Hierarquia das técnicas para o tratamento da turbulência em CFD	125
Figura 106 . Parâmetros para a definição das dimensões do domínio	127
Figura 107 . Condições de contorno para duas formas de domínio possíveis.	128
Figura 108 . Domínios com condições de contorno	129
Figura 109 . Utilização de um sub-domínio cilíndrico dentro de um domínio retangular (STANGROOM, 2004)	130
Figura 110 . Distribuição de C_p na face a barlavento para diferentes perfis de vento, correspondentes a rugosidades respectivamente de (0,001) (0,01) (0,1) (0,3)	134
Figura 111 . Histograma com a frequência absoluta de ocorrência para cada diferença entre os C_p de um mesmo ponto, calculados em simulações com e sem rugosidade no piso do modelo	135
Figura 112 . Evolução do resíduo pelo RMS na simulação Petro4r0001smooth com vento a 0°	135
Figura 113 . Pavimento térreo: comparação entre as simulações com diferentes malhas. O comprimento das barras é proporcional ao C_p em cada janela.	136
Figura 114 . Diferença no C_p para cada janela. Comparação das simulações duas a duas, da malha mais grossa para a mais fina.	137
Figura 115 . Exemplo de modelo (esquerda) usado na validação do modelo de ELDIN (2006). A direita são apresentados os valores base de C_p para o edifício desobstruído, os medidos em túnel de vento e os previstos pelo modelo.	138
Figura 116 . Comparação entre a predição de C_p feita pelo Cp Generator e dados medidos em um edifício real (HEIJMANS, s.l.)	139
Figura 117 . Classificação das formas do banco de dados de C_p coletados na bibliografia	140
Figura 118 . Tipos de Aberturas (IDEL'CIK, 1960)	141
Figura 119 . "Vena contracta" (MUNSON et. al., 1997)	141
Figura 120 . Valores de C_z para algumas geometrias de aberturas (MUNSON et. al., 1997)	146
Figura 121 . Esquema do experimento para a determinação de C_z (CHIU, 2004)	146
Figura 122 . Condições de contorno de simulação de CFD para a determinação de C_z (CHIU, 2004)	148
Figura 123 . escoamento em uma abertura simulado com CFD para a determinação de C_z (CHIU, 2004)	149
Figura 124 . Coeficientes de perda de carga – abertura pivotante (IDEL'CIK, 1960)	149
Figura 125 . Coeficientes de perda de carga – abertura maxi-ar (IDEL'CIK, 1960)	150
Figura 126 . Coeficientes de perda de carga – tela (IDEL'CIK, 1960)	151
Figura 127 . Coeficientes de perda de carga – abertura pivotante (IDEL'CIK, 1960)	152
Figura 128 . "Stream tubes" para ângulos de incidência do vento de 0° , $22,5^\circ$ e 45° respectivamente, obtidos por simulação de CFD acessado em 10.08.2006 em http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_

center/ventilation/CFD_Result.html#Stream_tube	153
Figura 129 . Cz ext-int de um orifício circular com cantos vivos, para diferentes condições de escoamento externo, obtido em ensaio no túnel de vento da SBE	154
Figura 130 . Cz int-ext de um orifício circular com cantos vivos, para diferentes condições de escoamento, obtido em ensaio no túnel de vento da SBE	155
Figura 131 . "Stream tubes" com e sem obstrução, para ângulo de incidência do vento de 65°, obtidos por simulação de CFD acessado em 10.08.2006 em http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/ventilation/CFD_Result.html#Stream_tube	155
Figura 132 . Edifício com duas aberturas	158
Figura 133 . Planta (térreo e 4° pavimento) e modelo 3D do edifício simulado no TAS	161
Figura 134 . Planta da cobertura e dos andares não simulados.	161
Figura 135 . Comparação entre simulações com diferentes Cp no TAS	163
Figura 136 . Variação da temperatura interna com diferentes Cp no TAS	163
Figura 137 . Ventilação em um única zona, por três aberturas	167
Figura 138 . Ventilação multi-zona	170
Figura 139 . Cálculo pelo modelo de envelope em comparação com a simulação direta	177
Figura 140 . Dependência entre Cz e Re para a chaminé utilizada no ensaio.	179
Figura 141 . Esquema do modelo ensaiado	182
Figura 142 . Exemplo de situação com fluxo reverso na chaminé	183
Figura 143 . Velocidades registradas pelos anemômetros de fio quente sob o efeito do escoamento provocado por um pistão (à esquerda). Foto do pistão (à direita)	183
Figura 144 . Configurações de obstruções utilizadas durante os ensaios.	184
Figura 145 . Velocidade registrada na chaminé posicionada em zona de alta turbulência	185
Figura 146 . Porcentagem de fluxo reverso. Os pontos vazados são resultados de CHIU (2004)	185
Figura 147 . Protótipo e Modelo de CFD comparados por YANG (2004)	186
Figura 148 . Comparação entre a vazão medida em um protótipo e a simulada em CFD (YANG, 2004) para duas direções do vento: 0° e 90°	187
Figura 149 . Modelo de UH objeto da simulação exploratória de CFD: Elevações e planta humanizada	187
Figura 150 . Campo de velocidade em um plano horizontal em uma simulação direta para determinação da vazão com o CFX. À esquerda, todo o domínio; à direita e ao centro , a UH ampliada.	188
Figura 151 . Exemplos de simulação direta produzidos por TORRES et. al. (2005) e pela Tokyo Polytechnic University, acessado em 10.08.2006 em http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/ventilation/CFD_Result_vec0.html .	188
Figura 152 . Foto dos Residenciais Petrópolis 1 e 2	192
Figura 153 . Planta do pavimento térreo do edifício tipo s/esc. Medidas em metros.	192
Figura 154 . Planta do apartamento tipo s/esc. Medidas em metros.	193
Figura 155 . Elevações do edifício tipo s/esc. Medidas em metros.	193
Figura 156 . Posição dos pontos a determinar o coeficiente de pressão. S/esc. Medidas em metros.	194
Figura 157 . Nomenclatura dos cômodos e direção do vento nas simulações	194

Lista de Tabelas

Tabela 1 . Porcentagem das horas do ano que requerem ventilação para obtenção do conforto térmico, e sua posição em relação a outras estratégias (LAMBERTS et. al., 1997)	2
Tabela 2 . Aberturas para ventilação Tabela C.1 da NBR 15220-3 (ABNT, 2005)	13
Tabela 3 . Comparação entre dados medidos e previsão Edifício 1. ALLARD (1998)	23
Tabela 4 . Comparação entre dados medidos e previsão Edifício 2. ALLARD (1998)	23
Tabela 5 . Variáveis que influenciam um escoamento externo, com suas dimensões e unidades no SI	93
Tabela 6 . Características termofísicas do ar à pressão de 1 atm. Fonte: BLEVINS apud MUNSON et. al. (1997)	96
Tabela 7 . Valores de C_p obtido em ensaio de túnel de vento da SBE	115
Tabela 8 . Sumário das simulações	133
Tabela 9 . Dados das aberturas 1 e 2 para o exemplo de cálculo de vazão unicompartimental com duas aberturas	164
Tabela 10 . Dados das aberturas 1, 2 e 3 para o exemplo de cálculo de vazão unicompartimental com três aberturas	167
Tabela 11 . Valores dos parâmetros "a" e "b" das aberturas 1, 2 e 3 para o exemplo de cálculo de vazão unicompartimental com duas aberturas	168
Tabela 12 . Valores das 15 primeiras iterações do recinto com três aberturas.	170
Tabela 13 . Dados das aberturas 1, 2, 3, 4 e 5 para o exemplo de cálculo de vazão multi-zona	170
Tabela 14 . Valores das 15 primeiras iterações do exemplo multi-zonas	173
Tabela 15 . Sumário dos ensaios em túnel de vento	184

Lista de Abreviaturas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
AIVC - Air Infiltration and Ventilation Center
ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ASHRAE - American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BRE - Building Research Establishment, Reino Unido.
BSI - British Standard Institution
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CE - Zona de Entranhamento.
CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CFD - Computational Fluid Dynamics
CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers
CLA - Camada Limite Atmosférica
CLP - Camada Limite Planetária
CLS - Camada Limite Superficial,
CM - Camada de Mistura
COST- European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DNS - Direct Numerical Simulation
EERE - Energy Efficiency and Renewable Energy
EESC-USP - Escola de Engenharia de São Carlos
ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
ESALQ-USP - Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo
EUA - Estados Unidos da América
FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FAU-USP - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo
FDS - Fire Dynamics Simulator
HIS - Habitação de Interesse Social
IAG-USP - Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo
IEA - International Energy Agency
IJNV - International Journal of Natural Ventilation
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IPT-CMF - Divisão de Mecânica dos Fluidos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LABAUT FAU-USP - Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo
LABEEE-UFSC - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina
LDA - Laser Doppler Anemometry

LES – Large Eddy Simulation

NIST – National Institute of Standards and Technology of United States of America

PCDs – Plataformas de Coletas de Dados,

PIV – Particle Image Velocimetry

PLEA – Passive and Low Energy Architecture International Conference

POLI-USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PVN – Predição de Ventilação Natural

RMS – Root Mean Square

RSM – Reynolds Stress Model

SBE – School of the Built Environment , The University of Nottingham

SI – Sistema Internacional

UH – unidades habitacionais

USP – Universidade de São Paulo

Lista de Símbolos

a	inclinação da folha da janela ($^{\circ}$)
a	aceleração (m/s^2)
A	área da abertura (m^2)
Co	concentração inicial do gás (ppm)
C	concentração do gás no instante t (ppm)
C_e	CP da abertura de entrada do ar
C_p	coeficiente de pressão
C_s	CP da abertura de saída do ar
C_z	coeficiente de descarga da abertura
D	termo da matriz inversa
D	profundidade da janela = espessura da parede (m)
ΔC_p	diferença entre o C_p de duas aberturas
Δp	diferença de pressão entre dois pontos (Pa)
dh	diâmetro hidráulico (m), conforme definido na seção 9.4
dx	dimensão de um volume de controle
dy	dimensão de um volume de controle
dz	dimensão de um volume de controle
F	força (N)
fo	área (m^2)
Fo	área aberta (m^2)
$F1$	área total (m^2)
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
h	espessura da CLP (m)
H	altura do edifício (m)
K	constante de von Karman
K	fator de escala
L	comprimento de Monin-Obukov (m)
L	dimensão característica do comprimento
L	dimensão comprimento
M	dimensão massa
M	vetor velocidade (m/s)
m	massa (kg)
μ	viscosidade dinâmica (N.s/m)
p	pressão (Pa)
Π	termo adimensional
P_d	pressão dinâmica (Pa)
P_o	perímetro (m)
P_x	pressão em um ponto x da fachada (Pa)
P_i	pressão interna em uma zona do edifício (Pa)
q	vazão (m^3/s)
Q	vazão total na zona (m^3/s)

R	constante do gás
ρ	massa específica (kg/m ³)
Re	número de Reynolds
Se	Área e Cz de uma abertura equivalente às aberturas 1 e 2
S1	Sinal da abertura 1
T	dimensão tempo
k	número de variáveis de um problema
r	número de dimensões de um problema
Θ	temperatura potencial (K)
t	tempo (s)
T	temperatura (K)
s	desvio padrão de ΔC_p
t	tensão de Reynolds
U	vetor velocidade (m/s)
u	componente do vetor velocidade na direção x
u*	velocidade de atrito (m/s)
u'v'w'	variação das componentes u v w em torno da média (m/s)
v	componente do vetor velocidade na direção y
V	vetor velocidade (m/s)
V	volume da zona (m ³ /s)
w	componente do vetor velocidade na direção z
x,y,z	componentes do sistema cartesiano
y+	escala de distância do primeiro elemento da malha (m)
z	altura acima do solo (m)
ζ	coeficiente de perda de carga
zo	rugosidade aerodinâmica (m)
zd	deslocamento da superfície (m)
z	parâmetro de estabilidade

Subescrito

p	protótipo
m	modelo
1,2,3..	número da abertura de uma zona
k	número da abertura
n	número da iteração
a,b	nome da zona

Resumo

Este trabalho tem por objetivo formular um procedimento para a quantificação da vazão da ar promovida pela ação do vento no interior do edifício, em climas quentes. O procedimento é dividido em cinco partes: obtenção dos dados de vento, transposição dos dados de vento da estação meteorológica para a área de interesse, determinação dos coeficientes de pressão no edifício, determinação dos coeficientes de descarga das aberturas, e o cálculo da vazão no interior do edifício. Diversas ferramentas são apresentadas para a execução de cada etapa, e seu uso e parâmetros de entrada são discutidos. O uso de túnel de vento e a simulação com ferramentas de dinâmica dos fluidos computacional são apresentados em detalhes. O trabalho conclui que estão disponíveis aos projetistas um amplo conjunto de ferramentas para a predição da ventilação natural no interior do edifício, e que somente pelo seu uso criterioso, as conclusões são passíveis de uso no projeto arquitetônico.

Abstract

The aim of this dissertation is to produce a procedure for wind-driven natural ventilation prediction, in hot climate building. The procedure is organized in five parts: wind data obtaining, topographic e roughness correction, pressure coefficient determination, discharge coefficient determination, and flow rate calculation inside the building. The dissertation presents some tools to execute each part of the procedure, and the specificities of those tools are discussed. Wind tunnel experiment and computation fluid dynamic simulation are presented in detail. The research conclusion is that designers have many tools available to perform a natural ventilation prediction, but just concient use will produce reliable results for architectural design.

1 Introdução

Das privações materiais que podem ser impostas ao ser humano, poucas têm efeito mais imediato do que a privação de ar.

O ar é o fluido no qual se dá a vida humana e é parte fundamental da reação química da qual extraímos energia para viver. É através do ar que dois dos cinco sentidos humanos operam: audição e olfato.

A manutenção da temperatura interna do corpo humano se dá por meio de trocas térmicas com o ambiente: condução, radiação, convecção, perspiração, transpiração e trocas na respiração (FANGER, 1976). Destas trocas, apenas as por condução e radiação não se dão por intermédio do ar, ou seja, o ar é um elemento fundamental para os mecanismos termo-reguladores do corpo humano, e conseqüentemente para o conforto térmico.

Uma definição comum para ventilação é, segundo o dicionário Michaelis, (DST,1998): "1. Ato ou efeito de ventilar. 2. Operação que tem por finalidade conservar o ar puro em um recinto". Ventilar: "Fazer o vento entrar em; arejar, refrescar".

O conceito de ventilação está diretamente ligado às qualidades "ar puro" e "refrescar" em um dado "recinto". É interessante notar que o verbete faz menção ao vento, mas não ao chamado efeito chaminé - ventilação promovida pela diferença de densidade do ar nos ambientes externo e interno do recinto. Outro aspecto interessante é a clara noção de que só é possível falar em ventilação quando existe um recinto, no qual o ar deve entrar e ser mantido puro. A concepção destes recintos, com intenção plástica e adaptada ao meio em que se insere, é, em uma interpretação livre, a definição de Lúcio Costa para arquitetura (COSTA, 1995). Assim, estabelece-se a relação inequívoca entre fazer arquitetura e projetar ventilação, não importando se natural ou mecânica.

AWBI (1998) define ventilação como a provisão, para o interior do edifício, de quantidade suficiente de ar para a respiração dos ocupantes e dispersão dos poluentes. Nota-se que o termo

"refrescar" é omitido. FROTA e SCHIFFER (2000) relata a importância da ventilação "para a higiene e para o conforto térmico". Comparadas estas duas fontes, a primeira inglesa e a segunda brasileira, verifica-se que ventilação tem significados diferentes em climas quentes e frios. Assim, textos como AWBI (1998), LIDDAMENT (1996) e ETHERIDGE & SANDBERG (1996) apresentam poucas respostas para problemas típicos de climas quentes dispensando, por exemplo, pouca importância às grandes aberturas voltadas para o exterior. Além disto, considera-se em geral que as aberturas são pequenas o suficiente para que o fluxo de ar se dê apenas em uma direção, ou seja, que o ar não entra por uma parte da janela e sai por outra parte da mesma janela. Outra preocupação comum nestes países que não se aplica ao Brasil é o chamado "draught" que descreve um indesejado resfriamento local no corpo humano causado pelo movimento do ar (AWBI, 1998). Em climas quentes, tal situação nunca seria classificada como indesejável.

Em resumo, nos climas frios ou em ambientes climatizados, a salubridade é o aspecto dominante na ventilação. Nos climas quentes e ambientes não condicionados, o foco recai sobre o conforto térmico (salvo em ambientes com grande geração interna de poluentes).

Na tabela 1 nota-se a importância da ventilação como estratégia de projeto na obtenção do conforto térmico para algumas cidades brasileiras segundo estudos de LAMBERTS et. al. (1997), a partir da Carta Bioclimática de GIVONI (1992). Na grande maioria das cidades a ventilação é a estratégia mais importante a ser observada no projeto e na utilização do edifício.

Cidade	Porcentagem de Horas para Uso da Estratégia Ventilação	Posição da Estratégia Ventilação dentre as demais Estratégias
Belém	85,6%	1°
São Luís	82%	1°
Fortaleza	68,5%	1°
Natal	68,4%	1°
Recife	60,8%	1°
Maceió	60,4%	1°
Rio de Janeiro	57%	1°
Vitória	56,9%	1°
Salvador	45,5%	1°
Florianópolis	35,5%	1°
Porto Alegre	19,5%	2°
Brasília	12,6%	2°
São Paulo	10,8%	2°
Curitiba	5,1%	4°

Tabela 1 . Porcentagem das horas do ano que requerem ventilação para obtenção do conforto térmico, e sua posição em relação a outras estratégias (LAMBERTS et. al., 1997)

O extensivo trabalho de DEAR (1997) que baseou a nova versão da norma ASHRAE-55 (ASHRAE, 2004) mostra que a classificação de GIVONI (1992) é bastante coerente.

A pesquisa de DEAR (1997) contou com a colaboração de diversos pesquisadores na coleta

de 21.000 tomadas de dados de variáveis de conforto e respostas de usuários, em 160 diferentes edifícios de escritórios pelo mundo. O trabalho foi baseado no conceito de índice de conforto térmico adaptativo no qual a condição de conforto do indivíduo é afetada por sua aclimação ao local e pela possibilidade de alterar variáveis como vestimenta, abertura de janelas, uso de proteções solares e afins. Nestes casos, a zona de conforto muda em função das variáveis climáticas externas.

A figura 1 apresenta a zona de conforto para ambientes não climatizados, para uma porcentagem de satisfeitos de 80%. A zona de conforto se estende acima de 30°C, indicando que indivíduos que residem em locais de clima quente toleram altas temperaturas quando podem controlar as variáveis como vestimenta, abertura de janelas, uso de persianas e afins.

Figura 1 . Zona de conforto adaptativo em ambientes naturalmente ventilados. A linha pontilhada representa a temperatura ideal e o espaço entre as linhas contínuas representa a zona de conforto para 80% de pessoas satisfeitas (DEAR, 1997)

As informações anteriormente apresentadas justificariam um papel de destaque para a ventilação natural na pesquisa e projetos arquitetônicos do Brasil. Contudo, como será apresentado no capítulo quatro, esta se encontra em estágio embrionário.

2 Objetivos

O objeto desta pesquisa é a vazão de ar no interior do edifício promovida pela ação do vento. Entende-se por vazão o volume de ar (Q) que, na unidade de tempo (t), é renovada pela substituição de ar do interior do recinto por ar externo ou de outra área do próprio edifício.

Existem diferentes formas de prever a vazão em um ambiente, com diferentes graus de incerteza, e cada uma delas traz implícitas uma série de simplificações e a modelagem teórica na qual se baseiam.

O objetivo deste trabalho é a formulação de um procedimento para a predição da vazão de ar por ação dos ventos que seja exequível com a infra-estrutura computacional e experimental disponível no país e com a menor incerteza possível.

Nos casos em que a infra-estrutura necessária para a utilização do procedimento não esteja disponível, é objetivo secundário deste trabalho apontar outras alternativas para a predição da ventilação por ação dos ventos, salientando os acréscimos na incerteza decorrentes das simplificações adotadas.

Ressalta-se que não são abordados os seguintes aspectos afins ao tema desta pesquisa:

- infiltração de ar,
- qualidade do ar,
- velocidade do ar no interior do edifício,
- diretrizes de projeto,
- dimensionamento de aberturas,
- controle e automação de aberturas.
- efeitos de compressibilidade,
- efeitos transientes.

3 Metodologia

A metodologia de trabalho é baseada em uma abordagem sistêmica, ou seja, de otimização do processo de predição da vazão de ar por ação dos ventos no interior do edifício. O trabalho foi baseado fundamentalmente na coleta de dados secundários, não produzidos por esta pesquisa, e na formulação – baseada no método indutivo – de alternativas ao processo de predição atualmente utilizado.

Tratando-se de uma pesquisa baseada predominantemente em dados secundários, a bibliografia assume papel central. Grande parte da bibliografia foi consultada nas bibliotecas pessoais do pesquisador, do orientador, e dos outros docentes da FAU-USP – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. A biblioteca da The University of Nottingham também foi importante fonte de material da pesquisa. Diversas publicações foram consultadas por meio da internet, seja pelo Portal Periódicos da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, seja nos sites de outras instituições de ensino, empresas e órgãos públicos.

Para realização dos exemplos de aplicação, foram utilizadas diversas ferramentas computacionais disponíveis no LABAUT FAU-USP – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, vinculado ao Departamento de Tecnologia – dentre os quais cabe citar o CFX, software de dinâmica dos fluidos computacional, e o TAS, software de simulação do desempenho térmico do edifício.

Nos casos em que não havia disponibilidade de ferramentas computacionais para auxiliar na execução dos cálculos foram desenvolvidas planilhas com o auxílio do software MS-Excel.

A parte experimental dos exemplos de aplicação foi desenvolvida no túnel de vento da School of the Built Environment, The University of Nottingham.

Todas as citações presentes no texto cujo original não foi escrito em português foram traduzidas pelo autor desta dissertação.

O SI - Sistema Internacional foi adotado para as unidades de todos os termos nas equações apresentadas nesta dissertação, salvo quando explicitado o contrário.

4 Estado da arte da pesquisa em ventilação natural

Este capítulo apresenta o estado da arte da pesquisa de ventilação natural, como foco na produção brasileira sobre o tema. A escolha deste foco é uma tentativa de expor o descompasso entre a produção nacional, apresentada na seção 4.1, e a internacional, cujos avanços são discutidos ao longo do texto da dissertação. Diversos artigos em eventos têm tratado da ventilação natural, mas a ausência de rigor teórico e experimental leva estes trabalhos à conclusões sem correspondência com a realidade e com a teoria conhecida sobre o assunto.

Na seção 4.2 são relatados os esforços de alguns países na pesquisa em ventilação natural. A seção 4.3 traz uma breve discussão sobre os desafios na implementação de técnicas de predição da ventilação natural na dinâmica de funcionamento dos escritórios de arquitetura.

4.1 Pesquisa em ventilação natural no Brasil

VIANNA (2001) realizou um levantamento do estado da arte e histórico da pesquisa em conforto ambiental nas últimas décadas no Brasil. Como resultado deste trabalho, foram geradas estatísticas com a representatividade de cada ramo da pesquisa de conforto ambiental. Os estudos sobre ventilação no interior do edifício ocupavam apenas 2,5% da totalidade das pesquisas. A comparação entre os dados da tabela 1 do capítulo 1 e a pequena representatividade da pesquisa em ventilação mostra uma situação contraditória: atribui-se à ventilação uma grande importância, mas pouco se pesquisa sobre o assunto.

De forma a construir um panorama da pesquisa em ventilação natural posterior ao trabalho de VIANNA (2001), foram pesquisadas algumas fontes relevantes e com maior facilidade de acesso. O relato a seguir apresenta as referências bibliográficas encontradas usando a palavra-chave "ventilação":

- nas teses e dissertações das escolas de arquitetura, engenharia, agronomia e meteorologia disponíveis nas bibliotecas da USP – Universidade de São Paulo;
- na ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- nos anais do ENCAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído de 2005;
- nos anais do PLEA – Passive and Low Energy Architecture International Conference do ano de 2005;

Algumas referências anteriores a VIANNA (2001) que não foram citadas no seu trabalho são também elencadas.

4.1.1 FAU-USP

NA FAU-USP foram localizados dois trabalhos de pós-graduação.

PRATA (2005) realizou pesquisa na utilização de diversas ferramentas experimentais e computacionais para a determinação do campo de ventos no nível do pedestre em ambientes urbanos. O trabalho abre diversas frentes de pesquisa em ventilação, e teve forte influência no desenvolvimento desta pesquisa de mestrado.

VIANNA (2005) realizou estudo de visualização em modelo reduzido de ventilação natural em edifício com átrio. O trabalho não traz qualquer nova referência bibliográfica, seja sobre as técnicas de visualização, seja sobre a análise dimensional.

4.1.2 EESC-USP

Na EESC-USP – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – foram encontrados dois trabalhos experimentais na área de ventilação a destacar, ambos anteriores ao levantamento de VIANNA (2001).

FRAZAO (1990) realizou pesquisa com experimentos em modelo reduzido e abordagem teórica do problema de ventilação em túneis rodoviários. A ventilação em túneis e em edifícios possui várias semelhanças, sendo este trabalho uma referência importante, pois conclui que a modelagem matemática utilizada é válida.

FARIA (1997) realizou um levantamento das condições de vento na cidade de Bauru e os comparou com os dados regionais de vento. A pesquisa conclui, a despeito dos diversos tipos de ocupação, que o vento é homogêneo na cidade e cerca de 40% menor que o vento regional. O vento tende a ser canalizado pelas vias mais largas e apresenta esta direção. Outras discrepâncias entre os ventos urbanos e regionais são encontradas em alguns períodos e são atribuídas a brisas térmicas localizadas.

4.1.3 ESALQ-USP

A ESALQ-USP – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo – é uma Escola de Agronomia que atribui grande importância à chamada “ambiência”: o estudo de conforto ambiental em instalações destinadas a atividades rurais. Em particular, a ventilação é fundamental em criações confinadas de animais e no cultivo de plantas em estufa.

A Escola realizou recentemente três pesquisas na área de ventilação.

A pesquisa de ATARASSI (2000) propôs uma modelagem para o desempenho térmico de uma estufa. O trabalho, a despeito da finalidade, lida com os mesmos problemas que outros trabalhos de simulação enfrentam, tais como COSTOLA e ALUCCI (2003) e MENDES et al. (2003). Aqui também, o tratamento dado à ventilação é bastante primário, uma vez que a ventilação é apenas um dos problemas a serem resolvidos neste tipo de pesquisa.

As pesquisas de CAMPONEZ DO BRASIL (2004) e a de MENDES (2000) tratam do manejo da ventilação natural em instalações rurais, abordando o uso de cortinas, exaustores eólicos, telas de proteção das aberturas e seus efeitos nas condições ambientais internas. Em ambos os casos, a ausência de uma análise teórica da ventilação leva a um grande trabalho experimental com pequenas chances de transposição dos resultados para outras instalações com características diferentes daquela estudada. Todavia, é possível encontrar diversas conclusões de caráter qualitativo.

As questões de conforto ambiental em instalações rurais e em edifícios urbanos apresentam grandes semelhanças, porém são estudadas por grupos de pesquisa distintos e com pouca comunicação entre si. Evidência deste fato é a ausência das Escolas de Agronomia no levantamento feito por VIANNA (2001).

4.1.4 POLI-USP

Na POLI-USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – não foi encontrada uma única pesquisa de pós-graduação com a palavra-chave ventilação. No exterior, a formação de “Environmental Engineer” é vinculada à engenharia mecânica. No Brasil não existem cursos superiores para este fim e as escolas de engenharia civil e mecânica dedicam seus esforços a outras áreas que não a ventilação. A pesquisa de HADDAD (2003) sobre simulação de incêndios utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional, ou CFD – Computational Fluid Dynamics, como comumente utilizado, é a que guarda mais semelhanças com o objeto desta pesquisa. Utilizando um software gratuito, o FDS – Fire Dynamics Simulator, desenvolvido pelo NIST – National Institute of Standards and Technology of United States of America, a retirada de fumaça por dutos de exaustão foi estudada com o método de Simulação de Grandes Escalas, mais conhecido pela sigla em inglês LES – Large Eddy Simulation. O LES é conhecido pela capacidade de modelar de forma mais precisa a turbulência do escoamento, porém demanda grande capacidade computacional de processamento e

armazenamento, da ordem de 100 vezes mais que o modelo $\kappa - \varepsilon$. (JIANG, 2002)

4.1.5 IAG-USP

Quanto ao IAG-USP - Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, a única pesquisa encontrada foi a de CCOYLLO (1998), sobre a dispersão de poluentes atmosféricos na cidade de São Paulo. A dispersão de poluentes é um assunto recorrente nos trabalhos da escola de meteorologia, contudo o enfoque utilizado diz respeito a toda a CLP - Camada Limite Planetária, ou seja, da superfície até uma altitude entre 100 e 1.000 m, e não aos primeiros 60 metros a partir do solo onde estão os edifícios, e conseqüentemente os problemas de PVN - Predição de Ventilação Natural.

4.1.6 ABNT

No ano de 2005, a ABNT publicou a norma técnica NBR 15220-3 Desempenho Térmico de Edificações – PARTE 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. A Norma divide o país em zonas, ilustradas no mapa da figura 2, para as quais estabelece diretrizes construtivas.

Figura 2 . Zoneamento Bioclimático Brasileiro pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Estabelecer diretrizes com relação à ventilação natural é uma tarefa bastante complexa, uma vez que a forma do edifício e seu entorno são determinantes para a eficácia desta estratégia de projeto. Assim, a Norma adota uma postura reducionista, e classifica as aberturas do edifício em uma dada zona climáticas como: pequenas, médias, ou grandes. Esta classificação é questionável na medida

em que ignora elementos importantes no desempenho da edificação quanto à ventilação. Abaixo são relacionados alguns aspectos que modificam o desempenho de uma abertura, e que não são considerados dentro da classificação proposta pela Norma:

- a. Uma abertura média pode ter bom desempenho quando o edifício está exposto ao vento, e desempenho ruim quando o edifício for obstruído;
- b. Uma abertura pequena e bem localizada na envoltória do edifício pode ter um desempenho muito superior ao de uma abertura grande mal localizada, independente do que seja grande ou pequeno;
- c. Uma abertura grande, composta por venezianas, e uma pequena totalmente desobstruída terão desempenho similar, mesmo sendo de tamanhos diferentes;
- d. Dois edifícios de mesma forma, mesmas janelas e exposto ao mesmo vento, mas com cargas térmicas diferentes, seja pela ocupação interna, pelas características da envoltória ou pelo sombreamento pelos vizinhos terão cada um uma ventilação diferente;
- e. Duas pequenas aberturas colocadas lado a lado em uma fachada ou dispostas uma junto ao piso e a outra junto ao teto terão desempenhos totalmente diferentes;
- f. Uma abertura retangular colocada na horizontal ou na vertical terão desempenhos totalmente diferentes. Ou seja, um caixilho de 1x3m e outro de 3x1m não propiciam a mesma ventilação.

Em suma, o desempenho da ventilação é função não só do tamanho da abertura, mas de outros fatores como os a seguir relacionados:

- a. dos ventos aos quais o edifício está exposto,
- b. da posição das aberturas na envoltória,
- c. do tipo de caixilho,
- d. da carga térmica,
- e. da posição das aberturas em relação ao recinto,
- f. da proporção da abertura.

Se a janela é pequena, grande, horizontal, vertical, com telas, a barlavento ou sotavento, não caberia a norma especificar. Caberia sim ao projetista, seguindo os procedimentos descritos na Norma, demonstrar que as janelas projetadas atenderão ao desempenho previsto na norma.

A tabela abaixo é apresentada em anexo na Norma:

Aberturas para ventilação	A (em % da área de piso)
Pequenas	$10\% < A < 15\%$
Médias	$15\% < A < 25\%$
Grandes	$A > 40\%$

Tabela 2 . Aberturas para ventilação Tabela C.1 da NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

TOLEDO (2001) discute a prática adotada em diversas legislações edilícias de determinar as áreas das aberturas como frações da área de piso do cômodo, e conclui que tal prática não é aconselhável.

Supõe-se que a intenção da norma foi ponderar a importância da estratégia ventilação natural no projeto em função das zonas climáticas. Este sim, um conceito abstrato e não passível de mensuração, mas correto: a importância da ventilação natural é grande, média ou pequena em função das características climáticas da zona.

Como será apresentado adiante, a adoção da Norma pelo menos como instrumento de pesquisa acadêmica já é intensa, o que torna urgente sua revisão.

Por fim, normas que se destinem a avaliar a ventilação natural mesmo que de maneira simplificada, como é o caso da norma britânica BS 5925 (BSI, 1991), devem ser adotadas para amparar normas mais gerais como é o caso da NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Da mesma forma que normas como a NBR 6123 "Forças devidas ao vento em edificações" (ABNT, 1988), podem vir a suprir informações fundamentais sobre coeficiente de pressão caso os seus anexos informativos sejam revistos e ampliados.

A NBR 6123 (ABNT, 1988) na sua forma atual é de pouca utilidade para a PVN. Com relação aos dados de vento, a Norma traz apenas valores máximos de intensidade e recomenda que a verificação dos esforços devidos aos ventos seja feita para todas as direções. Com relação aos dados de coeficientes de pressão, eles são fornecidos apenas para algumas formas simples (paralelepípedos, cilindros, e afins) e apenas valores médios para cada uma das faces. Vê-se que a concepção da Norma NBR 6123 é pautada pela necessidade de determinar situações extremas às quais o edifício deve resistir, enquanto na PVN busca-se determinar a vazão em situações cotidianas, para as quais a norma infelizmente fornece poucos subsídios.

4.1.7 PLEA

Em levantamento feito nos anais do mais recente PLEA, realizado no Líbano em 2005, foram identificados 19 trabalhos de pesquisadores brasileiros que utilizam o termo "ventilação", demonstrando a relevância do tema.

Em 16 trabalhos a ventilação aparece como item acessório, relevante, porém não estudado, seja por falta de equipamento, seja pelo software utilizado na simulação não considerar a ventilação.

Os três trabalhos nos quais a ventilação tem papel central são: GONÇALVES e DUARTE (2005), OLIVEIRA et. al. (2005) e MARCONDES et. al. (2005).

No trabalho de GONÇALVES e DUARTE (2005) há uma grande preocupação com a ventilação natural, embora aspectos técnicos da PVN não sejam citados. Esta prática, comum em diversas publicações nacionais e internacionais não permite que o leitor assuma uma posição crítica com

relação aos resultados, já que faltam informações sobre a origem dos valores utilizados para os coeficientes de pressão e coeficientes de descarga das aberturas, por exemplo. O mesmo ocorre em MARCONDES et. al. (2005). Em ambos os trabalhos, outros dados relevantes para a simulação térmica do edifício são omitidos, demonstrando que a abordagem adotada nos artigos não prioriza a metodologia da simulação, e sim seus resultados na arquitetura. Todavia, a grande importância atribuída à ventilação em ambos os estudos poderia se refletir nas informações a respeito da PVN utilizada.

Em contra partida, o trabalho de OLIVEIRA et. al. (2005) que utiliza estudos em modelo reduzido para inferir o desempenho de edificações já construídas é extremamente detalhado. Foram utilizados os resultados em GIVONI (1962), que obteve em túnel de vento a velocidade média interna do ar em modelos de planta quadrada. Um exemplo dos resultados de GIVONI (1962) é apresentado na figura 3 (esquerda superior). Nota-se que a velocidade interna é 36% da velocidade do vento na área externa. Devido à presença de muros externos, OLIVEIRA et. al. (2005) adotou uma correção para a velocidade do vento na área externa utilizando os resultados experimentais de BOULET apud OLIVEIRA et. al. (2005), conforme exemplificado na figura 3 (esquerda inferior) na qual é apresentada a fração da velocidade do vento em relação à distância a sotavento do muro.

Figura 3 . Imagens do trabalho de OLIVEIRA et. al. (2005)

Partindo destes estudos experimentais, e de posse dos dados de velocidade da cidade em questão, OLIVEIRA et. al. (2005) calculou a velocidade no interior das UH – unidades habitacionais – reais, como a mostrada na figura 3 (direita).

Pode-se observar que não há semelhança geométrica entre os modelos em escala e a realidade estudada. A planta da UH é irregular, existe um beiral e a cobertura é inclinada, enquanto em GIVONI (1962) a planta é quadrada, não há beiral e a cobertura é paralela ao piso. Já o muro da UH não é contínuo como o de BOULET apud OLIVEIRA et. al. (2005). A bibliografia indica o papel fundamental da semelhança geométrica, como em MUNSON et. al. (1997): “A escala geométrica

precisa ser completa. Para isto, a rugosidade superficial, ou pequenas protuberâncias na estrutura, também precisa estar em escala porque ela pode influenciar significativamente o escoamento". Entende-se que as diferenças entre os modelos utilizados nos estudos de GIVONI (1962) e BOULET apud OLIVEIRA et. al. (2005) em relação às casas estudadas por OLIVEIRA et. al. (2005) podem invalidar o aspecto quantitativo do estudo.

4.1.8 ENCAC

Os anais da última edição (ANTAC ,2005) deste importante evento para a pesquisa em ventilação natural no país promovido pela ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, revelam um quadro semelhante ao encontrado no PLEA. De um total de 298 artigos, 132 artigos, fazem uso da palavra "ventilação" e em um sétimo deles (43) a palavra "ventilação" aparece no resumo do trabalho. A expressão "coeficiente de pressão", contudo, aparece em apenas dois artigos, enquanto as expressões "coeficiente de descarga" e "perda de carga" não são citadas uma única vez.

Da análise dos trabalhos nos quais a ventilação é tema da pesquisa pode-se identificar alguns pontos comuns, que serão tratados nos itens 4.1.8.1 a 4.1.8.8.

4.1.8.1 Medição do vento

LOURA et. al. (2005) realiza uma comparação entre a vazão medida e a prevista pelo método empírico de Van Straaten e pelos softwares AIOLOS e COMIS/Energy Plus. O vento que incide no edifício foi medido utilizando uma estação meteorológica, que foi posicionada dentro da área de influência do próprio edifício, e, por isso, pode influir nas medições. A figura 4 mostra o posicionamento da estação, em um terraço no último pavimento do edifício.

Figura 4 . Imagem do edifício estudado em LOURA et. al. (2005)

Em CÂNDIDO et. al. (2005) o anemômetro é posicionado conforme demonstrado na figura 5 (acima) e as medições de intensidade do vento são feitas apenas quando este incide em uma direção de interesse que está, em tese, desobstruída. O gráfico da figura 5 (abaixo) mostra a ausência de correlação entre velocidade interna do ar e intensidade do vento encontrada por CÂNDIDO et. al. (2005): um resultado de difícil interpretação pois o esperado seria que ventos com a mesma intensidade e direção produziram a mesma velocidade do ar interno em um dado ponto. A medição do vento dentro da área de influência do edifício conduz a resultados improváveis como os apresentados no gráfico da figura 5.

Figura 5 . Posicionamento dos sensores (acima). Gráfico de velocidade no interior do edifício em função da intensidade do vento em uma dada direção (abaixo) (CÂNDIDO et. al., 2005)

De forma geral, em contextos complexos como os caracterizados pela presença de múltiplos obstáculos, seria desejável medir a pressão interna e as pressões externas nas aberturas, e monitorar o vento em área sem interferência, mesmo que mais distante do edifício em análise.

4.1.8.2 Medição da vazão

A vazão é a grandeza que caracteriza a ventilação, uma vez que esta é entendida como a passagem de ar no interior do edifício.

No experimento de LOURA et. al. (2005), a vazão é calculada com base na velocidade do ar medida no centro da janela, prática que segundo a bibliografia (YANG,2004) acarreta erros significativos.

YANG (2004) utilizou sensores de menor incerteza que LOURA et. al. (2005) (anemômetro ultrassônico) posicionados no centro da abertura e comparou as vazões indicadas pelos anemômetros com medições obtidas a partir da curva de concentração de um gás traçador, concluindo que os erros na vazão medida pelos anemômetros não são aceitáveis para estudos de ventilação.

Contudo, LOURA et. al. (2005) é o único trabalho a medir a vazão.

4.1.8.3 Caracterização da abertura

Ainda em LOURA et. al. (2005), nota-se a dificuldade em caracterizar a abertura. Os coeficientes de descarga (C_z) das mesmas não foram estudados, como é o caso de CAVALCANTI et. al. (2005), LIMA et. al. (2005), LEAL et. al. (2005) e CARDOSO et. al. (2005). O estudo dos C_z envolveria medidas de pressão nas aberturas e no interior do recinto e de medidas de vazão confiáveis o que está além do escopo de todos os trabalhos apresentados.

O C_z é o parâmetro que permite descrever o comportamento da abertura e das obstruções junto dela, como os brises. MATOS et. al. (2005) utiliza o software COMIS e afirma que o mesmo "não considera a existência destes elementos sombreadores nos seus cálculos". Apesar do C_z ser um parâmetro de entrada do COMIS, MATOS et. al. (2005) não menciona sua existência.

4.1.8.4 Coeficientes de pressão (C_p)

A distribuição de pressão nas faces do edifício é um dado fundamental no estudo da ventilação natural, mas, como diz TOLEDO et. al. (2005-2), "a teoria da distribuição de pressão é de difícil aplicação em edifícios de forma ou distribuição interior complexas, pois, nesses casos, a distribuição da pressão nas faces do edifício e o escoamento interno são difíceis de serem observados ou estimados". Para os que se propõem a estudar a ventilação natural não há como se omitir desta análise.

Apenas MOTEZUKI et. al. (2005) e LOURA et. al. (2005) abordam o assunto.

MOTEZUKI et. al. (2005) utiliza simulações bidimensionais com CFD para determinar os C_p em um cubo.

LOURA et. al. (2005) utiliza o modelo paramétrico para determinação do C_p que faz parte do código do COMIS. Este modelo não é adequado a edifícios complexos como é o caso de LOURA et. al. (2005), mas a preocupação com a existência do parâmetro diferencia o trabalho de outros que também utilizam o COMIS, como MATOS et. al. (2005).

Todavia, em LOURA et. al. (2005) os valores calculados de C_p pelo COMIS poderiam ter sido utilizados nas simulações comparativas realizadas com o software AIOLOS. A figura 6 apresenta os resultados obtidos nas simulações com o COMIS e o AIOLOS.

Na figura, a área entre as linhas que representam os valores medidos e simulados foi preenchida

de forma a ressaltar as diferenças encontradas.

Figura 6 . Simulações com os softwares COMIS e AIOLOS. (LOURA et. al., 2005)

A teoria nos dois softwares é muito semelhante, e a diferença nos resultados é fruto apenas da ausência de C_p na simulação com o AIOLOS.

LOURA et. al. (2005) conclui que o COMIS é mais fiel a realidade que o AIOLOS, baseado na vazão média durante o experimento. Contudo, vê-se na figura 6 que o COMIS apresenta grandes diferenças com os dados medidos, e se a vazão média simulada é próxima da vazão medida, isto se deve a uma coincidência e não a capacidade do modelo de simular a ventilação com os dados de entrada fornecidos.

O trabalho de LOURA et. al. (2005) permite avaliar as diversas implicações do uso incorreto de softwares de cálculo de vazão por ventilação natural, assim como uso de dados de entrada inadequados, como ocorre neste caso com os coeficientes de pressão.

4.1.8.5 Campo de velocidade

A velocidade é uma grandeza vetorial que varia no espaço e no tempo, ou seja, um escoamento não é dado por uma única velocidade, e sim por três componentes "u,v,w" (as velocidades nos eixos x,y,z). Estes valores devem ser definidos para cada ponto x,y,z da região de interesse, o que constitui o campo de velocidade, em cada instante t. O campo de velocidades é fortemente influenciado pelas configurações das fronteiras sólidas.

Assim, medir a velocidade em apenas um ponto de uma sala e extrapolar as conclusões para o restante da sala, ou estudar o comportamento de um edifício sem levar em conta seu entorno pode levar a conclusões equivocadas sobre a ventilação.

Diversos trabalhos utilizam extrapolações de medidas pontuais ou análises que desconsideram o entorno do problema, e seus resultados e conclusões têm pouca utilidade para futuros estudos. Pode-se citar, entre outros, VIEIRA et. al. (2005), MATOS et. al. (2005) CÂNDIDO et. al. (2005).

TOLEDO et. al. (2005-1) apresenta uma contradição peculiar com relação a este tema, ao atribuir grande valor ao campo de velocidades interno, mas considerá-lo desvinculado do entorno no qual se

situa o edifício, e assim do campo de velocidades e de pressões externo.

4.1.8.6 Uso da norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Diversos trabalhos utilizam como referência a NBR 15220-3 (ABNT,2005): VIEIRA et. al. (2005), SPANNENBERG et. al. (2005), MATOS et. al. (2005), ALVES e SANTOS (2005) entre outros.

As críticas à Norma já realizadas nesta dissertação se estendem a estes trabalhos.

4.1.8.7 Parâmetros para simulação em CFD

As potencialidades no uso de CFD para a pesquisa e projeto em ventilação natural são imensas, e foram exploradas por diversos trabalhos.

A pesquisa de MOTEZUKI et. al. (2005) desenvolveu um código de CFD utilizado na pesquisa, e pode discutir questões fundamentais à todos os trabalhos na área.

A capacidade de gerar resultados visualmente impactantes com relativamente "pouco esforço" torna o CFD uma ferramenta perigosa, pois os resultados podem não ter qualquer conexão com a realidade.

Assim, decisões fundamentais ao sucesso de uma simulação de CFD deveriam ser explicitadas nos trabalhos. Estas decisões e parâmetros envolvem o tamanho do domínio, obstrução máxima, independência da malha, convergência, modelo de turbulência usado, definição das condições de contorno, representação da camada limite - y^+ , entre outros que serão discutidos no capítulo 8.3.

4.1.8.8 Modelagem teórica

Nenhum dos trabalhos, salvo MOTEZUKI et. al. (2005), expõe as equações de modelagem do escoamento utilizadas. Nota-se que em geral não há uma preocupação com a modelagem. ASSIS (2005) ao analisar a pesquisa em conforto urbano diz "Em função das limitações da abordagem descritiva (...), deve haver um esforço para avançar em direção aos estudos de modelização.". O mesmo pode-se dizer do estudo de ventilação, pois muitas das críticas apresentadas aos trabalhos são oriundas da pouca importância dada às modelagens teóricas para os fenômenos estudados.

4.1.9 Conclusões quanto ao estado da arte na pesquisa em ventilação natural no Brasil

O saldo da atualização do levantamento de VIANNA (2001) permite concluir que a ventilação é hoje considerada um tópico importante dentro da problemática do conforto térmico e qualidade do ar no edifício e na cidade. Contudo, o número de trabalhos de caráter preditivo ou experimental de caráter não exploratório continua reduzido.

A predição se apresenta como a ferramenta fundamental no projeto de ventilação natural, pois

por meio dela pode-se estimar o desempenho das aberturas, e conseqüentemente dimensioná-las com base no partido adotado pelo arquiteto. Estes, que como será apresentado a seguir, passam a apresentar uma nova demanda na PVN em seus projetos. A experimentação é etapa fundamental na validação dos modelos preditivos.

4.2 Estado da arte na pesquisa em ventilação natural no mundo

A pesquisa em ventilação natural no mundo, que de forma geral foi intensa no último século, teve momentos importantes durante a última década.

Como destaca ETHERIDGE e SANDBERG (1996) na introdução de seu livro, a profusão de material a que é submetido o neófito em ventilação torna o aprendizado desta disciplina complexo e demorado. Neste sentido, diversas obras foram lançadas com a intenção de guiar o estudante e novo pesquisador na área, como ETHERIDGE e SANDBERG (1996), AWBI (1998), LIDDAMENT(1996), ALLARD (1998), SANTAMOURIS (1997), CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers (2005). Estas obras, diferente dos clássicos OLGAY (1998) e GIVONI (1962) têm forte base teórica, e não apenas imagens e dados gerais de simulações em modelos reduzidos, como o apresentado na figura 7.

Figura 7 . Visualização de escoamento OLGAY (1998)

No ano de 2002, foi criado pela empresa Veetech, de propriedade do ex-diretor do AIVC - Air Infiltration and Ventilation Center - Martin Liddament, um periódico específico para ventilação natural, o IJNV - International Journal of Natural Ventilation.

A publicação tem um excelente corpo editorial, mas ainda não apresenta valores dos índices de impacto para que se possa avaliar sua influência sobre a comunidade científica. Não há assinatura disponível na USP, ou no portal "Periódicos da CAPES".

A IEA - International Energy Agency tem sido um importante órgão de fomento para as pesquisas em ventilação. Nos projetos definidos pela IEA, alguns dos países membros se responsabilizam

voluntariamente pela execução e financiamento da pesquisa. O AIVC, por exemplo, é um projeto da IEA que opera continuamente desde a década de 1970 difundindo informações e realizando pesquisa na área de ventilação natural. Todavia, nenhum material produzido pelo AIVC foi encontrado nas bibliotecas pesquisadas.

Diversos programas com países da Comunidade Européia se propuseram a estudar questões específicas da ventilação. Dentre eles destacam-se: JOULE, PASCOOL, NATVENT, ALTENER. Cada um destes programas sistematizou conhecimentos teóricos, desenvolveu ferramentas computacionais e procedeu a validações que são utilizadas nesta pesquisa de mestrado.

O COMIS e sua posterior integração ao software de simulação térmica do edifício ENERGY PLUS, juntamente com o trabalho de DEAR (1997) e da ASHRAE, foram as principais contribuições dos EUA – Estados Unidos da América. O COMIS apresentou um grande avanço, principalmente ao agregar um modelo de previsão de coeficientes de pressão para edifícios de planta retangular e entorno desobstruído.

O Reino Unido, representado pela BSI – British Standard Institution, centralizou o desenvolvimento de normas européias na área de ventilação. O CIBSE publicou o mais didático manual de ventilação natural dentre os consultados para esta pesquisa, o AM10 (CIBSE, 2005). A empresa privada EDSL lançou a nova versão de seu software de análise de desempenho térmico, o TAS NG, que permite sofisticadas simulações de controle de ventilação natural, e é usado nesta pesquisa.

A Dinamarca, por meio do Laboratório Risø, desenvolveu nova versão do software WASP e publicou sua teoria juntamente com o Atlas de Ventos Europeu (TROEN e PETERSEN, 1989).

O Japão tem contribuído com diversas publicações em periódicos internacionais, e tem também disponibilizado grande quantidade de resultados brutos de testes em túnel de vento.

De forma geral, grandes investimentos foram feitos em pesquisas em ventilação natural, mas o cenário das predições de ventilação natural ainda apresenta grandes incertezas.

O relato de ALLARD (1998), a despeito de terem se passado 8 anos desde sua publicação, ainda se mantém atual. Nele são apresentadas avaliações da ventilação natural realizadas em três edifícios. O primeiro edifício possuía aberturas em somente uma das paredes de cada sala, não tendo assim ventilação cruzada. O segundo possuía salas em faces opostas do edifício conectadas por uma porta propiciando ventilação cruzada. O terceiro possuía três andares conectados por um hall de escadas dotado de abertura na cobertura, propiciando ventilação por efeito chaminé de grande eficiência.

Os resultados das medições de vazão no interior do recinto foram comparados com os obtidos em simulações com softwares que utilizam o modelo de rede ou multi-zona. Na tabela 3, são apresentados os dados relativos ao edifício 1. A despeito de ALLARD (1998) afirmar que em geral são obtidas correlações de 0,75 entre os resultados experimentais e os previstos pelas simulações, neste exemplo as correlações são 0,02 para o caso sem fator de correção, e 0,5 quando o fator de correção

é utilizado. As correlações extremamente baixas revelam a conhecida fragilidade do Modelo de Rede para tratar com salas ventiladas por um único lado.

Experimento	Previsão pelo Modelo de Rede (m3/h)	Previsão pelo Modelo de Rede com fator de correção Cf (m3/h)	Resultados Experimentais (m3/h)
1	632	354	123
2	467	297	174
3	539	391	193
4	762	318	182
5	28	227	216
6	193	208	316
7	116	449	482
8	171	366	279
9	413	413	431
10	296	226	336
11	560	373	379
12	664	284	332
13	898	190	253
14	182	402	390
15	324	413	198
16	224	311	202
17	451	440	245
18	516	454	322
19	1355	568	434
20	344	429	427
21	508	476	503
22	473	429	449

Tabela 3 . Comparação entre dados medidos e previsão Edifício 1. ALLARD (1998)

Experimento	Medições zona 1 (Kg/h)	Previsão (Kg/h)	Medições zona 2 (Kg/h)	Previsão (Kg/h)
1.1	1037	1547	989	1453
1.2	1646	1566	1348	1454
1.3	2033	1645	1436	1536
2.1	1281	1712	1349	1602
2.2	1464	1719	1936	1601
2.3	1749	1654	1632	1547
2.4	2192	1719	1578	1605
2.5	2060	1695	1506	1599
3.1	1061	1178	1060	1154
3.2	1298	1014	1178	1142
3.3	1408	1114	1540	1095
4.1	824	1349	923	1222
4.2	2024	1342	1876	1240
5.1	1198	1040	1094	1003
6.1	1793	1647	1662	1472
6.2	1763	1635	1325	1495
6.3	1281	1726	1122	1580
6.4	1714	1683	1899	1561

Tabela 4 . Comparação entre dados medidos e previsão Edifício 2. ALLARD (1998)

Na tabela 4 são apresentados os valores medidos e previstos para o edifício 2. Os coeficientes de correlação entre a vazão medida e a calculada para as zonas 1 e 2 são respectivamente 0,47 e 0,40. O texto justifica que imprecisões na escolha dos coeficientes de pressão e de descarga podem ser causa das diferenças encontradas.

No terceiro exemplo, no qual os ensaios foram realizados em ocasiões sem vento para avaliar a fidelidade do modelo em relação ao efeito chaminé, foi encontrado coeficiente de correlação de 0,97, demonstrando o imenso abismo entre os modelos preditivos para este fenômeno quando comparados aos modelos para ventilação por ação dos ventos, que são objeto desta pesquisa.

4.3 Arquitetura e ventilação natural

Alguns dos mais importantes arquitetos brasileiros projetaram edifícios de atestada importância partindo da adequação da arquitetura ao clima. A utilização de algumas estratégias em nossa arquitetura, como o uso de brise-soleil, tem sido documentada com relativa fecundidade (ATEM, 2003). No caso da ventilação, não foi possível localizar trabalhos que analisem as obras de arquitetura sob a ótica desta estratégia.

Dos arquitetos em atuação no país, é certamente João Filgueiras Lima – o Lelé, o maior divulgador da interação entre clima e arquitetura, e especificamente do uso da ventilação natural, tendo seus projetos premiados, tanto no Brasil quanto no exterior (Grande Prêmio da Bienal de Arquitetura e Engenharia de Madri, Grande Prêmio Latino-Americano da Bienal de Buenos Aires, representante brasileiro na 7ª Mostra Internacional de Arquitetura de Veneza – juntamente com Paulo Mendes da Rocha).

No VII ENCAC, realizado em 2003 em Curitiba, Lelé apresentou a palestra "A Obra e a Prática Profissional de um Arquiteto Brasileiro". Nesta palestra, expôs obras realizadas ao longo dos últimos vinte anos, todas com uso predominante da ventilação natural, e comentou a diferença de desempenho entre seus antigos projetos e os atuais no tocante a esta estratégia. Segundo ele, os princípios utilizados são os mesmos: a ação dos ventos e efeito chaminé. Contudo o desempenho está diretamente relacionado com o dimensionamento, posicionamento e projeto dos elementos de abertura. No passado, ele diz, o tratamento destas questões era intuitivo, e o resultado não era o esperado a despeito das intenções e esforços para a utilização da ventilação natural. Hoje, a sua equipe conta com um membro que realiza análises de desempenho da edificação projetada, e os resultados no edifício construído são muito mais próximos das intenções de projeto.

Este exemplo, rico em sua sinceridade, ilustra os problemas de ordem técnica vivenciados por um entusiasta em relação ao tema, um arquiteto possuidor de um talento atestado e de condições de trabalho incomuns entre seus pares: a parceria de décadas com a Rede Sarah de Hospitais, principal laboratório para seus experimentos. Da observação da cidade, das publicações de arquitetura no

país, e do convívio com os colegas de profissão é possível notar o descaso dos arquitetos em relação à ventilação natural, não por falta de sensibilidade em relação ao tema, e sim por falta de meios para intervir com segurança nestas questões.

No contexto internacional, pode-se destacar o relato de TWINN apud CROOME (1997), sobre um projeto que utilizou ventilação natural na Inglaterra: "O processo de projeto foi iniciado com uma semana de atividades conjuntas na qual os arquitetos da empresa ECD e os engenheiros ambientais da empresa Ove Arup & Partners trabalharam e discutiram com os representantes dos clientes as suas necessidades e a forma de atendê-las".

O projeto de arquitetura que considera a ventilação natural, assim como qualquer outro elemento que fuja ao padrão de projetos apresentado pelo mercado, requer investimentos financeiros e humanos, e prazos que não são os normalmente praticados. Não se trata apenas de questões técnicas, mas de responsabilidade, expectativa e da gestão do futuro edifício que devem ser necessariamente discutidas.

5 Introdução ao procedimento para predição da ventilação natural por ação dos ventos

O procedimento para predição da ventilação natural (PVN) apresentado a seguir tem por público alvo o projetista de arquitetura e o projetista do sistema de condicionamento natural do edifício.

O procedimento exige pouco conhecimento teórico do usuário, e está focado na escolha e utilização das ferramentas e na definição dos parâmetros necessários a PVN. São abordadas diversas ferramentas materiais (ensaios) e computacionais (simulações) às quais muitos dos projetistas não têm acesso. Este procedimento pretende estimular a construção ou aquisição dessas ferramentas.

Diversas simplificações foram adotadas na elaboração deste procedimento, e estas devem ser de conhecimento do projetista para que conclusões errôneas não sejam extraídas a partir de seu uso.

Todo modelo é uma "aproximação" (BUNGE,1974) da realidade, e este procedimento que pretende descrever o comportamento da ventilação natural não é uma exceção.

Espera-se também que este procedimento sirva de estímulo à medições em modelos em escala reduzida e em edifícios reais como forma de aferir os resultados previstos na PVN, e contribua para o aprimoramento do conhecimento aqui sistematizado nos casos em que este mostrar discrepâncias com os resultados das medições, nos termos descritos por KUHN (1987).

A predição da ventilação natural por ação dos ventos pode ser feita de diversas maneiras. A escolha do modo de predição a ser utilizado depende, particularmente do tipo de edifício, localização, importância da ventilação natural para o projeto, disponibilidade de recursos humanos e materiais.

Neste trabalho, o processo de PVN foi dividido em 5 etapas:

1. Obtenção e tratamento dos dados de vento.
2. Transposição dos dados de vento para o local do projeto.
3. Definição dos coeficientes de pressão no edifício.

4. Definição dos coeficientes de descarga das aberturas.

5. Cálculo da vazão por um balanço de massa, momento e energia, simultâneo ou não ao cálculo do desempenho térmico do edifício.

Cada uma destas etapas pode ser realizada de maneira simplificada ou mais criteriosa, com reflexos na qualidade da PVN resultante. Os próximos capítulos abordam os objetivos, dilemas e possibilidades de cada uma destas etapas.

6 Obtenção e tratamento dos dados de vento

Esta etapa do procedimento se destina a balizar o projetista na obtenção, tratamento e definição do nível de incerteza dos dados de vento para a PVN.

Na seção 6.1 é apresentada a fundamentação teórica sobre o vento, com destaque para as equações de similaridade que permitem descrever os perfis verticais de vento. A totalização dos dados de vento também é discutida em detalhes.

Na seção 6.2 é apresentada a importância do vento para a PVN, e na seção 6.3 são descritos os órgãos que monitoram/disponibilizam séries históricas de dados de vento. Na seção 6.4 são apresentados alguns aspectos da medição de vento.

Como exemplo das questões tratadas neste capítulo, os gráficos da figura 8 apresentam dados coletados simultaneamente em duas estações meteorológicas próximas: uma no Guarujá (esquerda) e a outra em Santos (direita). Ambas estão na orla da praia e se poderia esperar um resultado bastante semelhante, dada a sua proximidade.

Figura 8 . Freqüência de ocorrência dos ventos em função da direção, para setores de 30°. Dados coletados simultaneamente em Santos e no Guarujá

A discrepância entre os resultados se refletirá na PVN e serve como indicador da importância das atividades desta etapa do procedimento, pois a principal explicação para tal diferença é a forma de coleta destes dados.

6.1 Fundamentação teórica

6.1.1 Fenômenos que originam o vento

O vento é causado por desigualdades na pressão atmosférica e pelo movimento de rotação da Terra.

As desigualdades de pressão são provocadas pelas diferentes temperaturas do ar, não só ao longo superfície da Terra, mas também nas diferentes altitudes. Sendo a pressão do ar função direta da temperatura, estas variações criam zonas de sub pressão, chamadas depressões, e zonas de alta pressão, chamadas anticiclones. Vento é o nome genérico dado às grandes massas de ar que se movem da região de alta pressão para a região de baixa pressão.

As diferenças de temperatura, por sua vez, são criadas basicamente pelas diferenças na incidência da radiação solar em função da latitude, da hora (rotação da Terra) e do dia do ano (translação da Terra) e originam os movimentos de ar apresentados na figura 9 (esquerda).

Outro importante fenômeno na percepção que se tem do movimento das massas de ar deve-se ao fato das observações serem realizadas a partir da superfície terrestre, que está em movimento, causando uma aparente deflexão dos ventos no sentido contrário ao da rotação da Terra, o chamado Efeito Coriolis, também exemplificado na figura 9 (direita).

Figura 9 . Circulação de ar no globo pela distribuição de temperatura e pressão (esquerda), e exemplo do Efeito Coriolis (direita)

Algumas características locais também criam diferenças na temperatura do solo e conseqüentemente na do ar como, por exemplo, as diferenças na transparência da atmosfera (nuvens, poluição, umidade) e as diferenças na superfície terrestre (albedo e calor específico), exemplificadas na figura 10.

Figura 10 . Exemplo de vento criado pelas características do local: brisas em área de orla (FROTA e SCHIFFER, 2000)

As medidas da velocidade e direção do vento são feitas em áreas desimpedidas, a dez metros de altura, e são, em geral, totalizadas a cada hora. A rigor estes dados são válidos somente para o local de leitura e seu tratamento estatístico permite uma previsão da freqüência de ocorrência da direção e velocidade do vento.

A velocidade do vento cresce com a altura acima do solo, até um limite (entre 100 e 1000 m) a partir do qual a velocidade independe da altitude.

6.1.2 Vento: notação vetorial x notação meteorológica

O vento é uma grandeza vetorial, ou seja, é composto de intensidade e direção.

Usualmente, o vento é representado por sua intensidade (ou módulo) em m/s e pela sua direção de origem, em um ângulo (em graus) com origem no Norte e em sentido horário, como ilustrado na figura 11.

Figura 11 . Representações meteorológicas do vento

Neste caso considera-se que a componente vertical do vento, no eixo z, é igual a zero, o que é adequado, considerando-se apenas valores médios ao longo do tempo, mas não quando se observa o vento instantaneamente.

Outra forma de representar o vento é por meio de notação vetorial, na qual as componentes

x, y, z do vetor que simboliza o vento são representadas pelos valores u, v, w , sendo o vetor resultante indicado pela letra U , como ilustrado na figura 12.

Figura 12 . Representação vetorial do vento

Pela soma dos vetores temos que a intensidade do vetor resultante U é dada por:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

A notação vetorial facilita os cálculos de totalização dos dados de vento, possibilita a representação da componente vertical e é mais adequada à modelagem matemática do vento.

A designação do vento por intensidade e direção é inadequada para representar a turbulência.

6.1.3 Turbulência

Os gráficos da figura 13 mostram medidas da intensidade do vento efetuadas a cada segundo, exibida para diferentes intervalos de tempo. Nota-se que a velocidade do vento muda com frequência devido às variações nas forças que provocam o vento ao longo do ano, do mês e do dia.

No entanto, a sua variação está restrita a certos limites (superior e inferior). Os limites e a média tendem a ficar mais definidos à medida que um intervalo de tempo menor é analisado.

No último dos gráficos, onde é apresentado um intervalo de 10 minutos, vê-se que ainda existe a oscilação, mas sua alta frequência revela que ela obviamente não se deve à alterações nas forças que provocam o vento.

Esta oscilação do vento em torno de uma média definida é chamada de turbulência, e é uma propriedade do escoamento e não do fluido. A turbulência ocorre em diversos escoamentos com outros fluidos, e ainda é um campo fértil de pesquisas.

O tratamento estatístico do vento permite que o mesmo seja descrito por meio das médias de cada uma das componentes, u, v, w e pelas flutuações das componentes u', v', w' .

Em geral, a componente média vertical w (eixo z) é nula, mas não a turbulência w' , sendo que esta desempenha papel importante nos fluxos de energia da superfície da Terra para as camadas superiores da atmosfera. A turbulência pode ser entendida como um conjunto de turbilhões de

diferentes tamanhos que compõe o escoamento. A passagem dos turbilhões por um ponto provoca as oscilações na velocidade.

Figura 13 . Gráficos com variação da intensidade do vento no ano, no mês, no dia, na hora, no minuto (TROEN e PETERSEN, 1989)

Os turbilhões são responsáveis pelas oscilações, mas não pelo vento médio, que carrega os turbilhões provocando assim um transporte (ou advecção) da turbulência na direção do vento médio. Neste sentido a turbulência pode ser entendida como "algo" que é transportado pelo vento.

Os turbilhões de maior dimensão, em geral do tamanho da camada limite, carregam a maior parte da energia. Esta energia é transmitida aos pequenos turbilhões formando a chamada cascata de energia, que por fim é dissipada na forma de calor. Os grandes turbilhões são responsáveis pelos picos de velocidade percebidos em um dado ponto, em geral de frequência mais baixa. Os pequenos turbilhões provocam as pequenas oscilações na velocidade, e ocorrem com frequência mais elevada.

A energia cinética devida à turbulência é altamente dissipativa e deixa de existir se o mecanismo que a alimenta cessar. A turbulência da atmosfera tem duas fontes: uma térmica - igual à turbulência vista na água em ebulição, e outra mecânica - provocada pelo cisalhamento entre as camadas com diferentes velocidades e pelo contato com o solo.

A distribuição espacial e a proporção entre as quantidades dos diferentes turbilhões no escoamento variam em função de diversos fatores. A turbulência é homogênea quando os turbilhões estão igualmente distribuídos. Diz-se que ela é isotrópica quando a turbulência nas três direções tem as mesmas características. Um exemplo desta situação é o escoamento ao redor de um avião,

no qual a turbulência é homogênea e isotrópica. Esta situação é bastante diferente da encontrada nos problemas de ventilação. (STULL, 1988) A maior turbulência do vento se dá junto ao solo, onde os processos mecânicos e térmicos são mais intensos.

Quando a turbulência é isotrópica pode-se representá-la como uma porcentagem do vento médio. Diversos programas de CFD se utilizam desta forma de representação. TENNEKES (1972) contém um relato mais detalhado sobre a turbulência nos escoamentos de forma geral.

6.1.4 Hipótese de Taylor

Compreender o papel que cada um dos diferentes turbilhões exerce no escoamento exigiria que a velocidade fosse medida em todos os pontos do escoamento, algo possível apenas em laboratório, usando técnicas como a velocimetria por imagem, por exemplo.

Figura 14 . Ilustração da Hipótese de Taylor. (a) Um turbilhão de 100m de diâmetro apresenta uma diferença de temperatura de 5° C entre suas extremidades. (b) O mesmo turbilhão passa pelo sensor 10s depois, com velocidade de 10m/s.(STULL, 1988)

Em uma interpretação menos formal, a Hipótese de Taylor estabelece que em um ambiente horizontalmente homogêneo em condições estacionárias pode-se considerar que a turbulência está "congelada", sendo apenas transportada pelo vento médio, como ilustrado na figura 14.

Na figura 15 é apresentada a velocidade registrada por um anemômetro exposto ao vento durante um intervalo de seis segundos.

Figura 15 . Velocidade do vento em função do tempo (STULL, 1988)

Notam-se picos na leitura da figura 15, que correspondem a passagem dos maiores turbilhões pelo anemômetro. Estes picos se sucedem em intervalos de aproximadamente 1 segundo, sendo que o vento médio é de 5m/s. Se o mesmo tipo de turbilhão é responsável pelos picos, sua dimensão deve ser de:

$$\frac{5\text{m/s}}{1\text{s}} = 5\text{m}$$

As pequenas oscilações podem ser objeto de análise semelhante, revelando as escalas de turbulência neste escoamento.

A Hipótese de Taylor deve ser aplicada com cautela, pois as premissas adotadas na sua formulação raramente são encontradas em condições reais.

6.1.5 Rugosidade aerodinâmica e deslocamento da superfície

A chamada condição de "não escorregamento" (MUNSON et. al., 1997) estabelece que qualquer fluido em um escoamento adere aos elementos sólidos e apresenta velocidade igual a zero junto da fronteira sólida. Assim, as características da superfície terrestre modificam de maneira significativa a intensidade do vento.

O conceito de rugosidade aerodinâmica é usado para caracterizar o efeito de uma superfície em um escoamento, mas os resultados desta análise só são válidos acima da altura dos elementos de rugosidade. (RAUPACH et. al., 1991) No caso do ambiente urbano, os resultados que derivam da aplicação do conceito de rugosidade só se aplicam à região acima dos edifícios, ou seja, fora da região de interesse desta pesquisa, conforme ilustrado na área hachurada da figura 16. No entanto, a rugosidade desempenha papel importante na PVN, pois auxilia na caracterização do vento que chega à área de interesse da cidade. Na figura 16 o perfil de vento no trecho tracejado não apresentará a forma vista na figura devido à presença dos edifícios.

Figura 16 . Inadequação do conceito de rugosidade para a região de interesse da PVN

Define-se rugosidade aerodinâmica (z_0) como a altura acima do solo na qual a velocidade média é igual a zero (STULL, 1988). Por esta definição entende-se que pode haver movimento de ar turbulento na área definida como a altura da rugosidade aerodinâmica, desde que a média seja igual a zero.

Em geral a rugosidade aerodinâmica é menor que a altura dos elementos de rugosidade. No caso da cidade, estes elementos são os edifícios, árvores, lagos, muros, descampados e afins, com alturas variando entre três e 100 m em um cenário heterogêneo ao qual pode-se atribuir uma rugosidade aerodinâmica de aproximadamente 1 m.

As figuras 17 e 18 apresentam tabelas com a rugosidade de alguns tipos de terreno.

Figura 17 . Rugosidade Aerodinâmica de alguns tipos de terreno. (STULL, 1988)

A figura 19 apresenta a modificação no perfil de ventos quando sujeito a dois tipos de terreno com diferentes rugosidades. Nota-se que a velocidade na cidade é aproximadamente a metade da medida em campo aberto, demonstrando a importância dos efeitos da rugosidade para a PVN. Contudo, deve-se observar que estes perfis não refletem a realidade em alturas iguais ou inferiores às dos edifícios.

A definição de z_0 traz implícita uma importante questão: a correta definição do nível do "solo".

Figura 18 . Rugosidade Aerodinâmica de alguns tipos de terreno. (TROEN e PETERSEN, 1989)

Figura 19 . Modificações no perfil de velocidade do vento para diferentes tipos de terreno.

Na figura 20 vê-se um perfil de vento em uma área com densa ocupação, na qual o "solo" parece estar deslocado para o topo do dossel. Esta situação ocorre comumente na cidade, devido à grande densidade dos elementos de rugosidade. O deslocamento da base do perfil de ventos (z_d ou d , dependendo do autor) obtido com base na rugosidade aerodinâmica não implica na inexistência de ventos no nível das árvores, edifícios ou do pedestre, mas indica que a área na qual o perfil não se aplica é mais ampla do que a relatada anteriormente.

Figura 20 . Inadequação do conceito de rugosidade para a região de interesse à PVN

Quando a atmosfera apresenta condições neutras, é possível determinar z_0 e z_d se um conjunto de medidas de velocidade em diversas alturas for disponível: plotam-se estas medidas em um gráfico com o eixo das ordenadas semi-logarítmico e busca-se o valor de z_d que faz com que a linha seja reta (no gráfico a seguir chamado apenas d). O gráfico fornece também o valor de z_0 , como mostra a figura 21.

Figura 21 . Velocidade do vento em função da altura (z), rugosidade (z_0) e deslocamento da superfície (z_d) (STULL, 1988)

A expressão a seguir (STULL, 1988) pode ser utilizada para determinar z_d (na fórmula chamado apenas d) e deve ser resolvido iterativamente com base nas velocidades ($\bar{M}$) medidas em três alturas diferentes (z):

$$\frac{\bar{M}_2 - \bar{M}_1}{\bar{M}_3 - \bar{M}_1} \cdot \ln\left(\frac{z_3 - d}{z_1 - d}\right) = \ln\left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d}\right)$$

6.1.6 Velocidade de atrito – u^*

Um importante termo na caracterização do perfil de velocidade do vento é a chamada velocidade de atrito (u^*).

Tome-se um cubo imaginário de pequenas dimensões na atmosfera. Em um escoamento turbulento, como em geral é o caso do vento na atmosfera, diferentes turbilhões interagem com cada uma das faces deste cubo. O efeito destes turbilhões se faz sentir em cada uma das faces de uma forma diferente, como se uma tensão estivesse atuando e deformando o cubo.

Na figura 22 é apresentado o efeito provocado por uma rajada de ar u' ("air" na figura) e um turbilhão vertical w' ("eddy") na face superior de um cubo de ar. Devido ao efeito combinado de u' e w' na área da face superior do cubo, este se deforma. Este efeito é equivalente ao de uma tensão (força/área) e é denominado Tensão de Reynolds (τ_{Reynolds}), no caso igual a:

$$\tau_{\text{REYNOLDS}(xz)} = -\rho \cdot \overline{u' \cdot w'}, \text{ onde } \rho \text{ é a massa específica do ar.}$$

Figura 22 . Exemplo da tensão de Reynolds. (STULL, 1988)

Considerando que $u'w' = w'u'$, a combinação das componentes da turbulência cria as seis componentes da tensão de Reynolds:

$$-\rho \cdot \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix}$$

A tensão de Reynolds na superfície da atmosfera é da ordem de $0,05 \text{ m}^2/\text{s}^2$, algo como a força provocada pelo peso de uma massa de 5g.

A magnitude da tensão de Reynolds junto ao solo indica algumas características do perfil de velocidades. Baseado nesta premissa é definida uma escala de velocidade, chamada velocidade de atrito (u^*):

$$(u^*)^2 = \left(\frac{(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2}{\rho} \right)^{1/2}$$

No caso particular em que o vento está alinhado com o eixo x pode-se resumir a:

$$u^* = \left(\frac{\overline{u'w'}}{\rho} \right)^{1/2}$$

Valores típicos de u^* são da ordem de 0,005 a 0,3 m/s (STULL, 1988).

O valor de u^* em um escoamento pode ser medido como o auxílio de um anemômetro ultrassônico, ou inferido de forma similar aos parâmetros z_0 e z_d .

Em condições de atmosfera neutra, a relação a seguir é válida:

$$\bar{U} = \left(\frac{u^*}{\kappa} \right) \ln \left[\frac{(z - z_d)}{z_0} \right]$$

Onde κ é a constante adimensional de Von Karman (igual a 0,4), e U é a velocidade média do vento na altura z .

Dado um conjunto de medidas de U em diferentes alturas, os valores de u^* , z_0 e z_d podem ser determinados por regressão não linear, como os métodos de Gauss-Newton ou o Método de Marquardt. (STULL, 1988) Se o valor de z_0 e z_d são conhecidos, é possível calcular u^* apenas com a medida de velocidade a 10 metros acima do solo.

6.1.7 Camada limite planetária - CLP

Todo escoamento é alterado pela presença de um elemento sólido. Na figura 23 são representadas as alterações provocadas no escoamento pela presença de uma placa e de um cilindro.

Figura 23 . Influência de elementos sólidos no escoamento (MUNSON et. al., 1997)

Em escoamentos subsônicos estas alterações afetam em tese todo o escoamento. Contudo, este efeito se torna reduzido à medida que nos afastamos do corpo, até que a velocidade no ponto é praticamente igual à velocidade no escoamento não perturbado. Denomina-se camada limite a área próxima do corpo sólido onde a velocidade do escoamento é menor ou igual a 99% da velocidade no escoamento não perturbado. (MUNSON et. al., 1997)

No caso dos ventos, a presença da superfície terrestre se faz sentir por uma altura que varia entre 100 e 1000 m, e acima desta área o escoamento não apresenta gradientes de velocidade com o aumento da altura. A camada limite causada pela superfície terrestre é chamada Camada Limite Planetária (CLP) e o vento acima da CLP é chamado de geostrófico. A relação de altura entre a CLP

e a troposfera é ilustrada na figura 24.

Figura 24 . Camada limite planetária (STULL, 1988)

A espessura da CLP, os perfis de velocidade média do vento, de turbulência, de temperatura e de umidade são os parâmetros necessários para a PVN. Estas características dependem basicamente da condição de estabilidade da CLP.

Estabilidade é um indicativo da natureza e quantidade da turbulência, e permite classificar a CLP em convectiva, estável e neutra.

A CLP convectiva é encontrada durante o dia, em especial quando há sol intenso. A energia do sol aquece a superfície terrestre e é transmitida por convecção à atmosfera, tornando a CLP bastante turbulenta. A turbulência de origem térmica faz com que a altura da CLP atinja até 1000 m.

Na figura 25 são apresentados os perfis típicos de temperatura, velocidade do vento, umidade e poluentes na CLP convectiva. Nota-se que a CLP é dividida em três partes: CLS - Camada Limite Superficial, CM - Camada de Mistura e CE - Zona de Entranhamento.

Figura 25 . Perfis da CLP Convectiva (STULL, 1988)

Na CLS, que em geral representa 10% da altura da CLP, os gradientes são intensos, pois o ar próximo ao solo está mais quente, mais úmido e mais poluído que o restante da CLP. A CM se caracteriza pela ausência de gradientes, pois a camada é homogeneizada pela turbulência. A CE promove a transição entre a CM e a atmosfera livre.

A CLP estável é encontrada durante a noite, e é caracterizada pela dissipação da turbulência criada durante o dia e por pouca ou nenhuma turbulência.

Durante a noite o solo esfria rapidamente, resfriando a camada de ar próxima a ele. Uma vez que os níveis de turbulência são baixos, e que o ar frio não tende a subir para as camadas mais altas da CLP, o ar frio permanece junto ao solo e o restante da CLP é estratificado termicamente, como vê-se no perfil a seguir - fenômeno conhecido como inversão térmica.

Figura 26 . Perfis da CLP Estável (STULL, 1988)

A CLP estável tem altura reduzida, entre 100 e 500m, e pode ser dividida em uma camada limite superficial, camada de mistura residual e zona de entranhamento.

Por fim, a CLP neutra é aquela na qual as produções térmica e mecânica de turbulência são equivalentes e ocorre, por exemplo, em dias nublados. Diversas fórmulas e modelos comumente adotados na PVN partem do princípio que a CLP é neutra, como por exemplo: o perfil logarítmico de velocidade, as fórmulas para correção de rugosidade do solo encontradas e os modelos de correção topográfica do software Wasp.

Na figura 27 é apresentada a evolução da CLP durante um dia.

Figura 27 . Evolução da CLP durante um dia (STULL, 1988)

6.1.8 Fluxos na CLP

Na CLP ocorrem transportes verticais de calor, umidade e energia cinética. Estes fluxos são importantes na definição dos perfis verticais do vento médio, que por sua vez são essenciais para a PVN.

Figura 28 . Esquema dos fluxos de calor. (STULL, 1988)

Na figura 28 é apresentado o perfil de temperatura típico da CLP convectiva, no qual está representado um turbilhão que promove o movimento de ar, levando uma parcela de ar para baixo (1) e a outra cima (2). No diagrama (a) da figura 28 é apresentado o perfil vertical de temperatura. A porção de ar próxima ao solo (2) está mais fria que o ar na parte superior, e ao subir ela esfria as camadas mais altas. Uma outra porção de ar, proveniente da camada mais alta e mais quente (1), vem para a região mais baixa e mais fria, aquecendo esta área. A combinação destes efeitos provoca um fluxo de calor da superfície para as camadas mais altas da CLP, provocado pela turbulência, a despeito do vento médio ser nulo no sentido vertical.

O diagrama (b) da figura 28 apresenta o perfil vertical de velocidade média do vento. Vê-se que a partícula proveniente da zona próxima ao solo (2), onde a velocidade média do vento é menor, ao chegar na parte superior, onde a velocidade média do vento é maior, rouba energia cinética do escoamento para fazer com que sua velocidade se iguale ao restante do ar, reduzindo a velocidade média total naquela zona. Em contrapartida, a porção fluida (1) que se desloca da parte superior para a zona próxima à superfície traz energia cinética e transfere esta energia para o restante do escoamento naquela zona. Assim, a turbulência cria um fluxo de energia cinética na direção da superfície.

6.1.9 Análise dimensional e teorias de similaridade para a CLP

A análise dimensional é uma técnica de grande importância na descrição e compreensão de fenômenos físicos em diversas áreas da ciência, tendo sido fundamental no desenvolvimento da

mecânica dos fluidos.

O teorema Pi de Buckingham estabelece que:

“Uma equação dimensionalmente homogênea que envolve k variáveis pode ser reduzida a uma relação entre k-r produtos adimensionais independentes onde r é o número de dimensões de referência necessário para esclarecer as variáveis.” (MUNSON et. al., 1997)

O enunciado anterior é um tanto quanto sintético para descrever a riqueza de tal teorema, e fontes como MUNSON et. al. (1997) e ETHERIDGE e SANDBERG (1996) trazem discussões mais detalhadas e exemplos da aplicação do teorema. No capítulo 8 desta dissertação, o Teorema Pi de Buckingham é aplicado aos estudos em túnel de vento, sendo feita uma discussão mais detalhada sobre o assunto.

Com relação a CLP, a aplicação da análise dimensional permite obter fórmulas para descrever os perfis de velocidade e temperatura para as diversas condições de estabilidade. (STULL, 1988)

Estas fórmulas têm aplicação restrita, pois partem de premissas bastante restritivas (superfície plana e horizontalmente homogênea) e contém parâmetros determinados experimentalmente, cujos valores variam nos diversos estudos. Contudo, a utilização de tais perfis é bastante comum, em particular o perfil de velocidade média do vento relativo a CLP neutra.

Esta seção tem por objetivo apresentar os perfis de outras condições de estabilidade da CLP, e de outras variáveis como a temperatura e a turbulência. A utilização de tais perfis não é viável dentro do escopo desta pesquisa, pois a determinação da condição de estabilidade deve ser feita experimentalmente ou por meio de um balanço de energia na superfície, assim como a altura da camada limite. Trabalhos futuros podem se utilizar destas equações para produzir arquivos climáticos (TRY ou TMY) que forneçam os perfis e a condição de estabilidade para cada uma das 8760 horas.

A dedução das fórmulas apresentadas foi feita com base nas relações apresentadas em STULL (1988), e nas notas de aula da disciplina AGM 5804 do IAG-USP, e algumas das integrações foram feitas com o software MathCAD.

As unidades de todas as variáveis seguem o SI.

Nas equações a seguir, é utilizado o conceito de temperatura potencial (θ), definida por:

$$\theta = T \cdot \left(\frac{P_0}{P} \right)^{0,286}$$

Onde T é a temperatura de bulbo seco, P é a pressão atmosférica e P_0 é a pressão de referência, em geral de 100kPa.

São apresentadas apenas as relações para a camada limite superficial, área de interesse da PVN. Caso necessárias, as relações para algumas das demais camadas da CLP podem ser encontradas em STULL (1988).

CLP Neutra

- Perfil de velocidade média em função da altura acima do solo

$$\bar{U} = \left(\frac{u^*}{\kappa} \right) \ln \left[\frac{z}{z_0} \right]$$

- Perfil de temperatura média em função da altura acima do solo

$$\bar{\theta} = -0,74 \cdot \left(\frac{\theta^*}{\kappa} \right) \ln \left[\frac{z}{10} \right] + \theta(10)$$

Onde:

θ^* é a escala de temperatura da camada superficial

$$\theta^* = \frac{\overline{w' \cdot \theta'}}{u^*}$$

θ' é a variação da temperatura potencial em torno da média

$\theta(10)$ é a temperatura potencial a 10m do chão

A determinação de θ^* deve ser feita experimentalmente.

- Perfil de turbulência em função da altura acima do solo

$$u' = \sqrt{6 \cdot (u^*)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right] + 2 \cdot \left(\frac{z}{h} \right)}$$

$$w' = \sqrt{(u^*)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{h} \right)^{0,5} \right]}$$

Onde h é a altura da CLP, a ser determinada.

CLP Estável

- Perfil de velocidade média em função da altura acima do solo

$$\bar{U} = \left(\frac{u^*}{\kappa} \right) \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] + u^* \frac{4,7}{\kappa} \cdot \frac{(z - z_0)}{L}$$

- Perfil de temperatura média em função da altura acima do solo

$$\bar{\theta} = -0,74 \cdot \left(\frac{\theta^*}{\kappa} \right) \ln \left[\frac{z}{10} \right] + u^* \frac{4,7}{\kappa} \cdot \frac{(z - z_0)}{L} + \theta(10)$$

Onde L é o chamado comprimento de Monin-Obukhov, definido por:

$$L = - \frac{u^*}{\kappa \cdot \frac{g}{\theta_0} \cdot \overline{w' \cdot \theta'}}$$

Sendo g a aceleração da gravidade, e Θ_0 a temperatura potencial no estado de referência, que se pode considerar igual a média do local, e Θ' é a variação da temperatura potencial medida na mesma frequência que w' , o que torna este parâmetro de mensuração bastante complexa.

O comprimento de Monin-Obukhov, associado à altura da camada limite (h) define o parâmetro de estabilidade ζ . O valor do parâmetro de estabilidade indica a condição da CLP, de acordo com os valores a seguir relacionados:

$$\zeta = \frac{h}{L} \begin{cases} < -1 & \text{instável} \\ -1 < \zeta < +1 & \text{neutra} \\ > +1 & \text{estável} \end{cases}$$

Perfil de turbulência em função da altura acima do solo

$$u' = \sqrt{6 \cdot (u^*)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{h} \right)^{1/2} \right]}$$

$$w' = \sqrt{2,5 \cdot (u^*)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{h} \right)^{0,6} \right]}$$

Onde h é a altura da camada limite.

CLP Convectiva

- Perfil de velocidade média em função da altura acima do solo

$$\bar{U} = \frac{u^*}{\kappa} \cdot \left(\ln \left[\frac{(-1 + \eta)}{(1 + \eta)} \cdot \frac{(1 + \eta_0)}{(-1 + \eta_0)} \right] + 2 \operatorname{atg}(\eta - \eta_0) \right)$$

Onde:

$$\eta = \left(1 - 15 \cdot \frac{z}{L} \right)^{1/4}$$

$$\eta_0 = \left(1 - 15 \cdot \frac{z_0}{L} \right)^{1/4}$$

- Perfil de temperatura média em função da altura acima do solo

$$\bar{\theta} = 1,48 \cdot \left(\frac{\theta^*}{\kappa} \right) \cdot \left\{ \operatorname{atanh} \left[\left(1 - 9 \frac{z_0}{L} \right)^{1/2} \right] - \operatorname{atanh} \left[\left(1 - 9 \frac{z}{L} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

As relações anteriormente expostas permitem, com base em um pequeno número de observações e no balanço de energia na superfície, estabelecer condições de contorno aproximadas para experimentos em túnel de vento ou CFD.

6.1.10 Correlação entre vento e outras variáveis

Para a PVN seria de extrema valia estabelecer correlações entre a intensidade do vento e outras variáveis climáticas, tais como direção do vento, radiação solar nos planos horizontal e normal, temperatura do ar, nebulosidade.

De forma a explorar esta possibilidade foram calculadas as correlações para a cidade de São Paulo usando as variáveis acima listadas.

Foram utilizados os dados do TRY de São Paulo elaborado pelo LABEEE-UFSC – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina, e calculadas as correlações para os dados de todo o ano, e apenas para o mês de janeiro.

Como apresentado na figura 29, estas correlações são muito fracas (abaixo de 0,3), impedindo que se calcule a intensidade do vento com base em apenas uma destas variáveis isoladamente.

Figura 29 . Correlação entre vento e outras variáveis climáticas, para São Paulo.

Outra correlação estudada diz respeito a sazonalidade do vento.

Na figura 30 são apresentadas as frequências de ocorrência do vento para 8 direções em cada uma das estações do ano, para as cidades de São Paulo e Natal. Os gráficos foram gerados pelo software SOL-AR, produzido pelo LABEEE-UFSC.

Nota-se no caso de Natal que existe uma forte relação entre as estações do ano e a direção do vento, no entanto, no caso de São Paulo os dados apresentam uma dispersão maior.

Conclui-se que os conceitos de predominância na direção têm significado muito diferente para cada cidade, e assim sendo, dados deste tipo devem ser usados com cautela para a PVN.

Figura 30 – Frequência de ocorrência do vento em São Paulo e Natal, respectivamente.

6.1.11 Totalização dos dados de ventos

A velocidade do vento é medida em intervalos da ordem do segundo, mas a PVN não é feita para dados instantâneos, e sim para um vento médio ou de frequência de ocorrência significativa, pois desta forma os cálculos são simplificados e porque interessa determinar o efeito da ventilação ao longo das horas, dos dias e do ano, e não para frações de segundo. Assim, totalizar os dados instantâneos de vento para um certo período permite sua utilização na PVN.

De forma a exemplificar os dilemas encontrados quando da totalização dos dados de vento, foram realizadas algumas análises utilizando dados coletados e cedidos por PRATA (2005).

Foram coletados dados de vento durante os dias 12, 13 e 14 de abril de 2005, na orla de Santos, a 10m de altura. Foi utilizado um anemômetro de copo, fabricado pela Oregon Scientific, que transmite os dados por rádio a um computador portátil próximo do mastro de medição. Dados coletados simultaneamente em uma estação meteorológica local também são analisados.

Em ambos os casos, as medições realizadas a cada segundo, são totalizadas e armazenadas a cada minuto.

A PVN é feita tradicionalmente para intervalos de uma hora, e assim sendo deve-se calcular o dado de vento (intensidade e direção) que represente o conjunto das sessenta leituras realizadas em cada um dos minutos.

A forma intuitiva de realizar esta operação é utilizar a média aritmética das leituras de intensidades do vento, determinando assim a intensidade média, e adotar a direção de maior ocorrência. Quando o vento mantém direção e intensidade constantes ao longo do intervalo a ser totalizado, este procedimento é adequado. No entanto, em cenários mais complexos, como o

encontrado na hora 11 do dia 14, este procedimento não é representativo dos dados obtidos.

Figura 31 . Frequência de ocorrência e intensidade média das 60 leituras de vento de uma hora, agrupadas de acordo com a direção do vento, em setores de 30°.

Pelos gráficos da figura 31, que mostram os dados de frequência e intensidade coletados na hora 11 do dia 14, pode-se notar que a direção do vento varia entre 90° e 210°, sendo a maior frequência de ocorrência a dos ventos Sul (180°), que poderia ser adotada como a direção do vento para esta hora. Contudo, no gráfico de velocidade, tem-se que os ventos vindos de Sudeste (120°), apesar de menos frequentes são mais intensos que os do Sul. Apresenta-se assim o dilema de optar por ventos mais intensos e menos frequentes, ou pelos mais fracos, porém mais comumente encontrados.

A solução ideal seria realizar estudos de ventilação para cada uma das direções, ao invés de tentarmos agrupar dados que não representam o mesmo fenômeno. Como isto tornaria o trabalho ainda mais complexo, pode-se adotar algumas precauções para minimizar resultados errôneos e para apontar qual a constância do vento que será utilizado na PVN.

6.1.11.1 Soma vetorial

Uma ferramenta útil na determinação da consistência de um dado de vento totalizado é a soma vetorial. Quando a média aritmética é utilizada, a intensidade do vento é somada independente da direção, o que pode levar a crença de que realmente existe um único vento com aquela intensidade. Quando se soma vetorialmente os dados de vento, e calcula-se a média vetorial dividindo esta soma pelo número de leituras, os ventos de direção oposta se anulam, produzindo um resultado de menor intensidade que o da média aritmética.

A figura 32 exemplifica tal situação. Nela, os pontos das 60 leituras da hora 11 do dia 14 foram plotados indicando sua direção e intensidade. A linha pontilhada apresenta a média aritmética da velocidade e 1° frequência de ocorrência. A linha contínua apresenta o resultado da soma vetorial. Como previsto, a intensidade obtida pela soma vetorial (2,0m/s) é 20% menor que a média aritmética

(2,4m/s). A média vetorial sempre apresenta uma intensidade menor que a média aritmética, quando o vento sopra em diversas direções durante a mesma hora, garantindo que o resultado de uma futura ventilação seja, no mínimo, o previsto. Ao adotar a média vetorial em detrimento da aritmética, opta-se por reduzir a intensidade de dados totalizados cujas direções apresentam grandes variações no decorrer da hora. Desta forma, a PVN fornecerá uma previsão pessimista, baseada em um dado cuja intensidade é inferior a realmente medida.

Outra vantagem da média vetorial é que esta também apresenta a direção em seu resultado.

A direção dos ventos calculada pela média vetorial considera não só a direção como também a intensidade dos ventos, ou seja, ventos mais intensos têm mais importância que os mais fracos na definição da direção do dado totalizado. No caso dos dados da hora 11 do dia 14, os ventos ESE (120°) são menos frequentes (20%), porém mais intensos (3,5m/s). Assim, o vetor está deslocado do Sul (que é a 1ª frequência de ocorrência) na direção Leste onde estão os ventos mais intensos.

Figura 32 . Dados da Figura 31 e totalizações.

Dadas as vantagens do método, todas as totalizações, somas e médias de ventos neste trabalho serão feitas vetorialmente, salvo quando indicado o contrário.

A comparação da intensidade obtida pelas médias aritmética e vetorial indica se a direção do vento mudou significativamente durante a hora. Quanto mais próximos os valores, mais constante é o vento. Quando a média vetorial é muito menor que a aritmética, podendo chegar a zero, mesmo com ventos intensos, a direção do vento oscilou muito durante a hora.

Uma outra forma de analisar as diferenças entre os diversos dados de vento usados para compor o dado horário é o desvio padrão das três componentes do vetor velocidade. De posse destes valores é possível calcular o desvio padrão do vetor resultante U . No caso da hora 11 do dia 14, o desvio padrão é de 0,8m/s, representando o amplo espectro de velocidades encontradas durante as medições desta hora (entre 1,2 e 4,5 m/s).

É essencial que se compreenda que o vento tem um comportamento instável que se refletirá na ventilação natural, e que a totalização é uma simplificação necessária para os estudos de ventilação natural. A forma como esta simplificação é feita, no entanto, permitirá garantir a qualidade das previsões realizadas.

6.1.11.2 Intervalo de tempo para totalização

A escolha do intervalo de tempo a ser utilizado para a totalização é uma escolha arbitrária. A escolha de um intervalo implica na constância do vento durante o mesmo, de forma que o valor totalizado represente bem o intervalo.

Neste trabalho será mantida a totalização a cada hora, por ser a mais comumente encontrada nos dados meteorológicos e nos softwares de análise do desempenho térmico do edifício. Porém o intervalo de uma hora pode conter realidades bastante distintas, conforme exemplificado anteriormente.

O caso da hora 10 do dia 12 é um exemplo peculiar, pois durante esta hora registrou-se durante 28 minutos contínuos um vento com 2,6 m/s direção SSE (150)°, e nos outros 32 minutos não houve vento (0 m/s).

Quando da totalização destas leituras, não há dúvida quanto à direção dos ventos (SSE), contudo a definição da intensidade não representa o conjunto de dados medidos durante a hora. Neste caso tanto a média aritmética quanto a vetorial apresentarão a mesma deficiência, pois o problema reside no intervalo escolhido para a totalização. O resultado aponta uma intensidade de aproximadamente 1,3 m/s.

A solução neste caso seria a redução do intervalo de totalização, porém a maior parte das ferramentas utilizadas na PVN não permite o uso de intervalos inferiores ao de uma hora.

6.2 O papel do dado de vento na PVN

A vazão de ar devida a ventilação natural é alterada de maneira linear pela intensidade do vento, fazendo com que esta intensidade seja um parâmetro de vital importância na qualidade da PVN, uma vez que pequenos desvios absolutos provocam grandes erros em situações de ventos fracos.

Um vento de 0,5m/s produz em um edifício desobstruído ($\Delta C_p=1$) a mesma vazão que duas aberturas distantes 4m de altura na presença de uma diferença de temperatura interior-exterior (ΔT) de 4 °C, o que indica que ventos desta magnitude não devem ser desprezados. (BSI, 1991)

A importância da direção do vento na PVN é de difícil quantificação, mas variações da ordem de 5° podem provocar desvios na vazão calculada entre 5% e 40% pela alteração dos coeficientes de pressão. Assim como ocorre com a intensidade, os maiores erros causados por problemas com a direção do vento ocorrem quando os ventos são fracos.

6.3 Medidas de vento

Esta seção se destina a orientar a medição de dados de ventos pertinentes a PVN, que estão abaixo elencados:

- Direção
- Perfil vertical de velocidade média
- Perfil de turbulência nas 3 direções
- Perfil vertical de temperatura
- % calmaria na hora

A teoria meteorológica auxilia o pesquisador na tarefa de compreender a real relação entre a leitura e o fenômeno físico medido.

O Guia para Expressão da Incerteza de Medição editado pelo INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – fornece as diretrizes para o cálculo da incerteza em qualquer tipo de medida efetuada.

Defini-se incerteza como o “parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente associados ao mensurado”. Está definição parte da constatação de que é virtualmente impossível conhecer o valor verdadeiro de uma grandeza. Pode-se, sim, estabelecer um intervalo dentro do qual existe uma grande probabilidade de que o valor verdadeiro se situe.

Analisando como exemplo um anemômetro cujo certificado de calibração indica uma incerteza de 0,3m/s para um intervalo de confiança de 95%, pode-se dizer que, quando este equipamento faz uma leitura de 1m/s, a velocidade real tem uma probabilidade de 95% de estar entre 0,7 e 1,3m/s. Deve-se notar que existe uma probabilidade de 5% de o valor real estar fora deste intervalo.

Não é correto chamar este intervalo de erro, pois o valor real medido pode ser de 1m/s, e neste caso a leitura estaria correta. Pode-se dizer que há uma incerteza na relação entre o valor real e a leitura efetuada.

Denomina-se incerteza padronizada àquela que apresenta como medida de dispersão o desvio padrão, permitindo ao usuário definir o intervalo de segurança que lhe convém.

A incerteza pode ser classificada em dois tipos: A e B.

A incerteza do tipo A é aquela avaliada pela análise estatística de uma série de medidas, associada à incerteza de leitura do próprio instrumento.

A incerteza do tipo B engloba as demais fontes de incerteza, como por exemplo, as originadas no processo de aquisição e armazenamento dos dados.

Quanto menor a incerteza de uma medição, melhor é o dado medido, e sem o conhecimento da incerteza associada a uma medida é impossível determinar a qualidade da mesma.

6.3.1 Equipamentos

Existem diversos tipos de anemômetros disponíveis no mercado para o monitoramento do vento. Os anemógrafos são os equipamentos mais sofisticados sem a presença de componentes eletrônicos,

pois registram em uma folha de papel de maneira contínua a direção e velocidade do vento. A figura 33 ilustra um anemógrafo e os registros de dados.

O principal problema no uso de anemógrafos está na interpretação dos dados, o que eleva a incerteza dos mesmos.

Os anemômetros de copo são comumente encontrados em estações meteorológicas. São equipamentos de baixo custo e cuja aquisição e armazenamento de dados envolvem uma eletrônica bastante simples, pois apenas o número de voltas do anemômetro deve ser contado. Uma estação meteorológica portátil, com transmissão wireless da marca Oregon Scientific custa aproximadamente U\$ 400.

Figura 33 . Anemógrafo

Na figura 34 é ilustrado um anemômetro de copo de fabricação Campbell Scientific. A direção do vento é marcada pela orientação da pá.

Este anemômetro possui incerteza de $\pm 0,5$ m/s para um intervalo de 99%, e tem um limite mínimo de leitura de 0,5 m/s, o que sacrifica a qualidade da PVN em áreas com velocidades do vento baixas.

Figura 34 . Anemômetro de copo

Os anemômetros ultra-sônicos, como o ilustrado na figura 35, apresentam as leituras de menor

incerteza, porém seu custo é elevado. Equipamentos da marca Campbell com leituras em duas e três dimensões custam respectivamente U\$2.000 e U\$5.000, não inclusos os custos de cabos e dataloggers. As leituras têm incertezas da ordem de 0,01m/s.

Nestes equipamentos um sinal de ultra-som é emitido por uma das hastes e captado pela haste oposta. Conhecendo-se a velocidade do som no ar, é possível detectar atrasos ou antecipações no recebimento do sinal, provocados pelo vento contra ou a favor do sentido de propagação da onda sonora. Nos anemômetros tridimensionais, três conjuntos emissor-receptor são dispostos de tal forma a fornecer os valores de u, v, w .

Figura 35 . Anemômetro ultra-sônico

Apenas pelo uso de anemômetros ultra-sônicos é possível detectar as escalas de maior frequência da turbulência, assim como os fluxos turbulentos junto da superfície.

Os mastros das estações meteorológicas posicionam os anemômetros a uma altura de dez metros acima do solo, contudo existem torres em operação dotadas de anemômetros em diversas alturas. Os dados destas torres são usados para estabelecer os perfis de velocidade, turbulência e temperatura.

Outra forma de obter perfis de temperatura e velocidade média do vento é por meio do lançamento de balões meteorológicos - as radiosondas. Estes balões, dotados de sensores de posição, temperatura, umidade e pressão - transmitem os dados via rádio para uma estação no solo. STULL (1988) chama a atenção para a falta de representatividade dos dados obtidos com rádio sondagem, pois se trata de uma leitura pontual, a qual pode não representar médias temporais do local em análise.

6.3.2 Posicionamento dos sensores

A principal dificuldade no posicionamento de anemômetros é encontrar áreas livres de obstáculos. PEREIRA apud TROEN e PETERSEN (1989) fornece resultados de estudos de vento que indicam que obstáculos influenciam, de maneira significativa, áreas localizadas a uma distância de até 20 vezes a altura do obstáculo a sotavento, conforme figura 36.

Figura 36 . Redução na velocidade do vento devida a presença de obstáculo TROEN e PETERSEN (1989)

Assim, a presença de construções térreas e barreiras baixas de árvores pode interferir na intensidade do vento a até 60 m de distância desses obstáculos.

A colocação de anemômetros no topo de edifícios também fornece leituras distorcidas pela presença do mesmo.

6.3.3 Check list para a caracterização de dados de vento

Com o intuito de associar os dados medidos às condições nas quais eles foram coletados é proposta nesta pesquisa a Ficha de Coleta de Dados para caracterizar a estação meteorológica utilizada.

A ficha foi baseada em TROEN e PETERSEN (1989), informações do site do CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, e do Guia para Expressão da Incerteza de Medição (INMETRO, 1998).

Ficha de Coleta de Dados

1. Dados da estação:
 - a. Fornecedor do dado
 - b. Nome da estação meteorológica
 - c. Órgão administrador da estação
 - d. Latitude
 - e. Longitude
 - f. Altitude
 - g. Fotos da estação e do entorno (datadas)
 - h. Mapa de rugosidade do entorno (datado)
 - i. Mapa de obstruções do entorno (datado)
 - j. Data de entrada em funcionamento
 - k. Status atual de funcionamento
 - l. Períodos com dados disponíveis
 - m. Mudanças no entorno da estação desde sua entrada em funcionamento
2. Equipamentos:
 - a. Tipo
 - b. Princípio de funcionamento
 - c. Marca
 - d. Modelo

- e. Periodicidade de calibração
- f. Incerteza padronizada da medida
- g. Frequência de aquisição do dado
- h. Frequência de armazenamento do dado
- i. Medidas de posição armazenadas
- j. Tempo de resposta do sensor
- k. Sensibilidade do sensor
- l. Unidade do resultado

6.4 Fontes de dados

A seguir são relacionadas algumas fontes de dados de vento e outras variáveis climáticas para cidades brasileiras, devidamente comentadas quanto a sua aplicabilidade.

6.4.1 INMET

O Instituto Nacional de Meteorologia é um órgão federal responsável pela sistematização dos resultados coletados por diversas estações meteorológicas espalhadas pelo país. A grande maioria destas estações não registra a velocidade do vento. O INMET não disponibiliza os dados coletados em seu site, e as publicações de dados de séries históricas, as Normais Climatológicas, está esgotada e não foi revisada ou reeditada.

É possível encontrar os dados das Normais Climatológicas nos softwares CLIMATICUS e METEORONORM, disponíveis respectivamente nos sites: <http://www.usp.br/fau> e <http://www.meteotest.ch>

6.4.2 Ministério da Aeronáutica, Infraero, Departamento de Aviação Civil

Os principais aeroportos do país dispõem de estações meteorológicas e muitos deles realizam radio sondagens diárias. O órgão disponibiliza estes dados a outras fontes, por meio das quais é possível obtê-los.

6.4.3 INPE – CPTEC

O INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, através do CPTEC disponibiliza em seu site diversos tipos de dados de vento. As PCDs – Plataformas de Coletas de Dados, formam uma rede de estações padronizadas com coleta automática de dados totalizados a cada 3 horas, calculado da média de 200 amostras com 3 seg de intervalo. São dotadas de anemômetros ultra-sônicos 2D e transmitem os dados via satélite.

Na figura 37 são mostradas as estações PCD, porém nem todas possuem anemômetro. Os dados podem ser acessado em <http://tempo.cptec.inpe.br:9080/PCD/>

O INPE também disponibiliza perfis de radiosondagens diárias de 25 cidades brasileiras, como apresentados na figura 38, em <http://www.cptec.inpe.br/cgi-bin/radio/radiossonda.cgi>

Figura 37 . Rede PCD e Modelo da estação. Acessado em 10.07.06 em <http://tempo.cptec.inpe.br:9080/PCD/>

Figura 38 . Exemplo de radiosondagem.

6.4.4 United States Department of Energy

O EERE - Energy Efficiency and Renewable Energy, órgão do Departamento de Energia dos EUA responsável pelo desenvolvimento do software Energy Plus disponibiliza séries históricas de dados

climáticos de aeroportos de centenas de cidades no mundo, incluindo diversas cidade brasileiras, em http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm porém os dados não são contínuos, e contém diferentes períodos de medição para cada cidade.

6.4.5 LABEEE-UFSC

O LABEEE-UFSC em parceria com ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento - montou anos típicos de dados climáticos para 14 cidades brasileiras utilizando dados de aeroportos e a metodologia de ASHRAE (1997).

A edição impressa está esgotada, e a publicação foi disponibilizada gratuitamente para download em formato digital formato PDF no site <http://www.labeee.ufsc.br/>. Arquivos com as séries históricas em formato de texto (extensão .csv), que podem ser utilizados diretamente em outros softwares, também foram disponibilizados.

Os dados utilizados para a confecção dos anos típicos apresentavam descontinuidades e, portanto, os anos típicos não constituem uma base de dados ideal para a PVN.

6.4.6 University of Wyoming - Department of Atmospheric Science

São disponibilizados dados numéricos de radiosondagens das cidades de Natal, Belém, Manaus, Cuiabá, Florianópolis, São Paulo e Rio de Janeiro em <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

6.4.7 Outros órgãos

Diversos órgãos no Brasil monitoram o vento, mas não têm seus dados disponibilizados em redes como as descritas anteriormente, e devem ser contatados diretamente, tais como a CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental e o IAG-USP na cidade de São Paulo.

7 Transposição dos dados de vento para o local do projeto

A figura 39 apresenta o perfil de uma típica região urbana, com o aeroporto localizado em uma região periférica e plana, onde boa parte dos dados de vento é coletada de forma sistemática. Nesta figura é possível notar que as condições nas quais o dado de vento foi coletado são bastante diferentes das condições nas quais ele será utilizado para a PNV, em um sítio específico no tecido urbano.

Figura 39 . Efeitos topográficos e de rugosidade nos dados de vento.

Os aeroportos, onde ficam boa parte das estações meteorológicas, são em geral caracterizados por uma rugosidade baixa ($z_0=0,01$), um ambiente plano e rugosidade uniforme.

Quando o vento deixa o aeroporto, ele sofre alterações devidas à topografia e às mudanças na rugosidade da superfície terrestre, que alteram o seu perfil de velocidades e de turbulência, assim como a sua direção. Este capítulo apresenta algumas técnicas para corrigir o dado de vento para um local específico, distante da estação meteorológica.

Uma vez que as rugosidades e elementos de topografia "vistos" pelo vento se modificam em função da direção, as correções aqui apresentadas devem ser feitas separadamente para cada

direção do vento na estação meteorológica.

No caso do uso de anos climáticos para a simulação de desempenho térmico da edificação, todos os 8.760 dados devem sofrer correção individual, com base na direção do vento e na condição de estabilidade da atmosfera.

Para que a correção do vento seja feita, parte-se do princípio que o perfil de vento e de turbulência na estação meteorológica são conhecidos, conforme apresentado no capítulo anterior.

7.2 Correção de rugosidade

A superfície terrestre apresenta diversos tipos de cobertura, e cada uma delas origina uma tensão superficial diferente, que por sua vez modifica o perfil de vento.

Em complemento às tabelas apresentadas no capítulo anterior, a figura 40 mostra alguns tipos de terreno e as rugosidades correspondentes a cada um deles.

Figura 40 . Padrões de rugosidade: 0,002; 0,03; 0,1; 0,4 (TROEN e PETERSEN,1989)

A figura 41 apresenta os perfis de velocidade do vento para CLP Neutra, com um vento de 4m/s a uma altura h de 200m, para diferentes rugosidades. Nota-se que as diferenças entre os perfis junto ao solo são bastante significativas.

Quando a rugosidade do piso é alterada, o perfil de velocidades referente à nova rugosidade toma o lugar do antigo perfil. Esta mudança não é imediata, e as alternativas possíveis para a transição entre os perfis são apresentadas na figura 42. No caso (a), a nova rugosidade apresenta uma resistência ao escoamento e o valor de u^* aumentará. Nesta situação o novo perfil de ventos

irá apresentar velocidades mais baixas que o perfil anterior, próximo ao solo. No caso (b) o processo inverso ocorrerá.

Figura 41 . Perfis de velocidade do vento para CLP Neutra

Figura 42 . Transição entre áreas com diferentes rugosidades (ABNT, 1988)

Como visto na figura 42, à medida que o ponto de transição das rugosidades fica mais distante, a nova camada limite toma o lugar da antiga e é chamada de camada limite interna. A altura (h) da camada limite interna pode ser calculada em função da distância entre o ponto de mudança da rugosidade x, pela fórmula (TROEN e PETERSEN,1989):

$$\frac{h}{z'_0} \left(\ln \frac{h}{z'_0} - 1 \right) = 0,9 \cdot \frac{x}{z'_0}$$

Onde z'_0 é a maior das duas rugosidades. ALLARD (1998) e a NBR-6123 (ABNT, 1988) também propõe fórmulas para o cálculo de h, mas em nenhuma das três fontes faz referência à condição de estabilidade assumida.

A figura 43 ilustra a relação entre h e x. Da sua análise pode-se concluir que a transição completa entre os perfis de diferentes rugosidades somente ocorre após o vento haver percorrido cerca de dez quilômetros a contar do ponto de transição. No entanto, nas alturas que interessam a PVN as trocas

de rugosidade que ocorrem a mais de um quilômetro do ponto de interesse não se farão sentir.

Figura 43 . Altura da camada limite interna em função da distância (TROEN e PETERSEN,1989)

Assim, defini-se que, em direções nas quais a rugosidade seja homogênea por mais de um quilômetro, pode-se assumir o perfil de camada limite relativo à rugosidade do local. Nos casos em que a mudança de rugosidade se localiza a menos de um quilômetro, a correção de rugosidade nesta direção deverá considerar diferentes influências nas partes inferior e superior do perfil.

Esta situação é ilustrada na figura 44 , na qual sucessivas mudanças de rugosidade se dão em poucos quilômetros de distância.

Figura 44 . Mudanças de rugosidade sucessivas (TROEN e PETERSEN,1989)

7.2.1 Fórmulas para correção de rugosidade

Em casos de mudança de rugosidade, a incógnita na definição do novo perfil é o valor de u^*2 , a velocidade de atrito do novo perfil em relação ao perfil relativo à rugosidade anterior.

TROEN e PETERSEN (1989) sugere que a definição da nova velocidade de atrito u^*2 pode ser feita partindo da premissa que a velocidade em uma dada altura h é igual em ambos os perfis, e com base

nesta igualdade é possível estabelecer a seguinte relação para a CLP neutra:

$$\frac{u^*_{2}}{u^*_{1}} = \frac{\ln(h/z_{01})}{\ln(h/z_{02})}$$

Adotando-se o mesmo raciocínio, e com base nos perfis de vento apresentados no capítulo anterior, as relações para as condições convectiva e estável podem ser obtidas. Um dos problemas neste raciocínio é a correta definição de h, pois quanto maior o valor utilizado menor será a intensidade do vento.

Estabelecida nova velocidade de atrito, a correção de rugosidade está finalizada.

Uma solução mais adequada para a correção de rugosidade pode ser obtida por meio da premissa que o vento geostrófico é igual em ambas as áreas. (TROEN e PETERSEN, 1989) Contudo, a adoção desta premissa exige que não somente a camada limite superficial, mas toda a CLP seja modelada, o que envolve complicações adicionais.

Cabe aqui salientar que a correção de rugosidade por meio de uma função exponencial, comumente empregada (ALLARD, 1998) (AWBI, 1998) (BSI, 2000) (EDSL,s.d) leva a resultados bastante diferentes do método aqui apresentado.

BRUTSAERT apud STANGROOM (2004) afirma que não há justificativa teórica para o uso de perfil exponencial, reforçando a opção pelo uso do perfil logarítmico, a despeito de ambos os tipos de perfil levarem a resultados semelhantes em determinadas situações. A comparação da figura 45 com os perfis logarítmicos apresentados na figura 41 salienta estas diferenças.

Figura 45 . Perfis exponenciais de velocidade para diferentes terrenos

7.3 Topografia

A topografia modifica o vento em uma dada região e estas mudanças se fazem sentir de maneira mais intensa junto ao solo, onde estão localizados os edifícios e onde se dá a PVN.

A despeito da bem documentada influência da topografia no vento, não foi localizado nenhum

exemplo de aplicação de correção topográfica para dados de vento a serem utilizados em estudos de ventilação.

Uma possível explicação para tal fato reside na diferença de escala entre o edifício e os elementos da topografia a serem considerados, da ordem de dezenas de quilômetros.

A figura 46 exemplifica o efeito da presença de um morro no perfil de vento. Devido à redução da seção disponível para a passagem do vento, este sofre uma aceleração no cume do morro. Esta aceleração é mais intensa junto ao solo e diminui com a altura. Esquema como este e modelos de correção da magnitude do vento baseados neste raciocínio são comuns na bibliografia. (ALLARD, 1998) (ABNT, 1988) Contudo, a complexidade da topografia raramente permite o uso destes modelos de morros uniformes e isolados.

Figura 46 . Modificação do perfil de vento pela topografia (STANGROOM, 2004)

A figura 47 apresenta os escoamentos obtidos em túnel de vento com modelos de morro bi e tridimensionais. (ISHIHARA apud STANGROOM, 2004) A face do morro a sotavento apresenta resultados totalmente distintos demonstrando a incapacidade de modelos bidimensionais na predição de escoamento ao redor de modelos simples.

Figura 47 . Modelo de morro testado (STANGROOM, 2004) e fluxo ao redor de um morro 3D e 2D (ISHIHARA apud STANGROOM, 2004)

A figura 48 apresenta alguns resultados de simulações computacionais para a mesma geometria de morro retratada na figura 47. Nela, as linhas escuras indicam a trajetória do vento, o qual sofre mudanças na direção de forma a contornar o morro. Caso o edifício objeto da PVN esteja em uma

destas áreas, não só a magnitude, mas também a direção do vento deve ser corrigida. Correções na direção do vento não são possíveis em abordagens bidimensionais, como as apresentadas em ALLARD (1998) e ABNT (1988).

Ainda na figura 48 é apresentada a área de recirculação a sotavento, na qual os edifícios estarão sujeitos a alta turbulência. O descolamento do fluxo em relação ao obstáculo depende de diversos fatores, e será tratado em detalhe no capítulo 8.

Figura 48 . Linhas de corrente no escoamento ao redor de um morro (esq) e área de recirculação (direita) (STANGROOM, 2004)

Foram estudadas três ferramentas para executar a correção dos dados de vento para o local de projeto em função da topografia: os softwares WASP e CFX, e o trabalho de KARAM et. al. (2003). Em todos os casos a correção é feita por meio de técnicas de dinâmica dos fluidos computacional – CFD, que serão descritas no capítulo 8 desta dissertação.

A despeito de promissoras, nenhuma das técnicas pode ser prontamente aplicada pelo projetista para uso em PVN, ou seja, a correção topográfica não se mostrou viável e deve no futuro ser objeto de estudo mais aprofundado.

Nas próximas seções serão apresentados exemplos de aplicação, confeccionados por outros pesquisadores, utilizando cada ferramenta.

7.3.1 WASP

O software WASP foi desenvolvido pelo Laboratório RISO, na Dinamarca, para a predição do potencial de energia eólica em diferentes sítios com base em dados de vento de estações meteorológicas distantes. Ele permite a transposição de dados de vento provenientes de uma localidade para terrenos e projetos em áreas próximas (dezenas de quilômetros), efetuando simultaneamente correções de rugosidade, topografia e devido à presença de barreiras próximas à estação meteorológica ou do sítio em análise.

Trabalhos como PRATA (2005) e SILVA (2001) utilizaram esta ferramenta para a análise do vento no meio urbano em função de mudanças de rugosidade, que apresenta as limitações discutidas no capítulo anterior.

Para a PVN seria conveniente a transposição individual de cada dado de vento, mas para efeito de cálculo do potencial de energia eólica os dados podem ser tratados em conjunto. Dentro deste raciocínio o software constrói a rosa dos ventos no sítio de interesse com base em uma rosa dos ventos da estação meteorológica.

Desta forma, o software é de pouca utilidade para a PNV, mas a teoria utilizada é passível de uso para a predição da ventilação natural se for implementada com modificações visando a transposição de dados individuais, como salienta TROEN e PETERSEN (1989).

A teoria do WASP é exposta em TROEN e PETERSEN (1989), que por sua vez remete a HUNT e JACKSON (1975) e WALMSLEY e TAYLOR (1982). Esta documentação é bastante sucinta, e exige conhecimento prévio de mecânica dos fluidos, métodos numéricos e séries para sua implementação, estando fora do escopo desta dissertação. Como se trata de um programa comercial, cuja licença custa aproximadamente U\$4.000,00, os detalhes da implantação do código e as correções realizadas não são apresentados em detalhe.

O programa está baseado no princípio de conservação de massa e na hipótese de que o vento geostrófico é igual, na área da estação meteorológica e no local no qual se deseja prever o potencial de ventos. Os exemplos de validação apresentados são bastante promissores, e por si só justificam que futuros trabalhos adotem a teoria descrita em HUNT e JACKSON (1975) e WALMSLEY e TAYLOR (1982).

A figura 49 apresenta a planta topográfica e localização dos mastros de um experimento na Escócia para o estudo do efeito da topografia no perfil de vento.

Figura 49 . Topografia, direções dos ventos e posição dos mastros, e localização do experimento de Askervein Hill (TROEN e PETERSEN,1989) (STANGROOM, 2004)

Os resultados deste estudo foram utilizados para avaliar as predições realizadas pelo WASP, e também pelo CFX, apresentadas na próxima seção.

A figura 50 apresenta um dos resultados do experimento em comparação ao modelo do WASP. A velocidade do vento é apresentada no eixo vertical, em termos do acréscimo ou decréscimo em

relação ao vento não perturbado com a mesma altura acima do solo. Nota-se que a velocidade no cume do morro é 80% superior ao vento não perturbado, e que a velocidade a sotavento chega a ser 40% inferior.

Com exceção do fato de subestimar a diminuição de velocidades na face a sotavento, o modelo do WASP apresenta grande capacidade de prever os resultados nesta tomada de dados apresentada.

Figura 50 . Velocidade do vento em relação ao escoamento não perturbado (pontos) e previsão pelo modelo do WASP (quadrados) (TROEN e PETERSEN,1989)

Outra validação realizada foi a comparação das velocidades entre várias estações meteorológicas. Na tabela da figura 51, a primeira coluna traz o local da estação, e a segunda mostra a velocidade média em uma dada direção para o conjunto dos dados disponíveis, por exemplo, Dublin-5,2 e Sneefell-11,6.

	Dub	Val	Bla	Sna	Bal	Man	Low	Esk
Dublin	5.2	4.9	5.2	6.2	5.2	4.6	5.3	5.5
Valley	7.4	7.0	7.1	8.8	7.5	6.5	7.4	7.8
Blackpool	6.0	5.6	5.7	7.1	6.0	5.2	6.0	6.3
Snaefell	11.6	11.0	12.0	13.8	11.4	10.5	12.0	12.0
Bala	4.1	3.6	3.9	4.8	4.0	3.4	3.9	4.3
Manchester	5.0	4.9	5.0	6.1	5.2	4.5	5.2	5.5
Lowther Hill	10.1	9.4	10.1	11.9	9.9	8.9	10.1	10.5
Eskdalemuir	4.5	4.4	4.5	5.4	4.6	4.1	4.7	4.9

Figura 51 . Exemplo de validação do WASP (TROEN e PETERSEN,1989)

As colunas seguintes mostram o resultado dos dados transpostos das estações no topo da tabela para a estação na primeira coluna. No caso de Sneefell a transposição dos dados para Dublin apontou para uma velocidade de 6,2 m/s, ou seja, pouco superior à medida no local mas uma ótima previsão se for considerada a diferença entre a magnitude nas duas estações. Nas demais estações o resultado é similar, como se pode notar pela semelhança entre o valor medido e os preditos em uma mesma linha.

7.3.2 CFX

A teoria e funcionamento do software CFX são apresentadas no capítulo 8, onde ele foi usado para diversas simulações. A sua utilização para a correção topográfica dos dados de vento nesta dissertação não foi possível devido ao esforço envolvido na configuração e processamento de tais simulações, uma vez que os domínios são muito maiores que os necessários à simulação de edifícios, e a modelagem da topografia não é viável manualmente. STANGROOM (2004) aconselha utilizar uma base de dados topográficos com pontos e não curvas de nível, como são comumente disponibilizadas, e a confecção de uma rotina computacional para a modelagem.

São apresentados a seguir dois estudos realizados por STANGROOM (2004), comparando simulações de CFD com dados obtidos em túnel de vento e no experimento de Askervein Hill. As simulações resolveram as equações de conservação de massa, momento e energia. No caso do morro mais simples foram testados diversos modelos de turbulência, e para as simulações de Askervein Hill foram utilizados os modelos de turbulência RNG k- ϵ , de 1° ordem, e RMS, de 2° ordem.

A figura 52 apresenta a malha utilizada na simulação do mesmo morro das figuras 47. Nota-se que a malha utilizada é bastante refinada, e conseqüentemente o tempo de processamento é grande.

Figura 52 . Malha criada no CFX para simulação em um morro (STANGROOM, 2004)

A figura 53 apresenta uma comparação entre os dados em túnel de vento e três modelos de turbulência testados. Em todos os modelos as simulações apresentam bons resultados, porém se nota estranhos desvios já longe do morro, nos últimos dois perfis.

A comparação da variedade de perfis obtidos em túnel de vento e aqui apresentados com os esquemas bidimensionais encontrados na bibliografia permite compreender a magnitude da simplificação envolvida em tais modelos.

Com relação ao CFD, pode-se concluir que, no caso de morros simples, sua utilização oferece bons resultados.

Figura 53 . Perfil de vento medido in loco no topo do morro e simulado em CFD (STANGROOM, 2004)

Os gráficos da figura 54 apresentam comparações entre os dados obtidos no experimento de Askervein Hill e simulações com o software CFX.

Os perfis de velocidade média e turbulência no cume do morro apresentam grandes desvios, como se pode ver na figura 54. A utilização de tais perfis certamente causará desvios na PVN.

Figura 54 . Perfil de intensidade média (esq) e turbulência (dir) medidos in loco e simulados em CFD para o cume de Askervein Hill (STANGROOM, 2004)

A figura 55 apresenta duas comparações entre os dados medidos nos mastros e as simulações de CFD. Foram selecionados gráficos que mostrassem a sensibilidade do software em relação à direção entre a incidência do vento e a linha de mastros, pois a qualidade da simulação se mostra bastante vulnerável em casos onde vento e mastros não estejam alinhados, como se pode ver no gráfico da direita.

De forma geral pode-se concluir que o uso de CFD é válido, mas que o trabalho envolvido não justifica sua utilização em um único estudo de PVN, sendo mais conveniente que se realize estudos

para as principais cidades do país, disponibilizando-os para futuros estudos de PVN.

Figura 55 . Simulação de CFD em relação aos dados da linha de mastros de Askervein Hill. Bons resultados (esq) e resultados ruins (dir) (STANGROOM, 2004)

7.3.3 KARAM

O trabalho de KARAM et. al. (2003) apresenta uma adaptação da equação de conservação de massa para o estudo do efeito da topografia no campo de ventos em uma dada região. Trata-se do mesmo princípio utilizado pelo WASP, porém sob outra formulação matemática e com uma documentação mais detalhada.

Uma vez que o método não é disponibilizado em uma rotina computacional, a sua utilização exige conhecimentos básicos de programação, mecânica dos fluidos e métodos numéricos, como os encontrados em ANDERSON (1995).

Em relação ao seu uso na PVN, o método não fornece uma resposta adequada às necessidades de adaptação do perfil de ventos, pois a correção dos efeitos topográficos é dada apenas para as componentes médias de u e v , ou seja, não há perfil vertical de velocidade.

Figura 56 . Topografia de São Paulo e resultados de simulação de KARAM et. al. (2003)

A figura 56 apresenta os vetores calculados na região de São Paulo para vento SUL, em um

domínio de 50Km de lado com um grid de 100x100 pontos, onde aparecem a Serra da Cantareira (parte superior da figura) e o espigão da Avenida Paulista (parte central da figura).

A área marcada na figura 56, correspondente a um trecho da várzea do Rio Tamanduateí, é ampliada na figura 57.

Nota-se que os ventos na área à esquerda na figura sofrem uma deflexão de aproximadamente 45° em relação ao vento na área à direita.

KARAM et. al. (2003) salienta o papel da Serra da Cantareira na conformação do padrão de ventos da região metropolitana, o que evidencia que a escala horizontal adotada por STANGROOM (2004) pode não ser adequada para estudos em terrenos complexos.

Figura 57 . Topografia de São Paulo e resultados de simulação de KARAM et. al. (2003)

8 Definição dos coeficientes de pressão no edifício

O vento exerce diferentes forças em cada face do edifício, tal qual o faz com um barco à vela. A diferença entre a força exercida pelo vento em cada abertura provoca o movimento do ar no interior do edifício. Assim, o estudo da distribuição de forças provocadas pelo nas faces do edifício é de fundamental importância, uma vez que o objetivo deste trabalho está ligado à determinação da vazão de ar provocada pelo vento no interior do edifício.

Na figura 58 são apresentadas as pressões (em Pascal - Pa) que um vento de referência de 6 m/s provoca em um edifício. As pressões positivas, ou sobrepressões "empurram" o edifício, enquanto as negativas, também chamadas subpressões, "puxam" o edifício.

Figura 58 . Edifício em corte. Sobrepressão (+) e subpressão (-)

Na figura 59 vê-se o mesmo edifício com janelas na parte frontal com relação ao vento, (região a barlavento) e janelas de mesma área localizadas na parte posterior do edifício (sotavento). Ao abrir as janelas, o ar no interior do edifício é "empurrado" pelo vento na janela frontal e sairá pela janela posterior, onde estará "sendo puxado". Este sistema, onde as força de sobrepressão e subpressão agem de maneira conjunta para promover a ventilação natural, é chamado ventilação cruzada.

Figura 59 . Esquema de ventilação cruzada em ambiente com duas aberturas em faces opostas

Na figura 60 vê-se uma abertura na cobertura e uma a sotavento. Neste caso as duas áreas estão sujeitas a subpressão, ou seja, o vento as "succiona". Estabelece-se uma competição entre as aberturas, vencida, neste caso, pela janela na face superior, com maior subpressão. O vento de dentro do edifício será succionado pela abertura zenital, e como o edifício não pode ficar vazio, a janela a sotavento, mesmo tendendo a succionar, servirá de entrada de ar.

Figura 60 . Esquema de ventilação cruzada com aberturas na cobertura e na face a sotavento

Caso as duas aberturas estivessem posicionadas em áreas de sobrepressão ocorreria fenômeno semelhante.

Em todos os casos anteriormente descritos, a pressão interna do edifício assumirá um valor intermediário entre as pressões nas duas aberturas, e o calculo da pressão interna será apresentado em detalhes no capítulo dez. A área da abertura e a geometria da mesma são de suma importância neste processo, e serão abordadas no capítulo nove.

Nos casos em que ambas as aberturas estão sujeitas à mesma pressão, não haverá ventilação por ação dos ventos e o interior do edifício será sub ou sobrepressurizado dependendo da posição das aberturas.

Todos estes exemplos se destinaram a exemplificar a importância do conhecimento das distribuições das pressões exercidas pelo vento, para que a PVN reflita a realidade do edifício.

Esta etapa do procedimento se destina a orientar o projetista na obtenção destas pressões.

A seção 8.1 apresenta a definição de C_p - Coeficiente de Pressão e a importância dos diversos elementos que influenciam no seu valor.

A seção 8.2 trata da obtenção de C_p por meio de ensaios em túnel de vento. Trata-se de uma seção longa e detalhada, uma vez que este é o principal meio de obter dados de C_p .

A seção 8.3 apresenta os cuidados no uso de simulações de CFD para a obtenção de C_p . Da mesma forma que ocorre com a seção 8.2, o uso do CFD é tratado em detalhes pois os cuidados aqui descritos são evocados nas seções nove e onze.

A seção 8.4 trata dos modelos analíticos para a determinação de C_p . Este modelos fornecem dados aproximados de C_p para edifícios de forma simples e com entorno regular, mas devem ser usados com cautela fora destas circunstâncias.

A seção 8.5 apresenta um banco de dados com ensaios de C_p obtidos em túnel de vento e publicados na literatura especializada. Na ausência das ferramentas acima elencadas, é possível obter no referido banco os resultados para um edifício de forma e entorno similares àquele que se deseja conhecer o C_p .

8.1 Fundamentação teórica

8.1.1 Definição de coeficientes de pressão

Define-se Coeficiente de Pressão (C_p), o quociente adimensional da pressão dinâmica medida em um ponto x na parede do modelo (P_x) pela pressão dinâmica do fluxo de ar (vento) não perturbado (P_d):

$$C_p = \frac{P_x}{P_d}$$

A pressão dinâmica do fluxo não perturbado é a força por unidade de área exercida pelo vento nem um plano ortogonal ao sentido do escoamento.

Defini-se a pressão dinâmica do fluxo não perturbado como:

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2}$$

Onde:

P_d – pressão dinâmica do fluxo (Pa)

V – velocidade do fluxo (m/s)

ρ – massa específica do ar (kg/m^3)

À temperatura de 15°C e pressão de 1atm, a massa específica do ar é de $1,225\text{kg/m}^3$.

Para outras temperaturas pode-se utilizar a fórmula:

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{273}{T_1}$$

ρ_1 – massa específica do ar a calcular na temperatura T_1 (kg/m^3)

ρ_0 – massa específica do ar a $273\text{ K} = 1,293\text{ kg/m}^3$

T_1 – temperatura para a qual se deseja calcular a massa específica do ar (K)

Quando se utiliza um perfil de velocidades em função da altura acima do solo, este deve ser fornecido junto aos dados do ensaio para a determinação do C_p . Como a velocidade do vento varia em função da altura, o mesmo ocorre com a pressão dinâmica. Assim, define-se que para efeito da determinação de C_p , a pressão dinâmica deve ser medida na altura do topo do edifício. O perfil de turbulência em função da altura utilizada no ensaio também deve ser fornecido.

A definição do coeficiente de pressão é de grande utilidade, pois estabelece não a pressão na face, mas a relação entre a pressão dinâmica do vento e a pressão exercida no edifício pelo mesmo. Assim, dado um vento qualquer, é possível determinar a pressão (P_x) que o mesmo exercerá no edifício, utilizando-se a relação:

$$P_x = C_p \cdot P_d$$

Substituindo na equação anterior a definição de P_d , adotando-se $\rho = 1,225\text{ kg/m}^3$ e a velocidade em m/s tem-se que:

$$P_d = 0,612V^2 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Assim:

$$P_x = C_p \cdot 0,612V^2 \quad \text{ou,}$$

$$P_x = 0,5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot V^2$$

8.1.2 Importância do coeficiente de pressão

A obtenção de dados precisos de coeficiente de pressão demanda um esforço considerável. Ao mesmo tempo existe uma grande oferta de valores "aproximados" de C_p cujo uso é tentador por exigir pouco ou nenhum esforço. Esta seção se propõe a demonstrar a importância do dado de C_p na PVN.

De forma a exemplificar esta importância, considere um edifício unicompartimental com apenas duas aberturas iguais cuja área (A em m^2) se deseja dimensionar. Trata-se de um problema clássico de PVN, no qual a forma do edifício e a posição das aberturas já foram definidas no projeto arquitetônico, e resta somente determinar a área das aberturas. O dimensionamento das aberturas procura garantir que será obtida uma dada vazão de ar de projeto (Q em m^3/s), considerada adequada para garantir a qualidade do ar e o conforto térmico. A definição da vazão de ar adequada a cada caso está fora do escopo deste trabalho, o qual trata somente do procedimento a ser utilizado para quantificar esta vazão no projeto.

Cabe lembrar que os caixilhos respondem por aproximadamente 10% do custo em uma obra de habitação de interesse social por exemplo. Em um conjunto habitacional de 200 unidades habitacionais o gasto total com caixilhos é da ordem de R\$ 350 mil.

Sejam (c_e) e (c_s) os coeficientes de pressão nas aberturas de entrada e saída respectivamente. Neste contexto, pode-se adotar a fórmula a seguir (FROTA e SCHIFFER, 2000) para calcular a vazão de ar no ambiente para uma dada velocidade do vento (v em m/s):

$$Q = C_z \cdot A \cdot v \cdot \sqrt{c_e - c_s}$$

C_z é o coeficiente de descarga da abertura, que será considerado constante e igual a 0,6 nesta seção.

Com base na fórmula anterior, é demonstrar que se o valor da diferença ($c_e - c_s$) é adotado como "aproximadamente" 0,1 quando o valor correto seria 0,2, a área da abertura é super dimensionada em 40%. Considerando que os caixilhos respondem inicialmente por 13% do custo da obra, aumentar sua área em 40% leva a um acréscimo de 4% no custo total da obra. Se o contrário tivesse ocorrido, ou seja, a adoção de um C_p "aproximado" de 0,2 quando o valor correto seria 0,1, a abertura seria subdimensionada. O subdimensionamento seria benéfico para os custos da obra, porém a vazão de ar (Q) não seria atingida sacrificando assim o conforto térmico e qualidade do ar. Variações no coeficiente de pressão da ordem de 0,1 são bastante comuns, como será visto nas próximas seções.

Como conclusão pode-se dizer que a definição de C_p é fundamental para o correto dimensionamento das aberturas, e que a adoção de valores "aproximados" somente se justifica durante a fase de estudo preliminar, para a definição do partido a ser adotado.

Quando o valor da diferença ($c_e - c_s$) é alto, o erro relativo é reduzido. Um aumento nesta diferença de 0,9 para 1,0 provoca uma redução de apenas 5% na área de abertura necessária para garantir a mesma vazão de ar de projeto. Mesmo neste caso em que o erro relativo é menor, um estudo detalhado de C_p se justifica para diversos tipos de obra. Um conjunto habitacional de 200 unidades consome aproximadamente R\$ 350.000,00 em caixilhos, e nota-se que um erro de 5% assume um valor significativo.

Diante destes fatos, é possível compreender que o desafio no projeto de ventilação natural por

ação dos ventos reside no posicionamento das aberturas em áreas com coeficientes de pressão que apresentem as maiores diferenças. O projeto de ventilação natural deve ser capaz de identificar estas áreas de maior diferença de pressão no modelo, ou mesmo criá-las pelo uso de quebra-ventos e outros dispositivos que modifiquem a distribuição de pressão nas faces do edifício. Isto só é possível de posse de dados confiáveis de distribuição das pressões nas fachadas.

8.1.3 Variação do C_p em função da direção do vento

O valor do coeficiente de pressão em um dado ponto na fachada do edifício varia em função da direção do vento em relação a este ponto.

Na figura 61 são apresentados os coeficientes de pressão para a fachada a barlavento, de um edifício com proporção 1:1:1, para diferentes direções de incidência do vento.

De forma a facilitar a leitura, um ponto foi escolhido aleatoriamente na fachada e é marcado pelo cruzamento de duas linhas vermelhas na figura (a), na qual o vento incide a 0°. Nas demais figuras, ele é marcado apenas por um ponto preto.

Da comparação das sucessivas figuras nota-se que variações no C_p deste ponto, da ordem de 0,1, ocorrem em intervalos menores que 10°.

Os resultados utilizados nesta comparação foram produzidos em ensaios em túnel de vento pela Tokyo Polytechnic University, e acessados em 01.03.2006 em http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure.

Da sua comparação também é possível concluir que a determinação dos C_p para uso na predição da ventilação natural deve ser feita para intervalos de 5° ou 10° no máximo, contudo, diversas fontes de C_p na bibliografia apresentam resultados para intervalos de 30° ou mais.

8.1.4 Variação do C_p em função da proporção do edifício

É comum encontrar na bibliografia dados de C_p para edifícios de planta retangular. Estes resultados muitas vezes ignoram as proporções entre largura, altura e comprimento, tratando edifícios de proporções diferentes como iguais.

Os resultados da figura 62 apresentam a distribuição de C_p nas fachadas de edifícios de planta retangular cujas fachadas apresentam diferentes proporções umas em relação às outras. Em todos os casos o vento é perpendicular à fachada. Assim como na seção anterior, os resultados foram produzidos em ensaios em túnel de vento pela Tokyo Polytechnic University, e acessados em 01.03.2006 em http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure..

No caso de edifícios de planta quadrada, apenas a distribuição de C_p em uma das fachadas é apresentada. Nos edifícios de planta retangular são apresentadas as distribuições nas duas fachadas, cada uma delas obtida em um ensaio com o vento perpendicular a fachada.

Da comparação entre as figuras, nota-se que as distribuições são semelhantes, mas apresentam diferenças significativas quando considerada a análise da seção 8.1.2. Diante do acima exposto, pode-se concluir que a proporção entre as partes de um edifício é relevante para a determinação de C_p , e que o uso de dados de C_p genéricos para “edifício de planta retangular” deve ser evitado.

Figura 61 . Distribuição de C_p na fachada a barlavento em função da direção de incidência do vento

Figura 62 . Distribuição de C_p na fachada, com vento ortogonal a mesma, para diferentes proporções de edifícios (largura:comprimento:altura)

8.1.5 Variação do C_p em função da forma de apresentação

A forma de apresentação dos dados obtidos nos ensaios pode levar a erros na vazão calculada.

Em geral, os dados de C_p são apresentados em uma das três formas listadas a seguir:

- distribuição nas fachadas,
- perfis médios em planta ou em corte,
- tabelas.

O dado de C_p pode ser apresentado como um único valor médio para toda a fachada, médias para partes de cada fachada ou para pontos de interesse específico.

A figura 63 traz os resultados de dois ensaios cujas formas de apresentação de C_p são diferentes. Nestes ensaios, os modelos têm proporções e entorno diferentes, entre outras discrepâncias que justificam as diferenças nos resultados encontrados. Todavia, eles se prestam a permitir a comparação entre as formas de apresentação.

Nota-se que os perfis de distribuição no primeiro ensaio, não são capazes de descrever a complexidade encontrada no segundo ensaio, uma vez que apenas um perfil é traçado para cada fachada, em geral no ponto médio da mesma.

As vantagens no uso de perfis é a facilidade na leitura, que ocorre também com as tabelas, as quais em geral adotam simplificações similares s dos perfis.

No caso das tabelas, esta facilidade é utilizada na confecção de programas de computador para predição da ventilação natural. Estes programas utilizam os mesmos perfis de distribuição de C_p para diferentes edifícios e adotam o valor da tabela correspondente à direção do vento e à altura da janela, acarretando grandes erros na vazão calculada. Nestes casos, tabelas com valores de ensaio para os pontos de interesse no edifício devem ser utilizadas.

Conclui-se que os resultados na forma de distribuição nas fachadas são mais adequados do que na forma de perfis.

8.1.6 Variação do C_p durante o ensaio

O valor de C_p tratado até este momento neste trabalho se refere ao valor médio de C_p .

Nos ensaios em túnel, o valor de C_p é medido em frequências de até 1000Hz, e apresenta grandes variações instantâneas, devido a turbulência e a interferência que a presença dos edifícios causa no escoamento.

Como exemplo destas variações, são apresentadas na figura 64 as distribuições de C_p médio, máximo e mínimo na fachada a barlavento com vento ortogonal à fachada, para um edifício em forma de cubo. Nota-se que enquanto os valores médio variam entre 0,2 e 0,7 para os diferentes pontos da fachada, os valores máximos são muito superiores aos médios, variando entre 1,2 a 2,6. Os valores mínimos variam entre 0,1 e 0,4.

Figura 64 . Distribuição de C_p médio, máximo e mínimo para uma mesma fachada

Na maior parte dos casos o valor médio de C_p é adequado para a PVN, mas quando o desvio padrão do C_p é da mesma ordem que o C_p médio, os efeitos devidos às oscilações devem ser considerados (ETHERIDGE, 2000). Todavia, poucos estudos divulgam o desvio padrão dos valores medidos durante o ensaio.

8.1.7 C_p em função do perfil de velocidade média e turbulência

A figura 65 apresenta a comparação entre as distribuições de C_p em uma mesma face de um mesmo modelo em três ensaios diferentes nos quais foi alterado apenas o perfil de velocidade média do vento. Foram utilizados perfis logarítmicos (CLP Neutra) com rugosidades variando de 0,001 a 0,1. Os resultados foram obtidos por meio de simulações de CFD elaboradas durante esta pesquisa.

Figura 65 . Distribuição de C_p na face a barlavento para rugosidade respectivamente de (0,001) (0,01) (0,1)

Da análise deste exemplo, que não reflete a complexidade dos efeitos da mudança de rugosidade nas demais faces do modelo e nas demais direções de incidência do vento, pode-se concluir que o valor de C_p é influenciado pelo perfil de velocidade do vento na entrada e saída do modelo. Foi adotado o mesmo perfil de turbulência em todos os casos. Contudo, pode-se esperar que os valores de C_p sejam diferentes caso o perfil de turbulência fosse diferente.

Com base nesta constatação, pode-se afirmar que o valor de C_p para o uso no projeto de ventilação natural deve ser obtido por meio de ensaios que considerem a rugosidade do entorno do edifício, sendo que resultados genéricos para perfis de velocidade não especificados podem induzir a erros no projeto de ventilação natural.

8.2 Coeficientes de pressão medidos em túnel de vento

Os túneis de vento são importantes ferramentas no estudo das distribuições de pressão nos edifícios, pois permitem reproduzir de maneira controlada diversos fenômenos da CLP.

Nesta seção serão descritas as etapas relacionadas à obtenção de C_p médio e desvio padrão por meio de ensaios em túneis de vento.

8.2.1 Túnel de vento

Existem diversos tipos de túnel de vento como os aeronáuticos (de baixa e de alta velocidade) que não se prestam ao estudo da distribuição de pressão nas faces dos edifícios, pois possuem baixo nível de turbulência e não reproduzem os perfis encontrados na CLP.

Os chamados "túneis de camada limite" são projetados para reproduzir os fenômenos da CLP. Em geral são reproduzidos apenas os perfis de velocidade média e turbulência para uma dada condição de estabilidade, porém existem túneis térmicos que reproduzem a estratificação térmica e as diferentes condições de estabilidade da atmosfera.

Figura 66 . Fotos do túnel de vento de camada limite atmosférica do IPT. (Divulgação)

Figura 67 . Seção e planta do túnel de vento de camada limite atmosférica do IPT. (Divulgação)

O túnel de vento de camada limite atmosférica do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – é um equipamento multi-usuário financiado pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – e do qual a FAU-USP é uma das usuárias, será descrito a seguir.

O túnel do IPT possui um trecho de 20m de extensão para o condicionamento da camada limite, e uma seção livre de 6,0 m², sendo capaz de atingir velocidades de até 20m/s. A repetibilidade no posicionamento das sondas no modelo, é resolvida pelo uso de um robô cartesiano. A criação do perfil da camada limite é feita pela utilização de blocos ao longo da extensão da seção de testes, e geradores de vórtice. As figuras 66 e 67 apresentam imagens deste túnel.

Alguns experimentos em túnel de vento realizados durante esta pesquisa foram realizados no túnel de vento da SBE – School of the Built Environment, The University of Nottingham. Trata-se de um túnel de circuito aberto, capaz de atingir velocidades entre 0,5 a 5 m/s. A seção de testes tem aproximadamente 1,0 x 0,7m, e suas paredes laterais estão afastadas da mesa giratória de forma a reduzir sua influência sobre modelos de maior dimensão, permitindo assim experimentos com obstrução acima de 5% da seção de ensaio.

Os pesquisadores e o equipamento para controle do túnel e medição das variáveis do experimento ficam dentro do túnel, entre a área da seção de testes e o fechamento lateral. Assim, o túnel tem duas portas de entrada, uma em cada lado da seção de ensaio. Esta configuração torna fácil o manuseio dos equipamentos e do modelo em escala, pois não é necessário “abrir” ou “entrar” na seção de testes para ajustar o modelo ou os equipamentos.

A camada limite é produzida de forma aproximada pela colocação, com diferentes espaçamentos, de lâminas horizontais após o trecho de contração, conforme ilustrado na figura 69.

Figura 68 . Planta do túnel de vento da SBE. (CAREY, 2005)

Este túnel foi construído segundo um projeto padrão do BRE – Building Research Establishment, Reino Unido, conforme ilustrado nas figuras 68. Diferente do túnel do IPT, ele tem caráter didático, e

não se propõe a simular edifícios reais, sob condições de rugosidade específicas, pois não é possível produzir camadas limite com características específicas e o escoamento não está plenamente desenvolvido na área de testes.

A repetibilidade dos experimentos no túnel da SBE é baixa, pois o posicionamento do modelo e dos sensores é feito manualmente.

Figura 69 . Fotos do túnel de vento da SBE: Aletas para geração de perfil de camada limite, área de acesso ao túnel e colméia.

8.2.2 Modelo em escala e similaridade

A definição das características do modelo em escala é de fundamental importância para o sucesso de um experimento em túnel de vento.

Para que se possa estender os resultados de um experimento para uma outra situação, é necessário saber se o fenômeno observado no modelo em escala e o que ocorre no protótipo (o edifício real) são equivalentes, ou seja, se as regras da física e as condições de contorno são similares.

Para explicar o conceito de similaridade, imagine um protótipo (edifício real) de 80m de altura e 20m de comprimento. Em escala 1:50, o modelo teria 40cm de altura e 10cm de comprimento. Obviamente, o modelo e o protótipo não são iguais, mas a relação entre as partes, no caso a relação altura/comprimento, permite que se reconheça o protótipo no modelo e vice-versa. A manutenção destas relações internas é a similaridade. E de posse do fator de escala ($K=50$), pode-se reconstruir o protótipo com base no modelo.

Assim, dois fenômenos são similares se é possível reconhecer um deles com base no outro e se as relações internas entre as partes (forças, propriedades dos materiais) se mantiverem em ambos os casos.

Imagine agora o mesmo protótipo em um terreno de 200x200m, cercado por árvores, um estacionamento e uma pequena colina. O modelo a ser ensaiado deve reproduzir esta condição de contorno geométrica, do contrário não haverá similaridade.

Além da similaridade geométrica, existem outros tipos de similaridade que um experimento

de ventilação em túnel de vento deve considerar, como é o caso da similaridade dinâmica e da similaridade térmica.

Na figura 70, apresenta-se um cilindro (diâmetro= D) exposto a um vento de 5m/s. Na mesma figura é apresentado um modelo em escala reduzida 1:10 ($K=10$) exposto a um vento de 0,5m/s. Pode-se ver claramente que os escoamentos ao redor dos cilindros não são os mesmos. Apesar das dimensões e da velocidade seguirem a mesma proporção, os dois casos não tem similaridade, e o que descobriremos em um deles não pode ser estendido para o outro. Isto ocorre porque a similaridade dinâmica (a do escoamento em relação ao sólido) assim como a similaridade térmica não é linear como a similaridade geométrica.

Figura 70 . Esquema (esquerda) e fotos (direita) do escoamento ao redor de cilindros

8.2.2.1 Similaridade geométrica

A similaridade geométrica é a mais simples envolvida na modelagem de ventilação natural, embora alguns cuidados devam ser tomados.

As observações feitas nos tópicos a seguir são apenas uma referência. Caso haja dúvida com relação às questões de escala, o ideal é testar algumas configurações e identificar a sensibilidade do modelo a elas.

8.2.2.2 Detalhes do modelo

O modelo deve reproduzir os detalhes do protótipo dentro das possibilidades materiais da escala escolhida.

Contudo, alguns pontos devem receber atenção especial devido a sua grande influência no resultado do experimento. As partes do modelo próximas às aberturas e às arestas devem ser cuidadosamente detalhadas, assim como geometrias de formas orgânicas e sua rugosidade. A figura 71 apresenta estas áreas.

Figura 71 . Corte mostrando as áreas a serem cuidadosamente detalhadas no modelo a ser ensaiado em túnel de vento

8.2.2.3 Vizinhança

A extensão da vizinhança a modelar é a principal decisão a ser tomada com relação às obstruções externas e depende da altura e distância de cada obstrução. São chamadas obstruções externas: árvores, edifícios, muros, morros e outros elementos externos ao prédio e que modificam o fluxo do vento que chega ao modelo cujo C_p se deseja determinar.

As obstruções externas devem ser modeladas tanto a barlavento (direção da qual o vento sopra - em geral, a direção usada para descrever o vento) como a sotavento (direção para a qual o vento sopra). O CA14 (COST, 2004) é um conjunto de regras para simulação em CFD de conforto de pedestres, produzido pelo COST - European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research - e, a despeito de ter sido elaborado para simulações computacionais, pode ser utilizado para balizar a construção de modelos para túnel de vento. COST (2004) sugere um raio médio de 300m dentro do qual as obstruções devem ser modeladas. Porém, nem todas as obstruções precisam ser modeladas: somente aquelas cuja distância até a área de interesse do estudo seja inferior a 6 a 10 vezes a altura da obstrução, conforme demonstrado na figura 72.

Figura 72 . Parâmetros da CA14 para modelagem de obstruções na vizinhança (COST, 2004)

Contudo, outros estudos indicam que esta relação não garante que o entorno tenha sido adequadamente modelado. A figura 73 mostra a distribuição de pressão na fachada de um modelo de seção quadrada, obstruído por anteparo de altura igual à do modelo.

Figura 73 . Seção de um modelo cúbico com a distribuição dos coeficientes de pressão para anteparo sólido com a mesma altura do modelo, a diferentes distâncias do modelo. (FROTA e SCHIFFER, 2000)

As curvas de 1 a 4 mostram os resultados para diferentes espaçamentos entre o anteparo e o modelo. A curva 0 mostra o resultado sem anteparo. Pode-se notar que o efeito da presença do obstáculo nos coeficientes de pressão no modelo é significativo, mesmo com 11 alturas de espaçamento., e este obstáculo não seria modelado caso a orientação de COST (2004) fosse adotada.

Caso a vizinhança do edifício em análise ainda não esteja consolidada, é aconselhável modelar tanto a situação atual quanto a futura, tomando-se por base a legislação edilícia do local. É comum observar edifícios cujo desempenho é afetado pela ocupação do entorno, e este cuidado permite ao projetista conhecer o impacto das modificações e tomar partido em relação ao cenário futuro. Pode-se, por exemplo, projetar aberturas mais generosas que mantenham um desempenho equivalente quando da construção das novas obstruções do entorno.

No entanto ao introduzir um cenário futuro, que pode ou não se concretizar, e cujo prazo e ordem de execução são também incertos, a complexidade do estudo de ventilação natural se amplia, sendo este assunto ainda pouco estudado.

Figura 74 . Vizinhança de um modelo para uma situação crítica.

8.2.2.4 Relevo

Acidentes geográficos no entorno do edifício em análise devem ser considerados no modelo em escala, pois alteram o escoamento. Contudo, a escala necessária para representar o relevo é em geral algumas vezes maior que a do edifício. Uma forma de considerar o efeito do relevo no edifício é através de uma análise isolada dos efeitos topográficos, obtida com um modelo topográfico em túnel de vento. Os resultados desta análise são utilizados como condição de contorno no experimento com o edifício. Esta abordagem é recomendável quando a interação entre edifício e relevo não é forte. No caso de edifícios em encostas ou próximos a escarpas, o relevo e o edifício devem ser modelados conjuntamente.

8.2.2.5 Obstrução do modelo na seção de testes do túnel – blocagem

A obstrução do modelo em relação à seção de testes do túnel é o fator determinante na escolha da escala do modelo. Quando um modelo em escala é colocado dentro do túnel, ele reduz sua seção de ensaio, afunilando o escoamento. Os efeitos deste afunilamento nos resultados do ensaio podem ser desprezados se a obstrução for inferior a 5% da seção de ensaio (COOK apud CAREY, 2005). O valor de 5% é apenas uma referência comumente encontrada na bibliografia, que atende a maior parte dos casos. COST (2004), por exemplo, aconselha uma obstrução máxima de 3%, valor que pode ser considerado rigoroso por limitar o tamanho do modelo, mas reduz a possibilidade de erros devidos à obstrução. Em caso de dúvida em relação à obstrução a adotar, e sua influência no resultado do experimento, é possível estudar seus efeitos pela comparação de testes feitos com modelos de diferentes escalas e, conseqüentemente, diferentes obstruções.

A altura do modelo não deve ultrapassar 50% da altura da seção de testes. COST (2004) aconselha um limite de 16% para a altura do modelo em relação a altura da seção de testes. Este limite não é significativo, uma vez que a obstrução funciona como parâmetro determinante na maior parte dos casos.

A seguir são apresentados dois exemplos de definição da escala do modelo a ser analisado, baseados nas características do túnel de vento e na obstrução da seção de teste:

a. Túnel da SBE – Nottingham, Reino Unido

Seção de teste do túnel (largura x altura) – $1,0 \times 0,7\text{m} = 0,70\text{m}^2$

Altura máxima do modelo – 0,35m (adotando 50% da altura da seção de testes)

Área máxima do modelo vista pelo vento – $0,7 \times 5\% = 0,035\text{m}^2 = 350\text{cm}^2$

Possíveis configurações (altura X largura): 35 x 10cm, 20 x 19cm ou 15 x 23cm.

b. Túnel do IPT – São Paulo (Brasil)

Seção de teste do túnel (largura x altura) – $2,5 \times 2,5\text{m} = 6,25\text{m}^2$

Altura máxima do modelo – 1,25m

Área máxima do modelo vista pelo vento – $6,25 \times 5\% = 0,3125\text{m}^2 = 3125\text{cm}^2$

Possíveis configurações (altura X largura): 125 x 25cm, 90 x 34cm ou 60 x 52cm.

A figura 75 apresenta um esquema da área máxima do modelo vista pelo vento, para estas configurações de túnel.

Figura 75 . Exemplo de cálculo de área de obstrução.

8.2.2.6 Análise dimensional

A análise dimensional é o nome dado a um conjunto de teorias e procedimentos que se propõe a demonstrar a forma como diferentes variáveis atuam em conjunto no mesmo fenômeno. No capítulo 6 foram apresentadas relações para a CLP obtidas por meio da análise dimensional.

O teorema mais usado na análise dimensional é o de Buckingham Pi. (MUNSON et. al., 1997)

Segundo este teorema, se um conjunto de variáveis é dimensionalmente homogêneo, a relação funcional entre estas variáveis pode ser reduzida a números adimensionais.

Um número adimensional é um arranjo de variáveis onde todas as dimensões (ou todas as unidades caso sejam usadas às mesmas unidades) se cancelam, logo o número não tem dimensão nem unidade. Por exemplo: considerando-se a variável vazão Q (m^3/s) por uma janela de área A (m^2) e profundidade D (m) durante um intervalo de tempo t (s), pode-se formular um adimensional que será chamado Π_1 . Dentre as diversas formas que Π_1 pode assumir, pode-se escolher a forma:

$$\Pi_1 = Qt/AD.$$

Nota-se pela equação a seguir que todas as unidades se cancelam.

$$\frac{\frac{\text{m}^3}{\text{s}}/\text{s}}{\text{m}^2 \cdot \text{m}}$$

Na equação anterior, foram utilizadas as unidades metro e segundo para descrever as grandezas comprimento e tempo. A dimensão comprimento, representada pela letra L , pode assumir diferentes

unidades – metro, pé, polegada, milha, etc – assim como a dimensão tempo (T) – segundo, hora, dia, ano-luz. A definição de termos adimensionais deve ser feita com base nas dimensões (L,T) e não nas unidades (m,s). Assim, a vazão Q tem dimensão L^3/T , a janela de área A tem dimensão L^2 , e a profundidade D tem dimensão L e o intervalo de tempo tem dimensão T.

Assim, a relação adimensional é demonstrada por:

$$L^3 T^{-1} T^1 / L^2 L^1.$$

A obtenção deste adimensional foi possível porque o sistema é dimensionalmente homogêneo, porém a inclusão de outras variáveis poderia alterar este panorama. No caso do exemplo anterior a inclusão da variável massa, por exemplo, tornaria o sistema não homogêneo. A massa específica do ar é uma variável importante no estudo de ventilação natural, cuja unidade no SI é (kg/m^3), em termos adimensionais é dada por $M.L^{-3}$. (onde M é a dimensão massa). Se a massa específica do ar fosse incluída como uma variável no exemplo anterior o sistema não seria mais homogêneo porque a dimensão massa M não poderia ser cancelada, já que ela não aparece em nenhuma outra variável. Se o sistema não é homogêneo, não é possível definir a relação funcional entre as variáveis utilizando a análise dimensional.

A discussão sobre relações funcionais expressas por números adimensionais é relevante, pois permite expressar a relação entre as partes de um problema.

Para que os resultados do modelo possam ser estendidos ao protótipo é necessário que as relações entre as partes se mantenham as mesmas. Uma vez que os números adimensionais que retratam as relações entre as partes são definidos para um caso em análise, deve-se garantir que o valor assumido por estes números seja igual, tanto no modelo em escala quanto no protótipo (edifício real).

A vantagem no uso de números adimensionais é a sua capacidade de exprimir relações complexas entre diferentes variáveis em um ou poucos termos.

Definir corretamente os termos adimensionais é fundamental para o sucesso da análise dimensional. O teorema de Buckingham Pi define os passos que devem ser seguidos para definir os termos adimensionais de um problema:

- a. Definir as variáveis que interferem no problema.
- b. Listar as dimensões de cada variável.
- c. Definir a quantidade de números adimensionais (os chamados termos Pi) necessários para exprimir a relação funcional entre as variáveis. Isto é feito subtraindo o número de variáveis, do número de unidades envolvidas no problema.
- d. Definir os termos Pi, basicamente usando o expoente das variáveis para cancelar todas as dimensões.

8.2.2.7 Análise dimensional e similaridade em escoamentos externos

Conforme apresentado anteriormente, a similaridade dinâmica não é direta e linear como a similaridade geométrica.

O primeiro passo para utilizar o teorema de Buckingham Pi na análise de escoamentos externos é listar as variáveis que interferem no escoamento ao redor de um edifício. Num primeiro momento pode-se identificar as seguintes:

- forma do corpo,
- dimensão (por exemplo, uma altura – L),
- velocidade do fluido antes de chegar ao corpo (U),
- massa específica do fluido (ρ)
- viscosidade dinâmica (μ)

Uma vez satisfeita a similaridade geométrica, pode-se dizer que a similaridade é função de:

$$\text{Similaridade} = f(L, U, \rho, \mu)$$

Das variáveis listadas anteriormente, a viscosidade é sem dúvida a mais “exótica” aos arquitetos. A viscosidade é a propriedade dos fluidos que permite diferenciar o comportamento de um óleo em comparação ao da água. Esta propriedade é determinante na forma pela qual o fluido interage com os corpos sólidos.

A segunda etapa para utilizar o teorema de Buckingham Pi é listar as dimensões das variáveis. Pela análise da tabela 5 tem-se 3 unidades (L, M, T).

Variável	Dimensão	Unidade no SI
L	L^1	m
U	$L^1 T^{-1}$	m/s
ρ	$M^1 L^{-3}$	kg/m ³
μ	$M^1 T^{-1} L^{-1}$	N.s/m ²

Tabela 5 . Variáveis que influenciam um escoamento externo, com suas dimensões e unidades no SI

A quantidade de termos Pi (II), de que trata a terceira etapa do teorema, é igual à quantidade de variáveis menos a quantidade de dimensões, no exemplo $4-3=1$. Então, apenas um termo adimensional Pi é suficiente para exprimir a relação funcional entre as variáveis.

A definição do termo Pi, quarta e última etapa, envolve a definição de uma ou mais variáveis a serem repetidas em todos os termos adimensionais. O número necessário de variáveis repetidas é igual ao número de dimensões do problema, no caso 3. Estas três variáveis devem ser dimensionalmente independentes (duas variáveis não podem compartilhar todas as mesmas dimensões) e juntas devem representar todas as dimensões do problema.

Um exemplo de variáveis dimensionalmente dependentes é dado pela altura e comprimento. Em um problema no qual estas variáveis sejam listadas como importantes apenas uma delas deve fazer

parte do grupo de variáveis a serem repetidas, pois ambas têm a mesma única dimensão L. O mesmo se pode dizer da vazão e da velocidade, respectivamente $L^3.T^{-1}$ e $L.T^{-1}$: só uma delas pode fazer parte do grupo de variáveis repetidas.

No caso deste exemplo, pode-se escolher as variáveis repetidas L, U, ρ .

A definição dos termos Π_i é feita pela divisão da variável não escolhida, no caso μ , pelo produto das variáveis repetidas.

$$\Pi_1 = \frac{\mu}{L^a U^b \rho^c}$$

Cabe agora determinar os valores dos expoentes a, b e c para que o termo seja adimensional. Faz-se isto igualando as dimensões das variáveis do numerador e denominador da fração anterior.

$$(M^1 T^{-1} L^{-1}) = (L^1)^a (L^1 T^{-1})^b (M^1 L^{-3})^c$$

$$(M^1 T^{-1} L^{-1}) = L^a L^b T^{-b} M^c L^{-3c}$$

$$(M^1 T^{-1} L^{-1}) = M^c T^{-b} L^{(a+b-3c)}$$

$c=1, b=1$ e $a=1$. Substituindo em (3.1):

$$\Pi_1 = \frac{\mu}{LU\rho}$$

Este termo é o inverso de um número não dimensional importante na mecânica dos fluidos, o chamado número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{LU\rho}{\mu}$$

O número de Re expressa a relação entre as forças de inércia no fluido ($L.u.\rho$) e as forças de viscosas (μ). A força de inércia é a tendência do fluxo de manter o mesmo movimento a despeito da presença do corpo.

De fato, quando se realiza um experimento em escala, a relação entre estas forças deve ser mantida para que se tenha similaridade dinâmica, assim $Re_p = Re_m$, onde os subscritos "p" e "m" representam o protótipo e o modelo respectivamente.

$$Re_p = Re_m$$

$$\frac{L_p U_p \rho_p}{\mu_p} = \frac{L_m U_m \rho_m}{\mu_m}$$

No caso do uso de um túnel de vento normal (não pressurizado e sem controle de temperatura) pode-se considerar a viscosidade dinâmica e a massa específica iguais no protótipo e no modelo. Ambas as variáveis dependem da temperatura e pressão, portanto as condições de teste devem ser anotadas para posterior correção caso necessário.

Assim, a relação pode ser reduzida a:

$$L_p U_p = L_m U_m$$

Se um fator de escala geométrica K (1:K) for considerado, a relação entre L_p e L_m pode ser expressa por:

$$L_p = K L_m$$

Substituindo na equação anterior:

$$K L_m U_p = L_m U_m$$

$$K U_p = U_m$$

Como se nota, o fator de escala geométrica multiplica a velocidade do vento no protótipo para que se tenha a velocidade necessária no experimento com o modelo em escala reduzida. Assim, quanto menor o modelo, maior a velocidade necessária no túnel de vento para que se obtenha similaridade dinâmica. Para exemplificar o uso desta relação, será analisado a seguir o caso de um protótipo de altura 35m, exposto a um vento de 5m/s, a ser simulado nos túneis de vento do SBE e do IPT.

A altura máxima do modelo no túnel da SBE deve ser 0,35 m, conforme exposto anteriormente. A escala máxima para o modelo deve ser de 1:100 ($K=100$), conforme descrito a seguir:

$$L_p = K L_m$$

$$35 = K 0,35$$

$$K = 100$$

Para que se obtenha similaridade dinâmica entre o modelo e o protótipo, sendo $K=100$, a velocidade no modelo deve ser:

$$K U_p = U_m$$

$$100 \cdot 5 = 500 \text{ m/s}$$

O mesmo protótipo no túnel do IPT poderia ser modelado com altura de 1,25m, $K=28$ e $U_m=140\text{m/s}$.

Como se vê, as velocidades são bastante elevadas. A razão para este aumento se deve à necessária manutenção do equilíbrio de forças tanto no protótipo quanto no modelo. As forças viscosas, representadas por μ em Re, são as mesmas nos dois casos, pois o ar tem a mesma viscosidade, tanto no protótipo quanto no modelo. Diante disto, as forças de inércia devem ser mantidas com a mesma magnitude em ambos os casos.

No caso do protótipo tem-se uma dada massa de ar que incide sobre o corpo a uma dada velocidade, exercendo assim uma força. Quando as dimensões do corpo são reduzidas, no caso do modelo em escala, a quantidade de ar incidindo no corpo passa a ser muito menor e, assim a força

de inércia passa a ser muito menor. Como a força viscosa se manteve constante, ela passa a ser muito mais forte que a força de inércia. Isto explica porque na figura 70 o fluxo consegue contornar o cilindro menor – a viscosidade obriga o fluxo a contornar o cilindro pequeno já que a inércia é pequena. No caso do cilindro grande, a inércia é mais forte que a viscosidade, criando assim a zona de recirculação na parte posterior do cilindro.

Estas questões se devem à impossibilidade de utilização de um “ar em escala”, onde as propriedades físicas do ar pudessem ser reduzidas da mesma maneira que a dimensão do modelo.

Para manter o equilíbrio entre forças de inércia e forças viscosas, é necessário aumentar a velocidade do fluido que incide no modelo em escala.

Infelizmente, as velocidades necessárias não podem ser atingidas no caso dos túneis do IPT e da SBE. Nas próximas seções serão apresentadas algumas possíveis soluções para se obter similaridade dinâmica em túneis de baixa velocidade como os do IPT e da SBE.

8.2.2.8 Massa específica e viscosidade dinâmica

Certas propriedades do ar são sensíveis à mudanças na temperatura e pressão, e a alteração destas propriedades é relevante em alguns problemas de PVN. A tabela 6 mostra a massa específica e a viscosidade dinâmica do ar a diferentes temperaturas:

Propriedades	Temperatura (°C)		
	0	40	100
μ (N.s/m ²)	1,71E-5	1,87E-5	2,17E-5
ρ (kg/m ³)	1,29	1,12	0,94

Tabela 6 . Características termofísicas do ar à pressão de 1 atm. Fonte: BLEVINS apud MUNSON et. al. (1997)

Nota-se que a viscosidade pouco varia em função da temperatura, ao passo que há significativa mudança da massa específica, que é a origem da ventilação por efeito chaminé.

Considerar a massa específica do ar como constante, salvo nos termos ligados a gravidade (os responsáveis pelo efeito chaminé) é a chamada aproximação de Boussinesq. A aproximação de Boussinesq será adotada neste trabalho, salvo indicação em contrário.

Aumentar a massa específica é uma forma de aumentar a força de inércia, cuja importância foi discutida na seção 8.2.2.7, e assim utilizar baixas velocidades no túnel. Da análise da equação a seguir, pode-se notar que aumentos na velocidade do vento ou aumentos na massa específica do fluido agem da mesma forma no número de Reynolds.

$$Re_p = Re_m$$
$$\frac{L_p U_p \rho_p}{\mu_p} = \frac{L_m U_m \rho_m}{\mu_m}$$

Existem duas formas de aumentar a massa específica do fluido e as mesmas serão apresentadas nas próximas duas seções.

8.2.2.9 Túneis pressurizados

Considerando-se o ar um gás perfeito:

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

Da análise desta equação, tem-se que, aumentando a pressão dentro do túnel de vento, pode-se aumentar a massa específica do ar. Contudo esta é uma solução complexa e dispendiosa, pois requer túneis:

- de circuito fechado,
- com estrutura e paredes reforçada para resistir a pressurização interna,
- perfeitamente vedados,
- dotados de compressores de ar para manter o túnel pressurizado.

Além disto, as sobrepressões necessárias para se atingir a similaridade dinâmica são bastante altas, e assim esta solução é utilizada apenas em casos extremos, como em experimentos com modelos aeronáuticos.

8.2.2.10 Túneis d'água

Nos experimentos discutidos neste trabalho, o uso de outros fluidos que não o ar é possível, e cada fluido apresenta vantagens e desvantagens próprias.

Ao substituir o ar por outro fluido, as massas específicas e viscosidades serão diferentes no protótipo e no modelo. Estas diferenças nas propriedades dos fluidos podem ser utilizadas para obter a similaridade dinâmica, mesmo com baixas velocidades.

O fluido mais comum neste caso é a água, utilizada em túneis d'água. Neste caso, os efeitos de compressibilidade ficam alterados, o que não prejudica os resultados no caso de experimentos de ventilação natural em regime permanente. A POLI-USP possui um equipamento deste tipo, para modelos de pequeno porte, equipado com um sistema de velocimetria por imagem, conforme apresentado na seção 8.2.3.

No caso do uso de água como fluido do modelo, a comparação entre Re no modelo e no protótipo é dada por:

$$Re_p = Re_m$$

$$\frac{L_p U_p \rho_p}{\mu_p} = \frac{L_m U_m \rho_m}{\mu_m}$$

Dados da água:

$$\mu_{40^\circ} = 6,52 \times 10^{-4} \text{ N.s/m}^2$$

$$\rho_{40^\circ} = 992,2 \text{ kg/m}^3$$

Assim:

$$0,04KU_p = U_m$$

Comparando esta expressão com a equação para o ar, pode-se notar que o uso de água torna possível obter a similaridade dinâmica com velocidades 20 vezes menores do que as necessárias no caso do uso de ar. Como será apresentado a seguir, o uso de água é particularmente interessante no caso de estruturas com formas orgânicas, como cilindros, cúpulas, abóbadas e afins.

8.2.2.11 Independência do Re

Como visto anteriormente, não é possível obter similaridade dinâmica nos túneis de vento do SBE e do IPT, uma vez que seriam necessárias velocidades superiores às velocidades máximas dos túneis.

A despeito da importância das discussões sobre similaridade e Re, em alguns casos esta discussão não se aplica, e a similaridade acontece naturalmente conforme exposto na próxima seção.

8.2.2.12 Descolamento da camada limite

Para que se possa compreender o papel de Re na similaridade entre escoamentos, faz-se necessária uma breve introdução sobre a sua história e a natureza.

Conforme apresentado, o número de Reynolds é uma relação entre as forças de inércia e as forças viscosas no escoamento. Contudo, a invenção deste número se deu para distinguir duas situações de escoamento totalmente diferentes: o escoamento laminar e o turbulento. Para um dado tipo de escoamento é possível determinar um valor de Re a partir do qual o escoamento passa de um estado para o outro.

Quando Re é baixo, o escoamento é laminar. Nesta situação as partículas fluidas se movem paralelas umas as outras de maneira organizada. Quando uma lata de tinta é mexida com um bastão ocorre um escoamento laminar, pois a alta viscosidade da tinta garante um Re baixo. Em consequência, é difícil misturar tintas, pois o movimento das partículas é muito organizado e um filete de uma cor não se mistura o da outra cor. Os escoamentos laminares são governados pelos efeitos viscosos.

A situação oposta é o escoamento turbulento. Nele, as partículas se movimentam de maneira aleatória e se misturam rapidamente. Apesar de a velocidade média das partículas poder ser constante, sua velocidade instantânea varia. Caso seu movimento seja apenas em uma direção, como no caso de um duto, as partículas se movem para cima e para baixo dentro de um certo intervalo, facilitando a mistura e dissipando energia do escoamento na forma de calor. É o que acontece quando a água em um copo é mexida, com pouco esforço pode-se misturar outro líquido à água, pois sua viscosidade é baixa levando a um Re alto. O escoamento turbulento é governado pelos efeitos de inércia.

Figura 76 . Escoamento ao redor de um cilindro. Re baixo (esquerda) e alto (direita). (AYNSLEY, 1977)

Figura 77 . Separação da camada limite (AYNSLEY, 1977)

A figura 76 mostra escoamentos ao redor de um cilindro, com diferentes números de Re , ou seja, a distribuição de pressão ao redor do cilindro varia em cada caso. No primeiro, o fluido está totalmente aderido ao cilindro, empurrando a parte da frente, e puxando a parte de trás do cilindro. No segundo caso, o gradiente de pressão no escoamento é muito grande e as forças de inércia dominam o escoamento, e assim a partícula fluida é descolada da parede do cilindro antes de terminar de contorná-lo. Na figura 77 é apresentado em detalhe o descolamento da camada limite.

Se houvesse uma abertura na parte de trás deste edifício cilíndrico, a mesma teria desempenho

totalmente diferente para cada valor de Re .

O ponto de separação (ou descolamento) do escoamento é uma questão central na análise de fluxos em corpos imersos, como é o caso dos edifícios. Porém, em edifícios ou aberturas de cantos vivos a separação é definida apenas pela geometria e tende a ocorrer sempre nos mesmos pontos, independente de Re .

8.2.2.13 Forma do edifício e independência de Re

Pode-se dizer que o escoamento ao redor de edifícios com cantos vivos apresenta independência em relação à Re . Para estes edifícios a discussão das seções anteriores perde sentido, sendo possível utilizar praticamente qualquer velocidade no ensaio em túnel de vento. Nas palavras de BATCHELOR (2000) "A aresta saliente neste caso, fixa a posição de separação da camada limite para todos os números de Reynolds, e a variação do número de Reynolds afeta pouco ...". A definição do ponto de separação (ou descolamento) da camada limite é importante, pois como ressalta ETHERIDGE e SANDBERG (1996) "Isto quer dizer que elementos fluidos que estiverem inicialmente no mesmo ponto nos dois sistemas (protótipo e em escala) irão seguir os mesmos caminhos."

Deve-se observar que nestes casos é necessário atingir um Re mínimo, chamado crítico, e a partir deste valor a independência está garantida, pois mesmo nas formas com cantos vivos, há uma certa dependência, caso Re seja muito baixo. Assim, deve-se proceder a alguns ensaios com diferentes velocidades no túnel para atestar a independência de Re para o modelo.

Quando o edifício tem forma orgânica (sem cantos vivos), a similaridade dinâmica deve ser necessariamente atingida. Caso não seja possível obter as grandes velocidades necessárias no túnel, existem técnicas para forçar a separação em dado ponto posicionando pequenas fitas ou pequenos obstáculos ao fluxo na superfície do modelo, como apresentado na figura 78. (RAE, 1984)

Figura 78 . Modelos da asa de um avião. Linha branca em relevo no modelo para condicionar a camada limite. (RAE, 1984)

Este tipo de procedimento exige grande sensibilidade e experiência para ser utilizado, devendo ser validado por medidas em protótipos, e raramente é utilizado em edifícios sendo mais comum em

ensaios de aeronaves onde as velocidades requeridas nos testes seriam de centenas de km/h.

Para utilizar esta técnica é necessário saber onde colocar estes obstáculos, e gerenciar o risco do escoamento re-aderir ao modelo logo após o obstáculo, anulando seu efeito. Por estas questões, é preferível estudar modelos com formas orgânicas em grandes túneis de vento com velocidades próximas das de similaridade, ou em túneis d'água.

8.2.3 Sensores

Os sensores utilizados em um ensaio em túnel de vento se destinam a registrar as medidas necessárias ao cálculo do C_p e a descrição dos perfis de velocidade média e turbulência usados no experimento.

8.2.3.1 Tomadas de pressão no modelo

Conforme exposto anteriormente, a definição de C_p é dada pela relação entre a pressão exercida pelo vento na face do edifício (P_x) e a pressão do fluxo não perturbado (P_d), conforme fórmula a seguir:

$$C_p = \frac{P_x}{P_d}$$

É necessário medir a pressão P_x em todos os pontos de interesse para a PVN: janelas, portas, chaminés, saídas de dutos, e outros dispositivos que façam parte do sistema de ventilação natural projetado. A figura 79 apresenta um exemplo de modelo em escala, com os pontos de tomada de pressão externa (P_x) devidamente identificados.

Figura 79 . Tomadas de pressão externa em um modelo em escala (BACCHI, 2005)

Em cada ponto é feito um pequeno furo onde é colado internamente um pequeno conector, em

geral um tubo de cobre. Uma mangueira plástica de pequeno diâmetro é usada para ligar a tomada de pressão até os sensores de pressão, colocados fora do túnel de vento. As conexões devem ser feitas com cuidado, de forma a evitar vazamentos.

As fotos da figura 80 mostram algumas mangueiras ligando os pontos de tomada de pressão aos sensores de pressão. É importante identificar cada mangueira com o número da tomada de pressão.

Figura 80 . Modelo com mangueiras internas da tomada de pressão (esq) e sensores de pressão com mangueiras identificadas (dir)

Existem dois tipos de sensores de pressão utilizados em experimentos em túnel de vento.

Em ambos os casos, as leituras de pressão são diferenciais e feitas em relação à pressão atmosférica, não sendo comum o uso de pressões absolutas.

Figura 81 . Princípio de funcionamento do manômetro de coluna d'água.

O mais simples dos sensores de pressão é o manômetro de coluna com água. O túnel de vento da Engenharia Civil da POLI-USP possui um manômetro deste tipo, que consiste em um tubo transparente em formato U, preenchido com água e montado sobre uma régua ou papel milimetrado. A mangueira da tomada de pressão é ligada a uma das pontas do U, e a outra é deixada aberta,

exposta assim à pressão atmosférica. Quando o túnel entra em operação, a pressão exercida pelo vento desloca a coluna d'água, conforme demonstrado na figura 81.

A pressão diferencial, em Pascal (Pa), é calculada pelo peso da coluna d'água de altura h (m), pela fórmula:

$$P_x = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h$$

Onde ρ_{H_2O} é a massa específica da água (kg/m^3), ou do fluido utilizado, e g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Muitas vezes o manômetro é construído com a parte da leitura inclinada, de forma a facilitar a leitura da altura h . O registro da altura h pode ser feito por meio de fotografia, de forma a reduzir problemas ligados a leituras erradas e facilitar os trabalhos quando muitos manômetros são montados lado a lado.

Estes manômetros não permitem a obtenção do desvio padrão do C_p , e possuem incerteza bastante elevada uma vez que a altura h da coluna d'água deve ser lida pelo usuário.

Outra desvantagem reside no fato de grandes velocidades de vento serem necessárias para provocar pequenas elevações na coluna d'água. Um escoamento de 10m/s provocará uma elevação máxima de apenas 6mm de coluna d'água, tornando a leitura complexa em túneis que operam com baixas velocidades.

O equipamento mais indicado para a determinação de C_p é o sensor de pressão piezoelétrico.

Determinados materiais produzem uma corrente elétrica quando são submetidos a uma força que altere suas dimensões, fenômeno conhecido como efeito piezoelétrico. Os sensores que utilizam este princípio são chamados transdutores, pois transformam uma forma de energia (mecânica) em outra (elétrica). Eles são em geral dotados de cristais de quartzo, nos quais cada uma das faces é exposta a uma pressão diferente, desempenhando o mesmo papel da coluna d'água do manômetro.

Quando a pressão é aplicada, o cristal sofre um pequeno aumento de tamanho, e gera uma corrente elétrica, que é condicionada e medida. Com base em uma calibração de fábrica, a corrente medida fornece a pressão diferencial. Na figura 82 são apresentados três transdutores deste tipo.

Figura 82 . Transdutores de pressão piezoelétricos das marcas Furness, ONSET e Scanivalve. Fonte: websites dos fabricantes

Os dois primeiros (FURNESS e ONSET) possuem apenas uma tomada de pressão diferencial. São compostos de uma alimentação de energia elétrica, dois conectores para as tomadas de pressão, de um visor opcional, e de duas saídas de sinal. A precisão apresentada pelos fabricantes é de $\pm 1\%$.

As saídas de sinal fornecem a variação de tensão que permitem a leitura da pressão. Elas podem ser ligadas a um computador para o armazenamento dos dados de corrente (ou tensão) a taxas de centenas de Hz, por meio de placas de aquisição analógico-digitais (A/D), como as da figura 83, de fabricação da National Instruments.

Figura 83 . Placas de aquisição de dados analógico-digitais. À esquerda placa com alguns canais em uso, no tunel de vento da SBE. À direita, sistema de baixo custo com conexão USB da National Ins.

Estas placas são fabricadas em diversas configurações de conexão (USB, PCMCIA) e número de canais de entrada, com preço a partir de U\$170.

Transdutores como o Furness, com display e com compensação de temperatura custam U\$1.000.

O sensor da SCANIVALVE é um conjunto de 16 transdutores de pressão, com tratamento de sinal, para ligação direta no computador e cuja saída de dados já é feita em Pascals. Custa aproximadamente U\$ 7.000.

8.2.3.2 Pressão dinâmica de referência

A pressão dinâmica de referência, em geral tomada na altura do prédio, é a pressão provocada pelo escoamento não perturbado, ou seja, deve ser medida antes do fluxo atingir o modelo.

Para medir a pressão exercida pelo vento no túnel é introduzido um Tubo de Pitot, que consiste em um tubo de ponta esférica, dobrado e alinhado com o fluxo, conforme figura 84. O Tubo de Pitot é dotado de furos laterais ligados a uma segunda cavidade no interior do mesmo que permitem medir a pressão estática.

As duas tomadas de pressão são ligadas a um transdutor de pressão como os descritos anteriormente para a obtenção da pressão dinâmica (P_d).

Figura 84 . Tubo de Pitot. Acessado em 10.08.06 http://www.efunda.com/designstandards/sensors/pitot_tubes/pitot_tubes_theory.cfm

A pressão dinâmica pode também ser calculada com base na velocidade do escoamento e da massa específica do ar, que pode ser obtida medindo-se a temperatura ambiente e da pressão atmosférica. Neste caso devem ser usados um termômetro simples de mercúrio e um barômetro conforme figura 85.

Figura 85 . Termômetro e Barômetro para o cálculo da densidade do ar

A massa específica do ar (kg/m^3) é calculada com base na temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e na pressão atmosférica (mmHg) pela fórmula:

$$\rho_{\text{AR}} = \frac{P_{\text{ATM}} \cdot 135,066}{(T + 273) \cdot 286,9}$$

A pressão dinâmica P_d (Pa) é dada em função da massa específica (kg/m^3) e da velocidade do escoamento (m/s) por:

$$P_d = \frac{\rho_{AR} \cdot V^2}{2}$$

8.2.3.3 Perfil de velocidade média e de turbulência

A medição da velocidade do vento em estações meteorológicas foi vista no capítulo 6, onde foram apresentados os anemômetros de copo e ultra-sônico.

Em experimentos de túnel de vento outros sensores são utilizados para a mesma finalidade: determinar a velocidade do ar. Em túneis de grande dimensão, onde são utilizados modelos de casas em escala 1:1 é possível utilizar anemômetros ultra-sônicos, mas em túneis menores estes sensores não são adequados devido às suas dimensões.

Serão apresentadas brevemente quatro técnicas para determinar as velocidades do ar no túnel de vento: anemômetros de fio quente, anemômetros com sensores de pressão multi-furos, anemômetros por efeito Doppler a Laser e uma técnica de velocimetria por imagem.

Cada uma destas técnicas possui vantagens e desvantagens, e as infraestruturas básicas para suas aplicações estão disponíveis no país, em mais de um centro de pesquisa.

Anemômetro de fio quente

O anemômetro de fio quente é um sensor que revolucionou o estudo de turbulência e camada limite, e seu desenvolvimento data do começo do século XX. Ele mede, em uma dada direção, velocidades de poucos cm/s, com flutuações de centenas de kHz, com uma resolução espacial de até 1mm.

Figura 86 . Sonda de fio quente. À direita sondas 1D, 2D e 3D respectivamente. Acessado em 10.08.06 <http://www.dantec.dk>

A sonda é formada por um fio de tungstênio, a mesma matéria-prima usada nos filamentos das lâmpadas incandescentes, com comprimento entre 1 e 3mm e diâmetro de 5 µm. Esta sonda está conectada ao anemômetro propriamente dito, um circuito eletrônico que aquece a sonda a partir

da passagem de uma corrente elétrica. Quando a sonda é exposta ao escoamento, ela é resfriada devido a convecção, alterando a resistência térmica do filamento. Quanto maior a velocidade, maior a convecção. É com base nesta relação entre resfriamento, resistência térmica e velocidade do ar que funciona o anemômetro de fio quente. A figura 86 apresenta algumas sondas deste tipo.

A componente da velocidade medida pelo fio quente é a perpendicular ao fio. Pela combinação de dois ou três fios na mesma sonda é possível medir a velocidade em duas ou três dimensões, mas existe o risco de a presença de um fio alterar as medidas dos outros.

O anemômetro é comercializado em diversas configurações, desde os mais simples que controlam apenas uma sonda unidimensional, até conjuntos que controlam dezenas de sondas tridimensionais simultaneamente. Estes equipamentos são apresentados na figura 87.

Figura 87 . Sistemas de controle para sondas de fio quente, de fabricação Dantec. À esquerda sistema MiniCTA, para controle de uma sonda 1D, usado no túnel da SBE Nottingham. À direita, sistema para três sondas, com sistema de calibragem automático (a direita na foto) usado no IPT-São Paulo.

Em todos os casos a saída é analógica, ou seja, é necessário utilizar placas A/D para conectar o sistema a um computador.

As sondas de fio quente são bastante frágeis e têm pequena vida útil, mas podem ser reparadas utilizando um filamento de tungstênio. Algumas sondas, em especial para uso em fluidos, utilizam um filme quente ao invés de um fio, e são, portanto, mais resistentes.

As medidas com anemômetros de fio quente apresentam grande dependência da temperatura ambiente.

No túnel do IPT os anemômetros são calibrados por um sistema comercializado pela Dantec.

No túnel da SBE, os anemômetros são submetidos a uma leitura de "zero" a cada ensaio, na qual é armazenada a voltagem de saída do equipamento quando este está coberto e o túnel desligado ($v=0\text{m/s}$). Este "zero" é subtraído das leituras de voltagem do ensaio propriamente dito. A relação entre a voltagem e a velocidade é estabelecida após os ensaios por meio da seguinte técnica: a sonda é posicionada em um Venturi de 1cm^2 de seção mínima, uma bomba de ar ligada a um medidor de gás doméstico (displacement meter - U6 diaphragm gas meter) é conectada ao Venturi, o sistema é acionado durante um intervalo de tempo (5 min) e a vazão de ar é obtida pelo medidor de gás; assim

com a vazão e a área do Venturi conhecidas é possível saber a velocidade do ar na seção deste e, por fim esta velocidade é comparada com a voltagem obtida pelo anemômetro gerando uma curva de calibração. A figura 88 mostra o aparato de calibração e a curva obtida.

Figura 88 . Sistema de calibração usado na SBE – Nottingham.

Os custos dos sistemas de anemometria de fio quente são elevados. Sondas unidimensionais custam a partir de U\$100 enquanto sondas 3D custam U\$2.000. O anemômetro de um canal da Dantec (MiniCTA) custa U\$ 2400.

Existem diversos anemômetros de fio quente portáteis com display que exibe as leituras, mas seu uso em túnel de vento não é adequado pois não é possível armazenar os dados para o cálculo da turbulência. Os anemômetros portáteis possuem ajustes de temperatura automáticos ou por meio de um seletor para ajuste do "zero".

Anemômetro com sensores de pressão multi-furos

Os "Multi Holes Pressure Anemometers" são equipamentos pouco difundidos e que deverão se popularizar devido à baixa manutenção e à não necessidade de calibração frequente, principais deficiências dos anemômetros de fio quente.

Figura 89 . Sonda com múltiplos furos e esquema mostrando o ângulo sólido no qual as leituras são possíveis.

O anemômetro é similar a um Tubo de Pitot dotado de diversos furos, conforme figura 89, cada

um conectado a um sensor de pressão. Quando expostos ao escoamento, os furos são submetidos a diferentes pressões que dependem da intensidade e direção do fluxo. É possível por meio de uma regressão estabelecer a relação entre as pressões lidas e a velocidade durante o processo de calibração.

A construção da sonda é relativamente simples uma vez que não se trata de um dispositivo eletrônico, e para utilizá-la é necessário apenas um conjunto de sensores de pressão. Esta pesquisa, no entanto, não localizou nenhum exemplo de sua utilização no Brasil.

Anemometria a laser

A anemometria a laser, em geral designada pela sigla em inglês LDA – Laser Doppler Anemometry – é uma técnica para medição do campo velocidade em um escoamento com as seguintes características: pontual (somente um ponto de medição), alta resolução espacial (o volume de medição é da ordem de 1mm), não invasiva, em até três componentes espaciais e em regime transiente.

O fluido deve ser necessariamente translúcido em relação ao comprimento de onda do laser utilizado, e deve também possuir partículas em suspensão uma vez que será medida a velocidade da partícula, e não do fluido. Sendo assim, é de suma importância a correta determinação das características das partículas utilizadas. Quando não existem partículas no fluido elas devem ser introduzidas, o que limita o uso do LDA principalmente às aplicações de pesquisa.

Figura 90 . Sistema LDA tridimensional, fabricado pela Dantec. Acessado em 10.08.06 <http://www.dantec.dk>

O sistema apresenta baixa incerteza e dispensa calibração devido:

- à inexistência de componentes móveis,
- ao fato do sinal ser luminoso, não havendo problemas de impedância ou indutância,
- às medições dependerem fundamentalmente de características geométricas do sistema e do

feixe luminoso.

Um equipamento de LDA possui um laser, que é dividido em dois raios, como apresentado na figura 90. No caso da figura 90, são utilizados três pares de raios laser, um par na primeira sonda e dois pares na segunda. Cada par de lasers é responsável pela medida de uma componente da velocidade.

O par de laser é direcionado por lentes de modo que eles se cruzam, definindo assim o volume onde ocorre a medição. A sobreposição das ondas dos dois lasers no plano de medição cria um padrão de franjas claras e escuras, pela adição e subtração das ondas dos dois lasers, formando um padrão de franjas de alta e baixa intensidade. Quando uma partícula passa perpendicularmente às franjas, a luz é refletida pela partícula, ora em alta e ora em baixa intensidade, e esta oscilação é captada por uma fotocélula. A distância " d_f " entre as franjas é conhecida pois deriva das características do laser e do conjunto de lentes, e o intervalo de tempo entre as flutuações é medido pela análise do sinal da fotocélula, permitindo assim o cálculo da velocidade das partículas, como apresentado no esquema da figura 91.

Figura 91 . Esquema de funcionamento do LDA (esq) e padrão de franjas e sinal captado pela fotocélula (dir). Acessado em 10.08.06 <http://www.dantec.dk>

O custo aproximado de um sistema LDA é U\$ 100.000,00, mas o custo sofre grandes alterações em função da potência do laser e do número de componentes medidos. Não existem muitos fabricantes, sendo os principais a dinamarquesa Dantec e a americana Tsi. Os pacotes comerciais incluem todo o processamento do sinal, fornecendo dados tratados para o usuário.

Figura 92 . LDA do IPT-CMF. Laser e divisão dos raios (à esquerda), sonda de emissão do laser e leitura do sinal luminoso (ao centro) e unidade de tratamento de sinal (à direita)

A POLI-USP possui um LDA unidimensional no Departamento de Mecânica, e o IPT possui dois equipamentos de LDA: um deles é bidirecional e se encontra na Divisão de Térmica, e o outro é

unidimensional e pertence à Divisão de Mecânica dos Fluidos (IPT-CMF).

O equipamento do IPT-CMF é um LDA unidimensional modelo FlowLite, fabricado pela Dantec. Utiliza um laser HeNe de 300mW, possui uma célula de Bragg e é comumente utilizado como padrão na calibração de outros sensores, em túnel de circuito aberto. As partículas utilizadas são fumaça de glicerina.

A utilização do sistema envolve algumas dificuldades, como a definição da potência do laser (que é ajustável) e a densidade de partículas de fumaça. Outro elemento delicado é o alinhamento entre os terminais de fibra ótica que levam o laser até a sonda e o gerador do laser, pois ele deve ser feito manualmente e, se incorreto impossibilita a formação das franjas e, conseqüentemente, a leitura da velocidade.

Velocimetria por imagem

Das técnicas de velocimetria discutidas nesta seção, a utilização de imagens é a que menos se aplica aos problemas relacionados à definição de perfis de velocidade média e turbulência necessários a definição de C_p . Contudo, trata-se de uma técnica de grande utilidade em estudos em túnel de vento, e será brevemente descrita dada a disponibilidade de dois equipamentos deste tipo: um no túnel d'água do departamento de mecânica da POLI-USP e outro no IPT-CMF, desenvolvido pelos técnicos do Instituto.

Figura 93 . Esquema de funcionamento do PIV. Acessado em 10.08.06 <http://www.dantec.dk>

O PIV - Particle Image Velocimetry - é uma técnica baseada no processamento de imagem de um plano iluminado do escoamento. Um raio laser é decomposto em um plano por uma lente cilíndrica, iluminando as partículas em suspensão no fluido. Uma câmera fotográfica posicionada ortogonalmente ao plano registra duas imagens em um curto intervalo de tempo. Pela comparação da posição das partículas nas duas imagens é possível determinar seu deslocamento e, uma vez que o intervalo de tempo entre as imagens é conhecido, calcula-se a velocidade da partícula, considerada igual a velocidade do escoamento.

A figura 93 apresenta um esquema de funcionamento do PIV.

O PIV trata-se de uma técnica não intrusiva, e mede campo de velocidade de uma região em um

"instante". Como desvantagens pode-se citar: a dependência da existência ou inserção de partículas no escoamento e a baixa frequência de aquisição. Um outro problema reside no fato de assumirmos que a trajetória da partícula entre os dois instantes fotografados seja uma linha reta, o que em geral não é verdadeiro.

A exatidão dos dados obtidos depende da forma de aquisição, do processamento da imagem e da extensão da área objeto da medição. A ortogonalidade entre a câmera e plano iluminado também deve ser garantida.

O PIV clássico fornece uma medida no plano de duas componentes da velocidade, mas existem sistemas que possibilitam a obtenção das três componentes no plano de medição, pelo uso de duas câmeras, por estereoscopia. Existem também sistemas em que o plano de laser varre a altas frequências um dado volume no qual se deseja conhecer o campo de velocidade, produzindo leituras no espaço.

A figura 94 apresenta um exemplo de imagem obtida com o PIV do túnel d'água da POLI-USP, obtido em um escoamento ao redor de um cilindro.

Figura 94 . Exemplo de imagem do campo de velocidades ao redor de um cilindro (em corte), obtida com o PIV da POLI-USP, em funcionamento em um túnel d'água. (GIORIA, 2005)

8.2.4 Ensaio

A rotina e o planejamento dos ensaios para a determinação do C_p são fundamentais para garantir a qualidade dos dados obtidos. Uma vez posicionada a maquete no túnel, deve-se realizar um teste para garantir a estanqueidade das mangueiras das tomadas de pressão.

Deve-se então proceder aos testes e calibrações de cada instrumento a ser utilizado, como a calibração e leitura dos "zeros" de anemômetros de fio quente, o alinhamento do laser no caso do uso de LDA, ou a leitura dos "zeros" no caso de transdutores de pressão sem compensação de temperatura.

Uma vez que o túnel é acionado, são medidos os perfis de velocidade média e turbulência, com base em tomadas em diferentes alturas.

A velocidade deve ser definida com base nos estudos de similaridade, mas é indiferente no caso de modelos de arestas vivas. Nestes casos o ensaio deve ser repetido em três velocidades diferentes, para garantir a independência de Re .

Uma vez medidos os perfis é realizada a tomada de pressão nos pontos de interesse (janelas e afins).

O modelo é então rotacionado, e o processo é reiniciado para a determinação de C_p em uma nova direção de incidência do vento..

As direções para as quais o valor de C_p será determinado varia bastante na bibliografia, sendo encontrados casos com grandes intervalos (a cada 45°) assim como estudos mais detalhados (a cada 5°). Como demonstrado no início deste capítulo, variações encontradas entre tomadas com 5° de diferença na incidência do vento podem provocar variações significativas quando a intensidade do vento é reduzida. Contudo, o custo do ensaio é proporcional ao número de direções ensaiadas. Valores estimados de ensaios em túnel de vento para determinação de cargas de vento são da ordem de R\$30.000,00, mas a precificação deste tipo de serviço não segue regras muito claras, apresentando grandes variações em função das especificidades do ensaio.

Na PVN, os valores de C_p para ângulos não ensaiados são obtidos por interpolação. Pela comparação de dados interpolados e medidos é possível estimar o impacto desta prática em um dado modelo, e assim avaliar a necessidade de uma discretização mais refinada da direção de incidência do vento nos ensaios.

Findos os ensaios, é conveniente repetir alguns experimentos de forma a garantir a repetibilidade dos resultados.

De forma a exemplificar a obtenção de C_p , serão descritas algumas características dos ensaios realizados para esta pesquisa no túnel da SBE.

O modelo ensaiado foi o de um paralelepípedo, com planta de 25x50cm, e altura de 20cm, dotado de uma chaminé curta na cobertura.

Figura 95 . Modelo para a determinação de C_p utilizado no túnel da SBE

Foram utilizadas duas tomadas de pressão: uma na chaminé e outra na face oposta a da chaminé

(pressure tapping), conforme apresentado na figura 95. A figura 88 apresenta a chaminé usada, e a posição da tomada de pressão.

O intervalo de duração da tomada de pressão foi de 34,1 s, e os dados foram adquiridos a uma frequência de 30Hz. Foram utilizados dois transdutores de pressão (Furness FC044, +/-20 Pa), medindo simultaneamente a pressão nos dois pontos em relação a uma pressão de referência.

Foram realizados aproximadamente 20 testes, para determinar C_p para os ângulos de incidência do vento de 0° , 90° e 180° . Cada teste era iniciado com leituras dos zeros dos transdutores de pressão, por 34,1s. Imediatamente a seguir eram realizadas as tomadas de pressão.

A pressão dinâmica foi medida por um tubo de Pitot fixo na entrada da seção de testes do túnel. Não foram medidos perfis de velocidade ou turbulência devido a falta de um robô cartesiano que permitisse o correto posicionamento do sensor.

Os gráficos das figuras 96 e 97 apresentam os resultados de C_p obtidos em função da velocidade do vento no túnel na altura de referência, onde o Tubo de Pitot foi posicionado.

Figura 96 . Relação entre o C_p da chaminé e a velocidade do vento no túnel

Figura 97 . Relação entre o C_p da abertura e a velocidade do vento no túnel

A despeito de o modelo possuir arestas vivas, é possível notar a dependência dos resultados em relação ao número de Reynolds do edifício, no qual a altura do edifício é tomada como dimensão de comprimento de referência, e a velocidade utilizada é a do vento não perturbado.

Nota-se na figura 97 que a velocidade $U=4,5\text{m/s}$ define o Re crítico, a partir do qual o valor de C_p é independente de Re . Os valores da tabela 7 foram obtidos com $U=5\text{m/s}$.

direção	C_p opening	C_p stack
90	-0,03	-0,11
0	0,34	-0,70
180	0,18	-0,59

Tabela 7 . Valores de C_p obtido em ensaio de túnel de vento da SBE

8.2.5 Apresentação dos resultados

O exemplo de resultado de ensaio em túnel de vento como na tabela 7 não apresenta diversos dados importantes para a PVN, como:

- Descrição do túnel
- Descrição do modelo, blocagem, posicionamento das tomadas de pressão
- Perfis de Velocidade média e turbulência
- Data e Hora dos ensaios
- Condições ambientais, tais como pressão atmosférica e temperatura do ar
- Duração e frequência de aquisição de dados dos ensaios
- Equipamentos utilizados
- Tabelas com as médias e desvios padrão das leituras

A incerteza padronizada dos ensaios deve ser calculada e fornecida. Deve-se levar em consideração as diversas incertezas de calibração de cada equipamento, a dispersão das medidas e outros fatores, conforme descrito no Guia de Expressão de Incerteza do INMETRO.

8.3 Coeficientes de pressão por simulação de CFD

Quando a definição de C_p por meio de túnel de vento não for possível, a dinâmica dos fluidos computacional, mais conhecida pela sigla em inglês CFD, oferece uma alternativa para a simulação do escoamento ao redor dos edifícios e a obtenção de C_p .

ANDERSON (1995) coloca em termos simples a essência do CFD quando salienta que "no termo 'dinâmica dos fluidos computacional' a palavra 'computacional' é um simples adjetivo de 'dinâmica dos fluidos'".

O CFD se utiliza basicamente de três leis da Física (ANDERSON,1995):

- a. Princípio de conservação de massa
- b. A segunda lei de Newton: $F = m \cdot a$
- c. Princípio da conservação de energia

As equações que descrevem estas três leis, em geral, agrupadas sob a denominação "equações de Navier-Stokes", são brevemente descritas na seção 8.3.1 e se tratam de equações diferenciais parciais, cuja resolução analítica, e por consequência exata, não é conhecida para a maior parte dos casos reais. Uma forma de encontrar soluções aproximadas para tais equações consiste em substituir cada um dos termos por relações algébricas aproximadas e, neste processo, parte da física descrita pelas equações se perde. A transformação das equações diferenciais parciais em relações algébricas simplificadas é exemplificada na seção 8.3.2, usando o método de diferenças finitas.

O escoamento é composto por milhares de pequenas porções fluidas, cuja interação obedece as equações Navier-Stokes. Para resolvê-las adequadamente, seria necessário aplicá-las a cada uma destas pequenas porções fluidas, de forma a representar a continuidade encontrada no escoamento. Esta técnica é chamada DNS - Direct Numerical Simulation - e só foi aplicada a escoamentos muito simples, pois a capacidade computacional requerida é enorme. Uma vez que a DNS não é viável devido à capacidade dos computadores existentes atualmente (STATHOPOULOS apud YANG, 2004), as equações são aplicadas a pontos dispersos no espaço. A escolha destes pontos é chamada discretização, e como produto dessa escolha é definida uma malha de pontos (ou volumes) para os quais a solução das equações será calculada. A geração de malha é abordada na seção 8.3.3.

Uma consequência do uso de malhas espaçadas ao invés da DNS é que a solução das equações não reproduz os efeitos da turbulência no escoamento. A ocorrência da turbulência se deve à interação entre as porções fluidas que é suprimida quando se utiliza uma malha espaçada. Para solucionar este problema foram desenvolvidos diversos modelos de turbulência que propõem outras equações para descrever que ela produz no escoamento. Os modelos de turbulência são tratados na seção 8.3.4.

Na seção 8.3.5 são fornecidas orientações quanto às características do modelo do edifício a ser usado na simulação.

Sendo as equações de Navier-Stokes, as mesmas para todos os fluidos, o que diferencia a solução obtida para diferentes escoamentos é o conjunto de condições de contorno fornecido, ou seja: as fronteiras sólidas (lisas, rugosas, estáticas, móveis); e o vento - direção, intensidade e turbulência. As condições de contorno são tratadas na seção 8.3.6.

Na seção 8.3.7 é discutida a capacidade da malha em reproduzir as características da camada limite junto às fronteiras sólidas no modelo.

A seção 8.3.8 trata da convergência e da estabilidade na solução das equações, que é feita por meio de um processo iterativo.

Existem diversos softwares comerciais de CFD, tais como o CFX(ANSYS), FLUENT, FLOWVENT, VORTEX, PHOENICS (CHEM), STAR-CD e gratuitos como o FDS (NIST). Todos são construídos sobre a mesma base conceitual, diferindo particularmente em relação à interface. Nos softwares comerciais a documentação é excelente.

Nesta pesquisa, o software CFX foi adotado para a produção dos exemplos, mas outros softwares apresentam basicamente as mesmas opções e é possível estender as colocações das próximas seções a outros softwares.

Cabe ressaltar que a teoria na qual está baseado o CFD data, em sua maioria, da primeira metade do século passado, sendo de amplo conhecimento e podendo ser implementada por meio de programação básica, conforme descrito em livros introdutórios como ANDERSON (1995) e FORTUNA (2000).

8.3.1 Equações de conservação de massa, momento e energia

As equações de Navier-Stokes descrevem as conservações de massa, momento e energia no escoamento. Quando da utilização de um software comercial de CFD, estas equações são manipuladas e simplificadas para obter uma solução aproximada do escoamento, e muitas das opções colocadas à disposição do usuário dizem respeito aos termos presentes em cada equação.

Assim sendo, faz-se necessário compreendê-las para utilizar o software de CFD de maneira consciente e responsável, pois a documentação deste parte do princípio que o usuário domina esta teoria.

Está demonstrada a seguir a obtenção da equação de conservação de massa, com o intuito de exemplificar a dedução e notação utilizada em tais equações. A demonstração das demais equações pode ser encontrada em ANDERSON (1995).

Na figura 98 é apresentado um volume de controle na forma de um paralelepípedo de lados dx , dy e dz .

Figura 98 . Volume de controle de dimensões dx , dy e dz

A massa que entra neste volume de controle em cada uma das três componentes do espaço (x,y,z) é igual a velocidade do escoamento para cada componente (u,v,w) vezes a área de cada uma das faces de entrada $(dy.dz, dx.dz, dx.dy)$ vezes a massa específica do ar (ρ) , como mostra a figura 99.

Figura 99 . Vazão mássica que entra no volume de controle

A seguir é apresentado um exemplo deste raciocínio fazendo uso das unidades destas grandezas.

Se a velocidade é dada em m/s e a área das faces em m^2 tem-se, pelo produto da velocidade pela área, a vazão em m^3/s . O produto da vazão (em m^3/s) pela massa específica (em kg/m^3) resulta na massa que entra no volume na unidade de tempo (em kg/s).

A massa que deixa o volume de controle pode ser calculada de maneira semelhante, contudo deve-se notar que as velocidades (u,v,w) podem sofrer alterações no interior do volume de controle, assim como a massa específica do ar (ρ) .

Tome-se, por exemplo, a velocidade do escoamento na componente y.

A velocidade com a qual o fluido entra no volume de controle é v, e o fluido deve atravessar o volume de controle, cuja extensão é dy para sair pela face oposta à de entrada.

Para que se possa determinar a velocidade de saída do fluido é necessário conhecer de que maneira a velocidade sofre alterações no percurso dy, ou seja, a derivada da componente v da velocidade na direção y:

$$\frac{\partial v}{\partial y}$$

A expressão anterior pode ser lida como a taxa de variação da velocidade v para cada unidade de y percorrida, que pode ser positiva (aceleração) ou negativa (desaceleração).

Assim, ao longo do percurso dy, a velocidade sofrerá uma aceleração (ou desaceleração) total de:

$$\frac{\partial v}{\partial y} dy$$

A seguir é exemplificada esta relação com valores numéricos, no caso apenas para a componente y:

Seja a velocidade de entrada $v = 20\text{m/s}$, a dimensão do volume de controle $dy = 3\text{m}$ e a taxa

de variação da velocidade v no sentido y de $\frac{\partial v}{\partial y} = 0,1 \frac{\text{m/s}}{\text{m}}$, a variação na velocidade na saída do volume de controle será:

$$\frac{\partial v}{\partial y} \cdot dy = 0,1 \cdot 3 = 0,3\text{m/s}$$

Como a velocidade na saída do volume de controle é o valor de interesse, deve-se somar a variação calculada anteriormente com a velocidade na entrada v , sendo então a fórmula da velocidade na saída do volume de controle:

$$v + \frac{\partial v}{\partial y} dy$$

Assim a velocidade de saída será: $20 + 0,3 = 20,3 \text{ m/s}$

O mesmo raciocínio pode ser estendido às variações na massa específica, assim como para as demais componentes da velocidade. A figura 100 apresenta as fórmulas para o cálculo da massa que deixa o volume de controle:

Figura 100 . Vazão mássica que sai do volume de controle.

A vazão mássica líquida em cada uma das componentes pode ser obtida pela subtração da massa da saída pela da entrada, como apresentado nas expressões a seguir:

Vazão mássica líquida na direção x:

$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dy dz - (\rho u) dy dz = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dy dx dz$$

Vazão mássica líquida na direção y:

$$\left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx dz - (\rho v) dx dz = \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy dx dz$$

Vazão mássica líquida na direção z:

$$\left[\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz \right] dx dy - (\rho w) dx dy = \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dy dx dz$$

Se a massa deve ser conservada, a soma das parcelas que entram e deixam o volume de controle deve ser igual a zero.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dy dx dz + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy dx dz + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dy dx dz = 0$$

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \cdot dy dx dz = 0$$

Na multiplicação anterior um dos termos deve ser igual a zero, e sabe-se que o volume de controle $dy \cdot dx \cdot dz > 0$, logo:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

A equação anterior é uma forma de exprimir a conservação de massa para um volume de controle fixo no espaço em regime permanente.

A partir da equação pode-se concluir que o tamanho do volume de controle não afeta a conservação de massa, assim como a velocidade ou a massa específica que entram no volume de controle. A conservação de massa diz respeito basicamente às variações que ocorrem durante o percurso do fluido no interior do volume de controle, ou seja, as derivadas parciais.

A equação anterior não considera a possibilidade da massa específica no interior do volume de controle variar com o tempo, aumentando ou diminuindo. A fórmula a seguir apresenta a taxa de variação da massa específica com o tempo para o volume de controle:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} dy dx dz$$

Se ocorrer variação na massa específica no interior do volume de controle, esta massa (retida ou expelida) deve ser contabilizada no balanço das parcelas que entram e deixam o volume de controle. Assim, a equação de conservação deixa de ser igual a zero, e passa a ser igual à variação no volume de controle com o tempo:

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \cdot dy dx dz = -\frac{\partial \rho}{\partial t} dy dx dz$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0$$

Onde o termo entre colchetes pode ser representado pelo operador ∇ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

A equação anterior é a equação de conservação de massa em regime transiente.

Em diversos problemas de ventilação pode-se considerar que a massa específica não varia com o tempo, assumindo-se assim o escoamento incompressível e adotando a Aproximação de Boussinesq, que permite desprezar as variações da massa específica nos termos que não tenham ligação com as forças de empuxo. (ETHERIDGE e SANDBERG, 1996)

Neste caso a equação de conservação de massa em regime permanente fica restrita a:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

As simulações de CFD podem ser feitas em regime permanente, no qual um único campo de valores para as variáveis é calculado, ou em regime transiente. A simulação em regime transiente só se justifica no caso do uso de LES, conforme descrito na seção 8.3.4.

8.3.2 Diferenças finitas

Conforme exposto na seção anterior, a resolução das derivadas parciais é a chave para as equações que governam o escoamento.

A seguir é apresentado o conceito de diferenças finitas para a solução aproximada de tais derivadas, pois esta baliza a tomada de decisão em relação à ordem de precisão das discretizações a utilizar. (ANDERSON, 1995)

A base para a solução aproximada das derivadas parciais é a chamada Série de Taylor.

Tome-se o gráfico a seguir:

Figura 101 . Ilustração do comportamento dos primeiros três termos da Série de Taylor

A Série de Taylor estabelece que o valor de $f(x+\Delta x)$ pode ser obtido por meio de uma série infinita conforme a descrita na equação a seguir:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots$$

A série mostra que é possível estimar o valor de $f(x+\Delta x)$ pelo uso de sucessivas derivadas: quanto mais termos da série forem utilizados melhor será a aproximação.

No gráfico da figura 101 são representadas as estimativas de $f(x+\Delta x)$ obtidas com a Série de Taylor. O ponto 2 é a resposta correta. O ponto 3 é obtido pelo uso apenas do primeiro termo da série e é uma aproximação imprecisa do resultado verdadeiro. O ponto 4 é obtido usando os dois primeiros termos da série e o ponto 5 é obtido com o uso dos três primeiros termos da série. Vê-se que o ponto 5 constitui uma boa aproximação do valor correto.

Será apresentada agora a aplicação da Série de Taylor à componente da velocidade u . Pode-se estimar a velocidade no ponto $i+1$ do escoamento com base na velocidade no ponto i e as derivadas sucessivas.

$$u_{i+1,j} = u_{i,j} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j} \Delta x + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots$$

Se a primeira derivada for isolada, obtém-se uma expressão algébrica (diferença finita) que permite estimar o valor da derivada com base nas velocidades dos pontos i e $i+1$, e um conjunto de termos a ser desprezado (erro de truncamento):

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j} = \underbrace{\frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x}}_{\text{diferença finita}} + \underbrace{\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{i,j} \frac{(\Delta x)}{2} + \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^2}{6} + \dots}_{\text{erro de truncamento}}$$

Voltando à equação de conservação de massa, nota-se que é possível obter uma aproximação do seu resultado substituindo a derivada pela expressão algébrica deduzida anteriormente. A obtenção da solução para o conjunto de pontos do escoamento é uma tarefa mais complexa.

É importante destacar que a capacidade da diferença finita obtida em fornecer uma aproximação do resultado real depende da quantidade de termos que são utilizados na sua construção e da quantidade de termos desprezados como erros de truncamento.

No exemplo, desprezam-se os termos em (Δx) e superiores. Diz-se então que esta diferença é de primeira ordem, sendo a ordem o menor expoente de (Δx) desprezado. Existem formas de manipular as Séries de Taylor e obter diferenças finitas de diversas ordens.

Quanto maior a ordem de uma diferença finita, melhor a representação dos fenômenos físicos pelas equações algébricas obtidas.

Contudo, quanto maior a ordem da discretização, mais instável é o processo iterativo de solução das equações.

De forma geral, aconselha-se usar sistemas de primeira ordem para estudos iniciais de um problema (como testes do modelo e da malha), mas apenas utilizar resultados produzidos com discretizações de segunda ordem. (CFX, 2003) (COST, 2004)

8.3.3 Malha

Conforme descrito na introdução desta seção, a solução das equações de Navier-Stokes é feita apenas em pontos/volumes discretos do volume de controle.

Este conjunto de pontos é chamado malha e sua definição é fundamental para o sucesso de uma simulação de CFD. A simulação de CFD deve buscar independência do resultado obtido em relação à densidade da malha adotada. Para assegurar esta independência, deve-se proceder sempre a um teste de refinamento da malha e comparação dos resultados: a malha deve ser tal que o seu refinamento não cause alteração significativa do resultado encontrado. (COST, 2004)

O principal sintoma apresentado por uma malha "grossa", ou seja, não refinada o suficiente para garantir independência, é a dificuldade na simulação em atingir resíduos adequados – tema abordado na seção 8.3.8.

A quantidade de elementos da malha é o parâmetro que define a demanda computacional de uma simulação. HARRIES (2005) aponta para a necessidade de 0.5Gb de memória RAM para cada 1 milhão de células na malha. Diante disto, a definição da malha se configura um processo iterativo no qual qualidade da malha e a capacidade de processamento disponível atuam em direções opostas.

Quanto aos tipos de malhas, elas podem ser estruturadas (apresentam uma regularidade na distribuição dos elementos) ou não estruturadas.

Figura 102 . Exemplo de malha estruturada e não estruturada

COST (2004) fornece uma série de orientações para a definição da malha em simulações de engenharia de ventos. Estas orientações são listadas a seguir.

Áreas com elevados gradientes, como as próximas a arestas vivas e outros pontos de descolamento da camada limite, devem receber uma malha mais refinada, e o fator de expansão entre células

contíguas deve ser inferior a 1,3.

Deve-se dar preferência a malhas estruturadas formadas por hexaedros, em detrimento das formadas por tetraedros. No caso do uso de malhas com tetraedros, como é o caso do CFX, deve-se utilizar uma base de células prismáticas em todas as fronteiras sólidas. No CFX esta base é chamada "inflated boundary". A distância a ser usada na primeira célula é tratada na seção 8.3.7.

No caso do uso de fronteiras sólidas rugosas, a primeira célula deve estar acima da altura da rugosidade especificada.

Uma sugestão para a dimensão máxima das arestas das faces dos edifícios pode ser obtida dividindo-se a raiz cúbica do volume do edifício por 10, ou em outras palavras, garantir que cada face seja dividida ao menos em 10 x 10 células. No CFX, é possível estabelecer dimensões específicas para as células das faces do edifício, por meio do uso de "mesh controls".

A malha deve conter ao menos dez células entre edifícios vizinhos.

As recomendações apresentadas visam estabelecer parâmetros mínimos para a malha, cuja independência dos resultados deve ser verificada invariavelmente. A figura 103 apresenta uma malha obtida após o processo de refinamento e teste de independência.

Figura 103 . Malha após refinamento

8.3.4 Modelos de turbulência

Conforme descrito na introdução da seção 8.3, o uso de malhas espaçadas impede que as equações de Navier-Stokes reproduzam por si só a turbulência em um escoamento. Seria necessário adotar malhas absurdamente refinadas para que a turbulência fosse obtida somente pelo uso das equações de Navier-Stokes, numa técnica chamada de DNS.

Na figura 104 vê-se um exemplo de simulação com DNS, no qual a transição laminar-turbulento de um escoamento sobre uma placa foi estudada. Nota-se que a turbulência apresenta seu típico comportamento tridimensional, aleatório e não simétrico.

Figura 104 . Simulação com DNS com resultados para 3 valores de Re

Devido à impossibilidade no uso de DNS faz-se necessário utilizar modelos matemáticos que forneçam as características da turbulência na simulação. Na figura 105 é apresentada uma hierarquia das diferentes técnicas que permitem a simulação da turbulência em um experimento de CFD.

Descartado o uso de DNS, a melhor alternativa em termos de qualidade na simulação da turbulência é o LES, porém COST (2004) alerta que seu uso em estudos não acadêmicos ainda não é factível dada grande a capacidade de processamento necessária. O uso das simulações com LES apresenta algumas desvantagens do ponto de vista prático: a demanda computacional é grande e a simulação deve ser feita em regime transiente, o que exige o posterior tratamento dos resultados. Contudo, a fidelidade das simulações com LES em relação a dados coletados experimentalmente é descrita como sendo bastante superior às dos demais modelos de turbulência por todas as referências consultadas. (CFX, 2003) (COST, 2004) (HARRIES, 2005)

Figura 105 . Hierarquia das técnicas para o tratamento da turbulência em CFD

Todos os demais modelos de turbulência são obtidos por meio da aplicação da média de Reynolds às equações de Navier-Stokes, e são chamados de modelos RANS. Os modelos RANS podem ter diferentes níveis de sofisticação. Um tratamento mais sofisticado envolve seis equações adicionais para descrever a turbulência, e caracteriza os chamados modelos de fechamento de segunda ordem. COST (2004) aconselha para simulações de escoamentos ao redor de edifício o uso preferencial de modelos de fechamento de segunda ordem, como o RSM – Reynolds Stress Model, pois a turbulência é tratada separadamente em cada direção.

Os modelos de turbulência de primeira ordem utilizam apenas duas equações para descrever a turbulência. Esta simplificação permite que as simulações sejam muito mais rápidas, mas a qualidade da simulação diminui, pois a turbulência é considerada igual em todas as direções. No caso do uso de modelos de fechamento de primeira ordem devido à falta de recursos computacionais, COST (2004) aconselha evitar o uso do modelo standard k- ϵ , dando preferência ao RNG k- ϵ .

Como referência adicional às apresentadas nesta seção, as notas de aula da disciplina AGM 5804 do IAG-USP constituem um material bastante didático com relação à obtenção das equações para fechamentos de primeira e segunda ordem.

8.3.5 Característica do modelo para simulação

O nível de detalhe do modelo do edifício a ser utilizado no experimento de CFD deve ser proporcional à sua proximidade da área de interesse. Desta forma, detalhes de 10cm podem ser relevantes se estão situados na parede onde os C_p serão calculados, mas não devem ser modelados se estão em outras áreas do edifício.

A extensão do entorno deve seguir as orientações formuladas para os ensaios em túnel de vento e a blocagem não deve ser superior a 3%. (COST, 2004)

O volume do espaço para o qual o escoamento será resolvido é chamado domínio.

A dimensão do domínio deve ser tal que não se faça sentir nas fronteiras a presença do edifício.

Assim, COST (2004) recomenda que as seguintes relações sejam adotadas tendo como parâmetro a altura do edifício – H:

- Distância da entrada, laterais e topo: 5H de qualquer obstáculo.
- Distância da saída – 15H de qualquer obstáculo.

Estas distâncias estão representadas na figura 106 para dois formatos de domínio: paralelepípedo e "circular".

A distância a sotavento foi representada na figura anterior como 10 a 15H, pois STRAW (2000) utiliza esta distância. A conferência da adequação da distância livre a sotavento será discutida na próxima seção, assim como a escolha do formato do domínio.

Com relação à modelagem do edifício e do domínio, cabe salientar que o volume do edifício não

faz parte do domínio, uma vez que não será modelado o escoamento dentro dele. A modelagem para uso no CFX pode ser feita no software AUTOCAD, subtraindo do domínio o volume sólido do edifício.

O domínio "circular" pode ser modelado como um cilindro ou um prisma de base octogonal, sendo este último recomendado no caso de softwares de modelagem sem muitos recursos, como o AUTOCAD.

Figura 106 . Parâmetros para a definição das dimensões do domínio

8.3.6 Condições de contorno

As condições de contorno desempenham um papel fundamental na solução de equações diferenciais parciais, como é o caso das equações de Navier-Stokes. Entende-se por condição de contorno as restrições que são aplicadas ao escoamento em cada uma das fronteiras do espaço a ser simulado, o chamado domínio.

Existem diferentes maneiras de configurar as condições de contorno para uma mesma geometria de edifício que apresentam vantagens e desvantagens, exemplificadas a seguir.

Pode-se classificar as condições de contorno em dois grupos principais: "paredes" e "aberturas".

É chamada parede toda fronteira que não permite entrada e saída de fluidos no domínio. As paredes do edifício a ser simulado e o piso do modelo são sempre classificadas como paredes. O teto e as bordas laterais do domínio também podem ser classificados como paredes, como que reproduzindo o escoamento em um túnel de vento.

As paredes podem ser classificadas como sem escorregamento (no slip) ou com escorregamento (free slip). Esta classificação permite dar tratamento diferenciado às paredes "reais", como as do edifício e do piso – sem escorregamento, e as paredes "para fins de simulação", como o teto e as bordas laterais do domínio – com escorregamento.

Em paredes reais vale a condição de não escorregamento, que estabelece que as partículas fluidas aderem à fronteira sólida, e assim a velocidade do fluido neste ponto é igual a zero. Em fronteiras deste tipo será criada uma camada limite devido ao arrasto provocado pela presença da fronteira sólida.

Nas fronteiras classificadas como "com escorregamento", o fluido não adere ao sólido e não há camada limite. Esta condição minimiza os efeitos da presença daquela fronteira na simulação, o que é ideal para o teto e as bordas laterais do domínio.

No caso de "paredes sem escorregamento", faz-se necessário definir a sua rugosidade, pois esta afeta o arrasto provocado pela parede e a camada limite que se formará devido a sua presença. A parede pode ser definida como lisa (smooth) ou rugosa (rough).

De maneira geral, os edifícios da simulação podem ser considerados como lisos, e COST (2004) recomenda que o piso na área onde estão os edifícios seja modelado desta forma.

O piso das áreas a barlavento e sotavento deve ser modelado como rugoso para que o perfil de velocidades, utilizado como condição de contorno, se mantenha por todo o domínio. É essencial dar atenção para a estreita relação entre a altura da rugosidade e a distância entre a parede e o primeiro nó da malha, que deve estar localizado a uma distância maior do que a altura da rugosidade adotada.

As fronteiras pelas quais o fluido irá entrar e deixar o domínio podem ser configuradas de três formas distintas: entradas (inlet), saídas (outlet) e aberturas (opening).

Na seção anterior foram apresentados dois formatos de domínio passíveis de uso em CFD. No caso de domínios em forma de paralelepípedo, uma das faces é definida como entrada, a qual é atribuída uma velocidade U , e a face oposta é definida como saída, a qual é atribuída uma pressão estática de 0 Pa. As faces laterais são definidas como paredes com escorregamento. A figura 107 apresenta estas orientações.

O valor da variável U deve ser calculado para cada altura, obedecendo aos perfis indicados na seção 6.1.9 e modificados pelas correções do capítulo 7. Em geral adota-se um perfil logarítmico correspondendo a CLP neutra, sem qualquer correção de caráter topográfico ou de rugosidade. No CFX a forma mais adequada de configurar este perfil é por meio de um arquivo CCL, e da inicialização via arquivo BAT. Um exemplo de arquivo CCL é fornecido no relatório de simulação no anexo 1, e os arquivos produzidos durante as atividades desta pesquisa de mestrado se encontram no CD anexo.

Figura 107 . Condições de contorno para duas formas de domínio possíveis.

São duas as vantagens do domínio paralelepípedo. A primeira diz respeito ao volume do domínio, que é aproximadamente 50% menor que o domínio circular, e assim, por ter menos células, a simulação é mais rápida.

A segunda vantagem diz respeito à definição da saída do escoamento como outlet com pressão igual a zero. Esta configuração permite que o escoamento seja resolvido também na saída. Como a resposta nesta fronteira não é imposta, e sim calculada pelo CFD, é possível comparar o perfil imposto na entrada com o calculado na saída. Uma boa simulação deve apresentar o mesmo perfil na saída do modelo, e caso isto não ocorra os parâmetros utilizados devem ser revistos. Este teste permite, por exemplo, determinar se a distância livre a sotavento é adequada.

A principal desvantagem do domínio paralelepípedo é o trabalho envolvido na simulação de diferentes direções de incidência do vento. Para cada direção deve ser feita uma nova modelagem do domínio, uma nova malha e uma nova configuração das condições de contorno.

O domínio circular é usado justamente para sanar este problema, pois as mesmas modelagem e malha são usadas para simular qualquer direção do vento. Para tanto, as laterais do domínio são configuradas como aberturas, às quais é atribuída uma velocidade nas componentes cartesianas x, y, z .

A velocidade na direção z é igual a zero, e as outras componentes são dadas em variáveis $u1$ e $v1$, cujo valor é definido, no caso do CFX, no arquivo CCL.

Assim, é possível alterar a direção do vento apenas pela edição do arquivo CCL. O modelo de arquivo CCL apresentado no anexo 1 foi produzido para uso em simulações de domínio circular.

As desvantagens desta forma de simulação são o maior número de células e a imposição do perfil de velocidade na saída do modelo, mascarando os efeitos de distâncias a sotavento inadequadas.

A seguir são apresentados dois domínios de simulações de CFX usando as formas de domínio, obtidas com as condições de contorno no CFX-PRE.

Figura 108 . Domínios com condições de contorno

Uma alternativa em relação à forma do domínio é a utilização de um cilindro no interior de

um paralelepípedo, conforme utilizado por STANGROOM (2004). Esta configuração tira partido da capacidade de alguns softwares de CFD, incluindo o CFX, de modelar elementos em rotação, uma capacidade pensada para a simulação de turbomáquinas.

A configuração deste tipo de simulação envolve complicações adicionais, mas permite utilizar domínios menores, em diversas direções com uma mesma malha.

Figura 109 . Utilização de um sub-domínio cilíndrico dentro de um domínio retangular (STANGROOM, 2004)

Em qualquer das formas de domínio utilizadas, a turbulência deve ser fornecida juntamente à velocidade. No CFX, não é possível fornecer um perfil de turbulência, pode-se apenas informar níveis de turbulência (1, 5 ou 10%). No caso do uso de modelos de turbulência anisotrópicos, como o RSM, a turbulência na fronteira deve ser isotrópica, prejudicando o uso destes modelos. Nas simulações foi utilizado o valor padrão do software: turbulência de 5%.

8.3.7 Tratamento das fronteiras sólidas

Um aspecto fundamental de uma simulação de CFD bem sucedida é sua capacidade de representar os fenômenos na camada limite. Para tanto, o posicionamento dos pontos da malha próximos às fronteiras sólidas deve ser compatível com o fluido e com o gradiente de velocidades presentes na simulação.

O número adimensional y^+ (no CFX tratado por Yplus) é um parâmetro que descreve a relação entre:

- a distância do primeiro ponto da malha até a fronteira sólida,
- a tensão provocada pelo escoamento nesta fronteira,
- a massa específica e
- a viscosidade do fluido.

A definição de y^+ é:

$$y_+ = \frac{\rho \cdot \Delta y \cdot u^*}{\mu}$$

Onde:

ρ – massa específica

Δy – distância do primeiro ponto da malha até a parede

u^* – velocidade de atrito

μ – viscosidade dinâmica

O valor de y^+ é um dado de saída da simulação, não podendo ser fixado a priori, pois é calculado com base no u^* , uma incógnita na simulação.

Segundo a documentação do CFX, considerando-se o uso do modelo de turbulência $k-\varepsilon$, o valor de y^+ deve estar entre 20 e 100. COST (2004) aconselha um valor de pelo menos 30 para y^+ .

8.3.8 Convergência

A solução de uma simulação de 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 de cálculos sucessivas tendem a diminuir.

As simulações de CFD são programadas em geral para atingir certos níveis de convergência ou parar após um certo número de iterações caso a convergência desejada não seja alcançada, sendo assim fundamental checar qual a causa do término da simulação.

COST (2004) aconselha que o RMS obtido na simulação seja igual ou inferior a 10^{-4} , enquanto CFX (2003) indica que resíduos acima de 10^{-4} , são muito pouco confiáveis, e servem apenas para fornecer uma idéia superficial sobre o escoamento e “produzir imagens bonitas”.

Conforme exposto anteriormente, problemas na qualidade da malha são grandes responsáveis por baixos níveis de convergência. CFX (2003) aconselha a realização de experimentos buscando diferentes níveis de convergência, de forma a compreender de que maneira estes níveis afetam os resultados desejados na simulação.

8.3.9 Cálculo de C_p com base em simulação de CFD

Uma vez simulado o escoamento ao redor do edifício, o cálculo de C_p é realizado de maneira similar ao calculado com dados de túnel de vento.

No caso do uso do CFX, deve-se definir pontos no CFX-POST nos locais de interesse para a PVN, tais como janelas e afins. Usa-se então o comando exportar para obter as pressões em cada um dos pontos.

Um ponto deve ser posicionado no fluxo não perturbado antes do edifício, para obter os dados de

velocidade e massa específica com os quais a pressão dinâmica é calculada.

De posse destes valores calcula-se o C_p para os pontos de interesse.

8.3.10 Exemplo de aplicação de CFD

Com o objetivo de explorar a ferramenta de CFD escolhida para diversas simulações necessárias a esta pesquisa, o software CFX, foram realizadas algumas simulações para a determinação dos coeficientes de pressão em edifícios em diferentes situações.

A modelagem do edifício foi feita com o software AUTOCAD, e exportada em formato IGES para o CFX, pelo uso do software RHINO.

Como objeto das simulações, escolheu-se um tipo de edifício comumente encontrado nas cidades brasileiras, o edifício com planta H usado nos conjuntos habitacionais de interesse social. Nas simulações com entorno, utilizou-se o projeto de um conjunto habitacional no município de Guarulhos, o Residencial Nova Petrópolis 2.

Foram adotados os critérios definidos por COST (2004) para a definição do tamanho do domínio, resolução do modelo e outros parâmetros.

As simulações foram processadas em computadores do LABAUT FAU-USP, com processador Pentium de 2 Ghz e 500 ou 1.000Mb de memória RAM. Algumas simulações planejadas não puderam ser realizadas devido à falta de capacidade de processamento das máquinas, como as que envolviam grandes extensões de entorno. O processamento em paralelo, que seria a melhor solução para problemas de falta de capacidade de processamento, não foi utilizado a devido a dificuldades enfrentadas na configuração do software.

Foram realizadas 86 simulações de forma a explorar um conjunto de parâmetros relevantes em simulações de CFD, e que permitiram reproduzir conclusões comumente encontradas na bibliografia.

Em particular, estudou-se o comportamento do modelo face às seguintes alterações:

- direção de incidência do vento,
- perfil de velocidades médias na entrada e saída do modelo,
- rugosidade no piso do modelo (entorno do edifício),
- resolução da malha utilizada na simulação,
- presença de outros edifícios no entorno.

A tabela 8 apresenta um resumo das simulações realizadas.

A automatização das atividades de preparação e processamento da simulação, tratamento e organização dos resultados foi uma etapa importante deste trabalho, sem a qual seria impossível realizar esta quantidade de simulações com o controle de qualidade desejado. O software CFX possui diversas ferramentas para a automatização das simulações.

Cada conjunto de simulações originou um relatório autônomo, e estes relatórios são apresentados no CD em anexo. A forma de organização das informações nestes relatórios foi fundamental para viabilizar as análises produzidas para esta dissertação e, assim sendo, um destes relatórios de simulação é apresentado impresso no anexo 1 de forma a orientar futuros estudos com CFD.

Nome da Simulação	Modelo	Rugosidade do perfil de velocidades da entrada	Piso do modelo	Malha	Direções simuladas
Petro4r0001smooth	Sem entorno	0,001	Liso	5m no geral; 0,5m no edifício	12
Petro4r001smooth	Sem entorno	0,01	Liso	5m no geral; 0,5m no edifício	12
Petro4r01smooth-ZERO	Sem entorno	0,1	Liso	5m no geral; 0,5m no edifício	12
Petro4r03smooth	Sem entorno	0,3	Liso	5m no geral; 0,5m no edifício	12
Petro4r01rough	Sem entorno	0,1	Rugoso	5m no geral; 0,5m no edifício	12
Par4-inf08_set5	Sem entorno	0,001	Liso	5m no geral; 0,5m no edifício, borda inflada no piso	1
Par4-inf08_set3	Sem entorno	0,001	Liso	3m no geral; 0,5m no edifício, borda inflada no piso	1
Petro-5_unrefine	Com entorno	0,001	Liso	8m no geral; 1m no edifício, borda inflada no piso	12
Petro-5_refined	Com entorno	0,001	Liso	7m no geral; 0,8m no edifício, borda inflada no piso	12

Tabela 8 . Sumário das simulações

São ilustradas a seguir algumas das questões relativas às simulações de CFD anteriormente discutidas neste capítulo.

É importante salientar que estes resultados podem apresentar discrepâncias com a realidade, uma vez que os mesmos não foram validados experimentalmente e é conhecida a deficiência na descrição de descolamentos da camada limite que o modelo de turbulência utilizado ($k-\varepsilon$) apresenta.

8.3.10.1 Direção de incidência do vento

Da observação de qualquer das distribuições de pressão nos relatórios de simulação no anexo 1 pode-se notar a sensibilidade dos modelos as alterações na direção dos ventos.

Nas simulações, os coeficientes foram determinados para ângulos com intervalos de 30° recomendados em COST (2004), ou seja, para as direções 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300° e 330°. Nota-se que este intervalo é muito grande, pois diversos pontos apresentam variações de C_p da ordem de 0,5 entre duas simulações. Assim, ventos cujas incidências não foram simuladas – como, por exemplo, 15° – têm seu comportamento no cálculo de vazão no interior do edifício tratado de forma errônea pela falta de C_p adequados a esta direção.

Do apresentado no início deste capítulo, tem-se que 5° é um intervalo mais adequado para a determinação do C_p .

8.3.10.2 Perfil de velocidades médias na entrada e saída do modelo

A figura 110 apresenta a comparação entre as distribuições de C_p em uma face de um modelo no qual foram simulados diferentes perfis de velocidade na entrada e na saída do domínio. Foram utilizados perfis logarítmicos (CLP Neutra) correspondentes a rugosidades variando de 0,001 a 0,3. (Simulações do CD anexo: Petro4r0001smooth, Petro4r001smooth, Petro4r01smooth-ZERO, Petro4r03smooth)

Figura 110 . Distribuição de C_p na face a barlavento para diferentes perfis de vento, correspondentes a rugosidades respectivamente de (0,001) (0,01) (0,1) (0,3)

Da análise desta figura, que não ilustra a complexidade dos efeitos da mudança de rugosidade nas demais faces do modelo e nas demais direções de incidência do vento, pode-se concluir que o valor de C_p é fortemente influenciado pelo perfil de velocidade do vento na entrada e saída do domínio.

Com base nesta constatação, pode-se afirmar que o valor de C_p para o uso no projeto de ventilação natural deve ser obtido por meio de ensaios que considerem a rugosidade do entorno do edifício, sendo que resultados genéricos para perfis de velocidade não especificados podem induzir a erros no projeto de ventilação natural.

8.3.10.3 Rugosidade no piso do modelo

A figura 111 apresenta um histograma com as freqüências das diferenças entre os valores de C_p obtidos para duas simulações (Petro4r01smooth-ZERO e Petro4r01rough) que diferem apenas pelo tratamento dado ao piso do modelo simulado: liso, ou com rugosidade igual àquela utilizada para definir o perfil de entrada. No caso, utilizou-se uma rugosidade de 0,1m.

Para comparar os resultados das simulações, foram calculadas as diferenças entre os valores de C_p encontrados nas simulações com e sem rugosidade no piso, sendo que dada simulação foi feita para 12 direções de incidência do vento. Foram escolhidos 20 pontos de interesse (janelas do prédio) para o cálculo de C_p .

Pode-se notar que na maior parte dos casos (350 de um total de 480 casos) pode-se considerar que não há diferença. Em 10% dos casos (50) o C_p é superdimensionado em 0,1, e em 10% dos

casos sub-dimensionado na mesma proporção. Nos 8% dos casos restantes a diferença entre as simulações ultrapassa 0,1 em módulo.

Como conclusão, pode-se dizer que a presença de rugosidade no piso afeta o resultado, e por representar melhor a realidade deve ser utilizada sempre que possível. Em áreas com diversos edifícios, a área de piso entre os edifícios deve ser modelada como lisa segundo COST (2004).

Figura 111 . Histograma com a frequência absoluta de ocorrência para cada diferença entre os Cp de um mesmo ponto, calculados em simulações com e sem rugosidade no piso do modelo

8.3.10.4 Resolução da malha

Conforme exposto anteriormente, a convergência da simulação é um indicador da qualidade da malha utilizada na simulação. Em grande parte das simulações realizadas, o resíduo foi da ordem de 10^{-3} , sendo alcançado um resíduo de 10^{-4} nas simulações com malhas refinadas.

Nas simulações com malhas grossas, os resíduos estabilizaram após apenas 20 iterações, tendo as simulações sido programadas para serem finalizadas após 100 iterações, caso não se atingisse o resíduo de 10^{-4} . Da análise do gráfico da figura 112 vê-se que as últimas 80 iterações foram completamente desperdiçadas e que a simulação da forma como foi configurada era incapaz de propiciar um resíduo aceitável mesmo que o número de iterações fosse maior.

Figura 112 . Evolução do resíduo pelo RMS na simulação Petro4r0001smooth com vento a 0°

Figura 113 . Pavimento térreo: comparação entre as simulações com diferentes malhas. O comprimento das barras é proporcional ao C_p em cada janela.

Para avaliar a independência da malha foram realizadas simulações com três malhas com diferentes graus de refinamento (Petro4r0001smooth e Par4-inf08_set3, Par4-inf08_set3), para um vento incidindo a 0° no modelo.

A figura 113 ilustra os resultados de cada simulação por meio de barras cujo comprimento equivale ao C_p encontrado, para cada uma das janelas do pavimento térreo. As barras marrons representam a simulação com malha mais grossa, e a amarela, com a malha mais refinada. Nota-se uma grande diferença entre o comprimento das barras marrons e laranjas, mostrando que este refinamento provocou grandes alterações nos resultados encontrados. A diferença de comprimento diminui quando se comparam as barras laranjas e as amarelas, sinalizando a obtenção da

independência da malha.

Os gráficos da figura 114 mostram as diferenças nos C_p encontradas nas simulações. O gráfico da esquerda compara as simulações com malha grossa e média no qual nota-se grandes diferenças nos resultados. O gráfico da direita compara as simulações com malha média e refinada. As diferenças encontradas são menores, mostrando que a malha média está próxima de uma malha que propicie independência nos resultados.

Figura 114 . Diferença no C_p para cada janela. Comparação das simulações duas a duas, da malha mais grossa para a mais fina.

Os resíduos encontrados na simulação com a malha refinada foram próximos a 10^{-4} , indicando que esta malha é a mais adequada das três testadas. Seria conveniente testar uma ou duas malhas ainda mais refinadas, para que se pudesse estabelecer a malha correta para esta simulação. Contudo, cada refinamento na malha envolve maior capacidade de processamento e memória RAM. No caso destas três simulações, a malha teve um acréscimo total de 40% no número de elementos, o que elevou o tempo de processamento em 30%.

8.3.10.5 Simulação da camada limite

Nas simulações realizadas o menor valor médio de y^+ obtido foi de 600. Este valor foi encontrado nas simulações com malhas refinadas (Par4-inf08_set3, Par4-inf08_set3) e com o primeiro ponto da malha a 8cm do piso do modelo. Nas demais os valores médios oscilaram entre 10^3 e 10^{11} .

Futuros estudos devem explorar em maior profundidade a importância deste parâmetro, pois o intervalo indicado na documentação do CFX não pôde ser atingido.

8.4 Coeficientes de pressão por modelos analíticos

Na ausência de estudos em túnel de vento ou CFD, os modelos analíticos para a determinação de C_p se apresentam como uma alternativa adequada a alguns casos.

Os chamados modelos analíticos para a determinação de C_p partem de resultados de ensaios em

túnel de vento para formular modelos empíricos para a predição de C_p . A principal vantagem desta abordagem é que o uso de tais procedimentos é rápido e demanda pouca capacidade computacional, contudo a qualidade das predições é baixa.

Nesta seção serão apresentados dois modelos analíticos: GROSSO (1992), ELDIN (2006) e KNOLL (1995); contudo é importante salientar que o uso de tais modelos deve ser a última alternativa para a obtenção de C_p .

O modelo desenvolvido por GROSSO (1992) foi analisado pelas reproduções encontradas em ALLARD (1998) e SANTAMOURIS (1997). O software CPCALC foi desenvolvido com base neste modelo e foi posteriormente incorporado ao software ENERGY PLUS.

O modelo calcula o valor de C_p em qualquer ponto da fachada, para edifícios de planta retangular, cercados por entorno homogêneo, com edifícios retangulares e igualmente espaçados. De posse destas relações geométricas e da coordenada do ponto de interesse na fachada, o programa faz uso de um conjunto de 16 tabelas para estimar o valor de C_p . As tabelas e equações do modelo estão disponíveis e a sua implementação é relativamente simples. O uso do modelo é desencorajado pelas restrições das geometrias simuladas, uma vez que o escoamento é bastante sensível a geometria do obstáculo.

O modelo desenvolvido por ELDIN (2006) apresenta o valor do C_p médio para as fachadas de um edifício de planta retangular, e não para um ponto específico como faz o modelo de GROSSO (1992). A principal vantagem do modelo de ELDIN (2006) está na flexibilidade no tratamento do entorno, pois o efeito de cada obstrução é analisado individualmente.

Figura 115 . Exemplo de modelo (esquerda) usado na validação do modelo de ELDIN (2006). A direita são apresentados os valores base de C_p para o edifício desobstruído, os medidos em túnel de vento e os previstos pelo modelo.

A figura 115 apresenta um exemplo de edifício com entorno não uniforme, usado para validar o modelo de ELDIN (2006). Da comparação entre os resultados de C_p previstos e os medidos em túnel de vento nota-se que a predição falha em algumas direções como, por exemplo, no caso do vento incidindo na direção 0° em relação a fachada: o valor predito é de 0,4 enquanto o valor medido é de -0,5. Ainda assim o uso do modelo se justifica em situações nas quais o entorno não seja regular.

O modelo de KNOLL (1995) busca unir a predição em diversos pontos da fachada (GROSSO, 1992) com a presença de um entorno heterogêneo (ELDIN, 2006). O modelo foi implementado no software Cp Generator, produzido pelo Dutch TNO Built Environment e disponível para uso apenas via internet. A teoria e as equações do modelo não foram disponibilizadas e, desta forma, são de pouco interesse para o escopo desta pesquisa.

Figura 116 . Comparação entre a predição de C_p feita pelo Cp Generator e dados medidos em um edifício real (HEIJMANS, s.l.)

O Cp Generator apresenta como principal vantagem a capacidade de lidar com entornos complexos, com edifícios de planta retangular dispostos em diferentes orientações e posições.

HEIJMANS (s.d.) procedeu a um conjunto de teste comparando os resultados do Cp Generator com dados coletados em dois edifícios reais. O gráfico da figura 116 apresenta os resultados obtidos para um ponto da fachada representativo dos resultados encontrados. Nota-se que a predição pode ser entendida, na melhor das hipóteses, como uma indicação qualitativa.

8.5 Utilização de dados de C_p existentes na bibliografia

Na ausência de qualquer uma das ferramentas apresentadas para a obtenção de C_p , é possível

recorrer a resultados de ensaios feitos para outros edifícios de forma e entorno similares e apresentados em uma vasta bibliografia.

O grau de semelhança entre o caso em estudo na PVN e os modelo cujos resultados serão reaproveitados define a qualidade da predição realizada.

De forma a facilitar a busca por resultados de C_p na bibliografia, foi elaborado nesta pesquisa um banco de dados, que consiste na coleta e sistematização de diversos resultados de ensaios em túnel de vento para determinação dos coeficientes de pressão em modelos de edifícios.

Este trabalho se justifica na medida que ensaios em túnel de vento são dispendiosos, e não estão ao alcance de grande parte dos projetistas. Assim, a sistematização de resultados provenientes de outros estudos permite ao projetista encontrar um modelo já ensaiado que se assemelhe ao edifício em fase de projeto e utilize estes coeficientes de pressão na análise de ventilação natural.

Outro objetivo deste trabalho é reunir dados que permitam a análises comparativas do comportamento do coeficiente de pressão, e de sua forma de apresentação. Algumas destas análises preliminares fazem parte deste trabalho.

Por fim, a organização do trabalho possibilita a sua constante atualização, por meio da inclusão de outros estudos que são freqüentemente publicados nos periódicos da área.

O banco está dividido em 4 partes, em função das características dos modelos utilizados: paralelepípedos (A), paralelepípedos com entorno (A^*), edifícios com coberturas de duas águas (B), e outras formas (C).

Figura 117 . Classificação das formas do banco de dados de C_p coletados na bibliografia

A qualidade dos dados coletados é bastante diversa, abrangendo desde perfis de C_p sem especificação dos perfis de vento utilizados até distribuições de C_p por face para diversas orientações e rugosidades.

O arquivo digital em formato PDF do banco de dados é apresentado no CD anexo a este volume.

9 Coeficientes de descarga das aberturas

A geometria da abertura e sua interação com o escoamento são determinantes para o cálculo da vazão da ventilação natural por ação dos ventos. Na figura 118 são apresentados alguns tipos de aberturas comumente encontradas em edifícios.

Figura 118 . Tipos de Aberturas (IDEL'CIK, 1960)

Em uma janela "ideal", toda a pressão exercida pelo vento se converte em fluxo de ar na abertura, porém em janelas reais uma parte da energia deste escoamento é dissipada. Essa perda varia em função da forma da janela, e de sua posição no escoamento. Um exemplo deste fenômeno é a vena contracta, que é 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.

Figura 119 . "Vena contracta" (MUNSON et. al., 1997)

Da energia que atinge a abertura, uma parte é dissipada e uma parte é utilizada para promover a ventilação. Assim, a parcela útil varia entre 100% da energia (ou seja, não há perdas) e quase 0% da energia (por exemplo, no caso de uma abertura dotada de diversas telas mosquiteiro).

Chama-se coeficiente de descarga (C_z) da abertura o valor entre 1 e 0 que fornece a parcela útil da energia para a ventilação. O valor comumente utilizado para C_z é 0,6.

Como C_z afeta linearmente a quantidade de energia disponível na abertura, a importância de seu valor é a mesma que o da área da abertura. Se o C_z é estimado erroneamente em 0,6 quando seu valor real é 0,3, o efeito é o mesmo de utilizar nos cálculos uma janela de 2m^2 quando sua área é de 1m^2 , prejudicando a PVN.

9.1 Fundamentação teórica

A equação a seguir, conhecida como equação de Bernoulli, descreve a conservação de momento ($F=m.a$) ao longo de uma linha de corrente em um escoamento.

A equação de Bernoulli é largamente empregada em diversos problemas de mecânica dos fluidos e permite definir conceitualmente C_z . Ela estabelece que, em um escoamento onde não há perdas de momento (por dissipação térmica ou trabalho), a energia pode assumir três formas: pressão, energia cinética e energia potencial, e que a soma destas três parcelas deve permanecer constante.

$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho g z_1 = \text{constante}$$

Onde p é a pressão (Pa), ρ é a massa específica (kg/m^3), V é a velocidade (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e z é a altura do ponto em relação a um nível de referência (m).

Em um escoamento sem dissipação, a energia deve se manter entre dois pontos arbitrários 1 e 2.

$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho g z_1 = p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g z_2$$

Considere o ponto 1 no vento não perturbado e o ponto 2 na face do edifício. O caso da conversão da energia cinética do ponto 1, em pressão no ponto 2, pode, por exemplo, ser descrito pela equação de Bernoulli.

Neste caso, os termos de energia potencial ($\rho g z$) são nulos em ambos os pontos. No ponto 1, a pressão pode ser considerada nula restando apenas o termo de energia cinética. No ponto 2, a velocidade pode ser considerada nula, já que o fluido não escoar para dentro do edifício, restando apenas o termo de pressão, conforme equação a seguir:

$$\frac{\rho V_1^2}{2} = p_2$$

Como visto no capítulo anterior, a energia cinética do vento não é convertida integralmente em pressão na face do edifício, sendo em parte dissipada. Pode-se acrescentar na equação anterior um coeficiente que estabeleça a parcela da energia cinética a ser convertida em pressão.

$$(\text{Coef.}) \frac{\rho V_1^2}{2} = p_2$$

Isolando o coeficiente, vê-se que ele corresponde à definição de coeficiente de pressão:

$$(\text{Coef.}) = \frac{p_2}{\rho V_1^2 / 2} = C_p$$

Outro exemplo do uso da equação de Bernoulli é a conversão da energia potencial da água em um reservatório elevado (ponto 1) em energia cinética na torneira (ponto 2).

$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho g z_1 = p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g z_2$$

Neste caso, a pressão atmosférica "p" é a mesma nos dois pontos e por isto pode ser cancelada da equação.

No ponto 1, a velocidade pode ser considerada nula, e assim a equação fica reduzida a:

$$\rho g z_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g z_2$$

Isolando V, tem-se:

$$V = \sqrt{2g(z_2 - z_1)}$$

A equação a seguir permite calcular a velocidade d'água na torneira com base na diferença de altura "Δz" entre esta e o reservatório:

$$V = \sqrt{2g \cdot \Delta z}$$

Assim como no primeiro exemplo, esta equação deve ser acrescida de um termo para representar a perda de carga devida ao atrito nos tubos e dissipação nas conexões.

No caso de uma janela, a diferença de pressão que existe entre as faces interna e externa promove a ventilação, uma vez que é convertida em velocidade. A equação de Bernoulli fica, então, restrita a:

$$p_E = p_i + \frac{\rho V^2}{2}$$

Isolando a velocidade:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_E - p_i)}{\rho}}$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

A vazão "q" (m³/s) pela janela é calculada pelo produto da velocidade "V" (m/s) pela área "A" (m²) da janela:

$$q = A \cdot V$$

Tem-se então:

$$q_{\text{IDEAL}} = A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

A fórmula anterior é chamada equação do orifício e descreve a vazão por uma janela de área A, submetida a uma diferença de pressão Δp , quando as perdas não são consideradas.

Em uma janela real, deve-se acrescentar à equação de Bernoulli um termo para contabilizar a energia dissipada pela abertura:

$$p_1 = p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \Delta P_{\text{dissipada}}$$

A perda de energia pode ser expressa por meio de um termo adimensional ζ (característica da janela) e da energia cinética, pois quanto maior a energia disponível no sistema, maior será a dissipação:

$$\Delta P_{\text{dissipada}} = \zeta \cdot \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)$$

Substituindo na equação anterior e isolando V tem-se (SILVA, 2003):

$$p_1 = p_2 + \frac{\rho V^2}{2} + \zeta \cdot \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)$$

$$p_1 - p_2 = V^2 \cdot \left(\frac{\rho}{2} + \frac{\zeta \rho}{2} \right)$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{\zeta + 1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

O adimensional ζ é denominado coeficiente de perda de carga, e seu valor depende do regime do escoamento (Re da abertura).

O uso do coeficiente de perda de carga é conveniente para usuários da equação de Bernoulli, mas nos modelos de ventilação natural utiliza-se a equação do orifício, sendo conveniente definir o termo C_z - coeficiente de descarga, por:

$$C_z = \frac{1}{\sqrt{\zeta}}$$

Diversas referências bibliográficas como, por exemplo, IDEL'CIK (1960) utilizam a notação de coeficiente de perda de carga ζ sendo, contudo, simples obter C_z pela definição anterior.

Assim, a equação anterior pode ser escrita na forma:

$$V = C_z \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

E a equação do orifício:

$$q = A \cdot C_z \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

A utilização de C_z na equação permite contabilizar os efeitos da perda de carga na abertura. C_z é adimensional, e varia entre 0 e 1. Em alguns textos, utiliza-se C_d para designar o coeficiente de descarga, porém esta notação não é adequada devido ao uso intensivo da abreviação C_d para designar o coeficiente de arrasto (drag) de um corpo.

A equação do orifício na forma apresentada é de extrema importância, pois é por meio dela que se calcula a vazão de ar na janela, conforme será tratado no capítulo 10. Da sua análise pode-se notar que para o cálculo da vazão (q), faz-se necessário conhecer a área da janela (A), as pressões interna (P_i) e externa (P_e) que compõe Δp , a densidade do ar (ρ), e o coeficiente de descarga (C_z).

Destas variáveis, A é um dado de projeto, ρ é função da temperatura do ar e pressão atmosférica, P_e é calculada conforme descrito no capítulo 8, restando apenas P_i e C_z como incógnitas. A obtenção de C_z é tratada neste capítulo, e a pressão interna P_i é tratada no capítulo 10.

Isolando C_z na equação anterior tem-se:

$$C_z = \frac{q}{A} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p}}$$

A fórmula anterior baliza a obtenção de C_z , e para tanto as outras variáveis devem ser medidas em ensaio de laboratório, ou simuladas com o uso de CFD.

Tanto a vazão quanto a diferença de pressão sofrem flutuações devido a turbulência do vento, mas para o cálculo de C_z são utilizados valores médios destas variáveis.

A figura 120 apresenta alguns valores de C_z para quatro geometrias de aberturas.

Figura 120 . Valores de C_z para algumas geometrias de aberturas (MUNSON et. al., 1997)

9.2 Determinação experimental de C_z

A determinação experimental de C_z envolve a produção de uma vazão no caixilho em estudo e a medição das variáveis usadas na definição de C_z :

- vazão " q " (m^3/s)
- área da abertura " A " (m^2)
- massa específica do ar " ρ " (kg/m^3)
- diferença de pressão entre as faces " Δp " (Pa)

O esquema para a montagem do experimento para a determinação de C_z é apresentado por CHIU (2004) e é reproduzido na figura 121.

Figura 121 . Esquema do experimento para a determinação de C_z (CHIU, 2004)

Constrói-se uma caixa cuja dimensão seja suficiente para eliminar interferência entre o escoamento na entrada e na saída, na qual é instalado o caixilho em uma das faces. A norma inglesa BS 5925 (BSI, 1991) aconselha que a face da caixa que recebe o caixilho proporcione um espaçamento mínimo de 30cm da mesma em relação às bordas caixa, e tenha profundidade mínima de 50cm.

A face da caixa na qual a janela é instalada deve apresentar a mesma espessura da parede real, na qual o caixilho será instalado.

A caixa deve ser estanque e resistir a pressões de até 100 Pa, além de ser rígida de forma a evitar pulsações na vazão de ar, não devendo nenhuma das faces apresentar deflexão maior que 2mm em condições de teste.

Um transdutor de pressão diferencial é utilizado para determinar Δp , tomando as pressões interna e externa da caixa.

O fluxo de ar pelo caixilho é obtido pelo uso de um ventilador ligado a caixa de teste por um duto. O duto deve ser dotado de um registro, de forma a permitir diversas configurações de pressão interna/vazão na caixa.

A vazão de ar (q) é obtida pelo uso de um medidor de vazão colocado na tubulação de saída. Existem diversos tipos de medidores que podem ser utilizados (placa de orifício, ultra-sônico, turbina), sendo o medidor de gás natural para instalações domésticas a melhor alternativa de custo-benefício.

A incerteza do experimento deve ser inferior a 5%, segundo a norma BS 5925 (BSI, 1991).

Não foi encontrada na bibliografia menção da área do caixilho a ser considerada, pois se trata de uma questão meramente formal. Qualquer valor de área pode ser utilizado para a determinação de C_z , desde que a maneira de calcular esta área seja informada junto com o valor de C_z . Aconselha-se utilizar a dimensão do trecho livre do caixilho e divulgar o dado de C_z juntamente com a área utilizada.

Com relação ao ensaio propriamente dito, deve-se primeiramente registrar as condições ambientais: pressão atmosférica e temperatura.

O teste deve então ser feito para seis " Δp " diferentes, iniciando o teste o menor valor a ser testado: $\Delta p=1\text{Pa}$. (BSI, 1991)

Os resultados de " q " versus " Δp " devem ser anotados quando o sistema tiver atingido regime permanente.

Para o cálculo de C_z , a vazão " q_{medida} " (m^3/s) deve ser corrigida para condições padrão de temperatura " T " ($^{\circ}\text{C}$) e pressão atmosférica " p " (Pa) (BSI, 2004), pela fórmula:

$$q_{\text{corrigida}} = q_{\text{medida}} \times \frac{293}{273 + T} \times \frac{p}{101325}$$

Desta forma, utiliza-se a vazão corrigida e a massa específica correspondente a condições padrão (20°C e 101325 Pa) $\rho=1,204 \text{ kg/m}^3$.

9.3 Determinação por simulação de CFD de C_z

A determinação de C_z por meio de simulação de CFD deve reproduzir as condições de ensaio anteriormente descritas, aplicando as diretrizes de configuração descritas no capítulo oito.

A figura 122 apresenta as condições de contorno utilizadas por CHIU (2004) em uma simulação de CFD para determinação de C_z .

A malha utilizada deve ter no mínimo 10 elementos entre cada uma das bordas do caixilho, e a independência dos resultados em relação à malha é imprescindível neste tipo de simulação.

Figura 122 . Condições de contorno de simulação de CFD para a determinação de C_z (CHIU, 2004)

A figura 123 apresenta uma ilustração do resultado obtido por CHIU (2004).

O cálculo de C_z com os valores obtidos na simulação é feito da mesma maneira que utilizando os dados de experimentos.

Muitos dos dados são exportados conforme descrito no capítulo oito, sendo apenas a vazão uma nova variável introduzida neste capítulo.

No CFX-Post, deve-se criar um plano na seção onde se deseja determinar a vazão. Com o uso da ferramenta Calculator é possível obter a vazão no plano criado, ou em uma 2D region criada no CFX_Built.

Figura 123 . Escoamento em uma abertura simulado com CFD para a determinação de C_z (CHIU, 2004)

9.4 Utilização de dados de C_z existentes na bibliografia

Existe uma vasta bibliografia de dados de C_z para dispositivos em tubulações e terminais de sistemas de ventilação mecânica, mas poucos estudos dedicados a aberturas para ventilação natural foram encontrados.

Serão aqui apresentados quatro exemplos extraídos do trabalho de IDEL'CIK (1960), que tratam de dispositivos comumente empregados como aberturas de ventilação natural. Estes dados devem ser utilizados apenas quando a determinação de C_z , experimental ou por simulação de CFD, não for possível. Em particular, para dispositivos que se projetam para fora da fachada do edifício, como os apresentados a seguir, é necessário realizar um estudo mais detalhado que será descrito na seção 9.5.

A figura 124 apresenta a tabela de coeficientes de perda de carga (ζ) para uma janela pivotante, em função do ângulo de abertura (α°) e da relação entre o comprimento na direção do pivô (l_{clap}) e a altura da folha pivotante (b_{clap}).

Figura 124 . Coeficientes de perda de carga – abertura pivotante (IDEL'CIK, 1960)

Por meio da relação a seguir é possível determinar C_z :

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

Da análise da figura 124, algumas conclusões podem ser feitas com relação ao desempenho da janela.

O aumento dos valores de C_z à medida que o ângulo de abertura cresce é bastante significativa: o aumento de 20° para 25° se reflete em um crescimento de 28% no C_z . Conforme apresentado anteriormente, aumentos na área do caixilho e no C_z produzem o mesmo efeito, e assim neste caso três caixilhos com $\alpha = 25^\circ$ produzem efeito quase igual ao de quatro caixilhos com $\alpha = 20^\circ$. A possibilidade de reduzir um caixilho mantendo a mesma ventilação gera uma redução de custo na construção que justifica um estudo preditivo de ventilação natural.

Outra conclusão pela análise da figura 124 é o melhor desempenho de janelas pivotantes curtas ($l/b=1$) em relação às compridas ($l/b=\infty$), possivelmente devido a entrada de ar pelas laterais da janela estreita. O ganho no uso de janelas estreitas em relação às largas é da ordem de 13%.

A figura 125 apresenta os coeficientes de perda de carga para janelas tipo maxi-ar, para fluxos em ambos os sentidos. Considerando que neste tipo de caixilho a folha móvel pivota em direção a parte externa do edifício, tem-se que o primeiro diagrama mostra o fluxo que sai do edifício, enquanto o segundo diagrama mostra o fluxo que entra no edifício.

Figura 125 . Coeficientes de perda de carga – abertura maxi-ar (IDEL'CIK, 1960)

Conforme seria esperado, os valores diferem em função do sentido, pois a geometria vista pelo escoamento é bastante diferente. Pela comparação dos dados nota-se que o C_z é maior quando o fluxo se dá no sentido exterior-interior. Esta informação pode ser utilizada para dimensionar

aberturas diferentes para as faces a barlavento e sotavento, em localidades nas quais a direção do vento seja constante e não mude ao longo do ano ou da estação de interesse. Conforme será apresentado na seção 9.5, é difícil utilizar dados de C_z em função da direção do fluxo uma vez que a maior parte das ferramentas considera C_z uma constante da abertura, que não varia em função do sentido do fluxo.

As janelas maxi-ar utilizadas em diversos edifícios do Brasil têm $l/b < 1$ e, portanto não estão contempladas na figura 125.

A figura 126 apresenta os coeficientes de perda de carga para telas em dutos, em função da relação $\bar{f}$ que é função da área aberta da tela (F_0) em relação à área total (F_1).

Figura 126 . Coeficientes de perda de carga – tela (IDEL'CIK, 1960)

Uma vez que os dados de ζ foram obtidos em dutos, pode-se esperar um comportamento diferente do apresentado na tabela quando a tela for aplicada em um caixilho na fachada, que não apresenta as mesmas restrições ao escoamento.

Em escoamentos em dutos, é possível calcular um coeficientes de perda de carga resultante (ζ_R) pela soma dos coeficientes singulares de cada elemento presente no duto:

$$\zeta_R = \zeta_1 + \zeta_2$$

Da relação anterior pode-se obter uma sugestão de equação para C_{zR} :

$$\frac{1}{C_{zR}} = \frac{1}{C_{z1}} + \frac{1}{C_{z2}} + \dots$$

Não foi encontrada na bibliografia qualquer menção ao uso desta prática na determinação de C_z , e a equação anterior não considera a justaposição, e sim a sucessão dos componentes no duto.

Aconselha-se a determinação experimental de C_{zR} , em detrimento do uso da equação anterior.

Outra fragilidade no uso dos dados da figura anterior se deve ao fato de a utilização de valores de ζ menores que 1 levar a valores de C_z maiores que a unidade, o que contraria a definição C_z .

A figura a seguir apresenta os coeficientes de perda de carga para chapas perfuradas em função da área aberta da tela (F_0) em relação à área total (F_1), e do número de Reynolds dos orifícios. O Re de um orifício circular é definido por:

$$Re = \frac{V_o \cdot d_H \cdot \rho}{\mu}$$

Onde, V_o é a velocidade do ar (m/s) no orifício, ρ e μ são a massa específica e viscosidade dinâmica do ar, e d_H é dado pela equação a seguir:

$$d_H = 4 \cdot f_o \cdot P_o$$

Onde f_o e P_o são a área (m^2) e o perímetro (m) do orifício respectivamente.

Figura 127 . Coeficientes de perda de carga – abertura pivotante (IDEL'CIK, 1960)

Este exemplo é de difícil aplicação, pois o C_z do dispositivo apresenta grande dependência de Re , e para determinar Re é necessário conhecer a velocidade do escoamento nos orifícios na situação de aplicação. A vazão de ar (q) nas aberturas do edifício, por consequência a velocidade do escoamento na abertura, é a incógnita deste trabalho, e nos casos em que C_z depende de q , o problema deve ser resolvido iterativamente. Não foi encontrada na literatura menção à utilização deste procedimento.

De forma geral, o C_z das aberturas pode ser considerado independente de Re nos casos em que a abertura apresente arestas vivas, como as da primeira abertura mostrada na figura 119..

Contudo, quase nenhuma das aberturas utilizadas em edifícios reais apresenta tais características. Nos casos das janelas esta dependência é mais fraca e pode ser desprezada na maior parte dos casos, mas o mesmo não pode ser dito dos dispositivos nos quais a interação entre o fluido e a abertura é maior, como chaminés, telas perfuradas, venezianas e afins.

9.5 Considerações sobre o comportamento de C_z

A definição de C_z utilizada para o cálculo da vazão nos softwares consultados para esta pesquisa (TAS, Energy Plus, Aiolos) assume que C_z é um dado da geometria da abertura, e não varia com o escoamento.

Na seção anterior foram apresentados resultados que demonstram que C_z varia com o Re da abertura e com sentido do escoamento na mesma.

Além destes dois parâmetros, diversos estudos como CHIU (2005) e KURABUCHI (2004) demonstram que C_z é afetado pelo escoamento externo junto à abertura.

Historicamente, o estudo de C_z tem-se dado em condições de "ar parado" na qual uma das faces da abertura é submetida a uma sobrepressão, mas não é submetida aos fluxos tangentes à parede encontrados em aberturas de edifícios reais.

A figura a seguir apresenta as linhas de corrente que penetram uma abertura, o chamado "stream tube", quando o ângulo entre a face e o vento varia entre 0° e 45° .

A interação entre o escoamento, o edifício e a abertura se reflete no C_z , a despeito do Re da abertura e do sentido serem os mesmo nos três casos.

Figura 128 . "Stream tubes" para ângulos de incidência do vento de 0° , $22,5^\circ$ e 45° respectivamente, obtidos por simulação de CFD acessado em 10.08.2006 em http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/ventilation/CFD_Result.html#Stream_tube

De forma a explorar as relações de dependência entre C_z e o escoamento externo à abertura foram realizados experimentos no túnel de vento da SBE onde o C_z de uma abertura circular de cantos vivos, em um modelo em escala de um galpão, foi estudado sob a influência do escoamento.

Algumas características do experimento serão tratadas no capítulo onze, e uma descrição detalha pode ser encontrada em COSTOLA e ETHERIDGE (2006).

A figura 129 apresenta os resultados de C_z em função do Re da abertura, obtidos quando o sentido do fluxo é do exterior para o interior do modelo.

Nela são apresentados três conjuntos de resultados. Os quadrados cinzas apresentam os valores de C_z quando a abertura está a barlavento, com o vento incidindo perpendicularmente à ela (wind dir=0°). Os pontos vazados apresentam C_z quando a abertura está a sotavento (wind dir=180°). Para efeito de comparação são apresentados, em círculos pretos, os valores de C_z obtidos segundo o procedimento descrito na seção 9.2 desta dissertação, ou seja, sem a influência do vento (still air).

Figura 129 . C_z ext-int de um orifício circular com cantos vivos, para diferentes condições de escoamento externo, obtido em ensaio no túnel de vento da SBE

Da análise da figura anterior é possível notar a diferença no comportamento de C_z em função do ângulo de incidência do vento, sendo C_z da abertura a sotavento (180°) próximo do obtido sem a influência do vento.

Os ensaios permitem concluir que a abertura posicionada a sotavento tem C_z aproximadamente 20% maior que a mesma abertura a barlavento, para este sentido do escoamento.

A figura 130 apresenta os resultados de C_z quando o fluxo se dá no sentido interior-exterior, não tendo sido testada a configuração com a abertura a barlavento.

A despeito dos cantos vivos da abertura, esta exibe uma forte dependência em baixos valores de Re , os quais não ocorrem em aberturas de edifícios reais que têm dimensão característica muito maior que a abertura usada no modelo.

Os valores de C_z encontrados são bastante semelhantes aos do fluxo externo-interno, mostrando que o C_z da abertura a sotavento pode ser tomado como igual ao do ensaio descrito na seção 9.2.

Figura 130 . C_z int-ext de um orifício circular com cantos vivos, para diferentes condições de escoamento, obtido em ensaio no túnel de vento da SBE

Sendo o valor de C_z afetado pela conformação do fluxo junto da abertura, pode-se esperar que a presença de obstáculos próximos ao edifício modifique o valor de C_z , pela modificação do fluxo ao redor do edifício.

A figura 131 apresenta os "stream tubes" obtidos em simulações de CFD para um modelo com e sem a presença de um obstáculo externo, sendo clara a modificação na conformação do escoamento junto da abertura.

Figura 131 . "Stream tubes" com e sem obstrução, para ângulo de incidência do vento de 65° , obtidos por simulação de CFD acessado em 10.08.2006 em http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/ventilation/CFD_Result.html#Stream_tube

Conforme exposto no início desta seção, as ferramentas computacionais disponíveis para o cálculo de vazão ainda não permitem definir C_z em função das seguintes variáveis:

- Re da abertura
- sentido do escoamento do fluxo na abertura
- escoamento externo junto à abertura

Isto ocorre devido à ausência de dados experimentais e modelos que permitam estabelecer C_z nestes termos, sendo este um campo de pesquisa fértil e ativo cujos desdobramentos devem promover mudanças na definição dos valores de C_z . Em particular, o modelo proposto por Kurabuchi (2004) parece indicar um caminho promissor para a definição de C_z em função de variáveis do escoamento.

De forma geral, pode-se esperar que futuras ferramentas para o cálculo da vazão no interior do edifício utilizem:

- Solução iterativa do cálculo de vazão e de Re da abertura.
- C_z independentes para cada sentido do escoamento na abertura, por meio de solução iterativa do cálculo de vazão.
- Métodos preditivos de C_z em função da geometria do edifício e da configuração do escoamento, como o proposto por Kurabuchi (2004).

10 Vazões internas pelo modelo de rede

Este capítulo apresenta a última etapa do procedimento para quantificação da vazão por ventilação natural, objeto desta dissertação: o cálculo da vazão de ar no interior do edifício provocada pela ação do vento.

Os chamados "modelos de envelope" para a simulação do desempenho térmico do edifício consideram uniformes as características térmicas no interior de uma zona (recinto) do edifício, ou seja, um quarto possui a mesma temperatura e umidade do ar em todos os pontos e, por isso, a modelagem fica restrita a interação entre o exterior e o interior do edifício.

O modelo de rede aqui apresentado para o cálculo da ventilação, também chamado multi-zona, parte da mesma premissa, ou seja, calcula a vazão de ar pelas aberturas, mas não fornece detalhes do campo velocidade no interior do recinto. Esta abordagem é a mais utilizada nas simulações de desempenho térmico, tendo sido implementada em diversos softwares comerciais, como o TAS, e gratuitos, como o Energy Plus. O software Aiolos é um software gratuito destinado unicamente ao cálculo de vazão por ação dos ventos, de utilização simples e baseado no modelo de rede.

10.1 Fundamentação teórica

Conforme apresentado no capítulo nove, a equação do orifício permite que a vazão (m^3/s) do vento por uma abertura seja calculada a partir da: área da abertura (m^2), coeficiente de descarga da abertura e a diferença de pressão (Pa) entre suas faces interna e externa, conforme fórmula:

$$q = A \cdot C_z \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

Onde ρ é a massa específica do ar. ($\rho=1,2$ - a uma atm e $20^\circ C$).

Na equação do orifício, as incógnitas são q e Δp .

Pode-se desmembrar Δp em diversos termos de pressão em função da natureza dos fenômenos envolvidos. No caso da ventilação por efeito dos ventos, Δp é composto por uma pressão externa devida ao vento P_x e uma pressão interna P_i :

$$\Delta p = P_i - P_x$$

Do capítulo oito, tem-se que a pressão externa P_x é calculada com base na velocidade de referência do vento e do coeficiente de pressão, conforme a fórmula:

$$P_x = 0,5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot V^2$$

Substituindo na equação do orifício:

$$q = A \cdot C_z \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot V^2|}{\rho}}$$

A equação anterior é a equação do orifício adaptada para o cálculo da ventilação por ação dos ventos.

Nela é possível identificar os três parâmetros apresentados nos itens anteriores: VENTO, C_p e C_z . Somente de posse destes valores é possível calcular a vazão por ação dos ventos utilizando o modelo de redes.

Ainda sobre a equação anterior, nota-se que, para calcular a vazão q é necessário também o valor da pressão interna P_i .

Para exemplificar como obter o valor de P_i , considere um edifício em corte dotado de duas aberturas J1 e J2, uma a barlavento e outra a sotavento, como o apresentado na figura 132.

Figura 132 . Edifício com duas aberturas

Considerando-se o princípio de conservação de massa e que o sistema funciona em regime estacionário, tem-se que a soma das vazões das duas aberturas deve ser igual a zero.

$$\sum q = 0$$

Em uma dada zona, a conservação de massa será calculada pela soma das vazões de todas as

aberturas. No caso tem-se apenas duas, então:

$$q_1 + q_2 = 0$$

Considerando que a abertura P2 será a saída, atribui-se a ela um sinal negativo e, substituindo-se q_1 (vazão na abertura J1) e q_2 (vazão na abertura J2) pelas respectivas equações do orifício, tem-se:

$$A_1 \cdot C_{z1} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{p1} \cdot V^2|}{\rho}} - A_2 \cdot C_{z2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{p2} \cdot V^2|}{\rho}} = 0$$

Com base na equação anterior calcula-se a pressão interna (P_i) e de posse deste valor, a vazão interna.

Conforme apresentado na introdução deste capítulo, e assim como no caso do CFD, diversos softwares já implementados e disponíveis permitem o cálculo da vazão segundo as equações do orifício e do princípio de conservação de massa.

Na seção 10.2 será apresentado um exemplo de utilização de um destes softwares, o TAS.

Na seção 10.3 serão apresentadas a dedução de equações simplificadas encontradas na bibliografia básica de conforto térmico e as técnicas matemáticas para a solução de casos com várias aberturas e vários recintos.

10.2 Cálculo da vazão interna utilizando o software TAS

O software TAS é um programa comercial, desenvolvido pela empresa inglesa EDSL, destinado à predição do desempenho térmico e energético da edificação.

Diante de diversos programas destinados ao cálculo da vazão por ação dos ventos que fazem uso da mesma teoria, o TAS foi adotado devido às possibilidades de controle da abertura e à interface amigável, em particular para a entrada da geometria do edifício.

Optou-se por adotar uma ferramenta de simulação não só da ventilação, como é o caso do Aiolos, mas de todas as variáveis pertinentes ao conforto térmico, uma vez que a ventilação analisada isoladamente é de pouca utilidade na determinação do desempenho do edifício. A escolha do TAS também considerou o fato de o software não solicitar obrigatoriamente a entrada dos dados de C_p e C_z .

O C_z é tido com fixo e igual a 0,6 para qualquer abertura, em qualquer orientação em relação ao vento em ambos os sentidos do escoamento. O suporte técnico do software aconselha utilizar a área da janela para corrigir o C_z .

O C_p de cada abertura para cada ângulo de incidência do vento pode ser informado por meio de um arquivo de texto, mas, na falta deste, o software adota um banco de C_p genérico para qualquer

forma de edifício a ser simulado.

Estas duas práticas facilitam o uso, mas a qualidade da simulação é bastante prejudicada.

Outros softwares também fazem algumas destas simplificações ou, ainda, fornecem dados genéricos de C_p e C_z e a serem usados na falta de informações sobre o próprio modelo. No caso do TAS esta omissão se torna acentuada devido à interface amigável do software, levando usuários a simularem a ventilação natural de maneira inadequada.

Para as simulações de exemplo, foi adotado o mesmo edifício dos estudos de CFD apresentados no capítulo 9. Os resultados de C_p obtidos com as simulações de CFD foram utilizados como dados de entrada no TAS. A entrada de dados de C_p é uma tarefa trabalhosa quando a interface do software não é amigável, dada a quantidade de dados utilizados. O TAS gera um arquivo de base para os dados de C_p , com a identificação usada pelo programa para cada abertura. (Building Simulator>Building Summary>Wind Pressure Coefficient File>Create)

O arquivo deve então ser preenchido com o C_p de cada janela, para cada direção do vento disponível. O software interpola os valores quando a direção do vento não consta dos dados fornecidos pelo usuário.

As quatro linhas a seguir apresentam um exemplo do arquivo de entrada de C_p .

12

0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330

9 7 -0.33 -0.61 -0.48 -0.48 -0.57 -0.61 -0.46 0.11 0.74 0.53 0.25 -0.1

10 13 -0.36 -0.56 -0.41 -0.49 -0.62 -0.64 -0.47 0.15 0.59 0.66 0.32 -0.08

A quantidade de direções para as quais o C_p é informado no arquivo deve ser definida pelo usuário na primeira linha, assim como os ângulos para os quais de o dado de vento foi coletado (linha 2).

As demais linhas correspondem a cada uma das aberturas externas para ventilação. O primeiro e o segundo valores informam a zona e a superfície à qual uma "aperture type" foi associada. Os dados seguintes são os C_p para cada uma das direções listadas na segunda linha do arquivo, com o separador decimal "ponto".

Para as "janelas de correr" dos quartos, sala e da cozinha, nas quais a abertura é retangular e sem obstrução considerou-se $C_z=0,6$.

Foram simulados apenas o térreo e o quarto e último pavimento.

As figuras 133 e 134 apresentam o modelo utilizado nas simulações.

Figura 133 . Planta (térreo e 4º pavimento) e modelo 3D do edifício simulado no TAS

Figura 134 . Planta da cobertura e dos andares não simulados.

Na janela do banheiro, C_z calculado com base no coeficiente de perda de carga da figura 124, sendo $C_z=0,27$ conforme cálculo a seguir.

$$C_z = \frac{1}{\sqrt{\xi}} = \frac{1}{\sqrt{14}} = 0,27$$

O fator de correção "Af" da área da janela a ser usado no TAS deve ser calculado segundo fórmula a seguir, de forma a considerar o efeito de $C_z=0,6$ utilizado pelo software.

$$Af = \frac{C_z}{0,6} = \frac{0,27}{0,6} \cong 0,5$$

O TAS possui diversas formas de controle da abertura. Foi adotado o controle "zrwnn" de forma que a janela permanece aberta sempre que a temperatura resultante interna for superior a 20°C.

O arquivo climático utilizado foi produzido pelo LABEEE-UFSC, conforme descrito no capítulo 6. Alguns dados com velocidades de vento muito elevadas, da ordem de 40 m/s em 6 das 8.760 horas foram excluídos do arquivo original e substituídos pelo dado da hora anterior. No entanto, não foram realizados outros tratamentos dos dados de vento como, por exemplo, tratamento topográfico.

Foram simuladas duas situações de ventilação:

- Efeito chaminé e de ventos. Portas internas dos apartamentos abertas. Valores de C_p para um edifício genérico adotado pelo TAS.
- Efeito chaminé e de ventos. Portas internas dos apartamentos aberta utilizando os C_p produzidos no CFX.

Uma vez que foram simulados oito apartamentos em um ano típico, a quantidade de dados produzidos é grande. Assim, foram selecionados dias e recintos representativos dos resultados obtidos de forma a ilustrar as diferenças encontradas nas simulações.

Os gráficos da figura 135 mostram a comparação da vazão em alguns dias simulados e nos recintos mais representativos do conjunto das simulações. É notável a mudança nas vazões da ventilação natural à medida que a simulação é aperfeiçoada, em particular nos apartamentos 13a e 14a. na figura 135 (b) a evolução são apresentadas as vazão calculada durante dois dias, onde nota-se que a diferença entre os resultados das simulações é de até 600%. Estas diferenças se devem apenas a substituição do C_p padrão do TAS pelos valores gerados nas simulações do CFX.

Estas diferenças se aplicam apenas a este caso e a utilização de C_p corretos poderia ter revelado vazões menores que as inicialmente previstas. O fato não é se a vazão aumenta ou diminui, e sim que a simulação utilizando C_p corretos tem mais chances de corresponder à realidade.

Figura 135 . Comparação entre simulações com diferentes Cp no TAS

As temperaturas internas mostram uma sensibilidade menor aos aumentos nas vazões, conforme figura 136. É importante ressaltar que a despeito da pequena redução da temperatura do ar, a condição de conforto será afetada pelo aumento na velocidade do ar no interior do recinto, causado pelo aumento da vazão. As relações entre a vazão de ar, a temperatura e a velocidade do ar no interior do recinto não são o objeto desta dissertação, e espera-se que futuros trabalhos possam explorar este tema utilizando as ferramentas de cálculo de vazão aqui descritas.

Figura 136 . Variação da temperatura interna com diferentes Cp no TAS

10.3 Solução das equações do modelo de rede

Esta seção apresenta um método para a solução das equações propostas pelo modelo de rede. Por meio de três exemplos, de complexidade crescente, são discutidas as especificidades matemáticas com o intuito de orientar usuários do procedimento dispostos a implementar rotinas computacionais como a utilizada na seção anterior.

A inclusão do efeito chaminé nos cálculos aqui apresentados é relativamente simples no caso de aberturas com fluxo em apenas uma direção, pois se trata de um termo adicional de pressão que não altera as incógnitas do problema.

De forma a iniciar o estudo destas equações, será resolvido o problema proposto na introdução deste capítulo.

Sejam as aberturas 1 e 2 da figura 132 caracterizadas pelos dados da tabela a seguir:

Abertura	área (m ²)	C _z	C _p
1	1,50	0,60	0,70
2	2,30	0,80	-1,00

Tabela 9 . Dados das aberturas 1 e 2 para o exemplo de cálculo de vazão unicompartimental com duas aberturas

Considerando um vento de referência de 5m/s, e $\rho=1,2\text{kg/m}^3$, é possível escrever a equação do orifício para cada uma das aberturas:

$$q_1 = 1,16 \cdot \sqrt{|P_i + 17,5|}$$

$$q_2 = -2,37 \cdot \sqrt{|P_i - 15|}$$

A equação de conservação de massa fica restrita à igualdade entre as vazões das aberturas e é resolvida a seguir:

$$q_1 = q_2$$

$$1,16 \cdot \sqrt{|P_i + 17,5|} = -2,37 \cdot \sqrt{|P_i - 15|}$$

$$1,35 \cdot (P_i + 17,5) = 5,62 \cdot (P_i - 15)$$

$$P_i = 25,26 \quad (\text{Pa})$$

Substituindo a pressão interna P_i nas equações do orifício tem-se a vazão em cada abertura:

$$q_1 = 1,16 \cdot \sqrt{|P_i + 17,5|} = 7,58 \quad (\text{m}^3 / \text{s})$$

$$q_2 = -2,37 \cdot \sqrt{|P_i - 15|} = 7,59 \quad (\text{m}^3 / \text{s})$$

O caso particular de uma única zona com apenas duas aberturas pode ser resolvido analiticamente, conforme apresentado por FROTA e SCHIFFER (2000):

$$q = A_E \cdot C_{ZE} \cdot V \cdot \sqrt{C_{P2} - C_{P1}}$$

Apresenta-se a seguir a demonstração da fórmula para este caso especial:

Igualando as equações do orifício das duas aberturas tem-se:

$$A_1 \cdot C_{Z1} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot [P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{P1} \cdot V^2]}{\rho}} = A_2 \cdot C_{Z2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot [P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{P2} \cdot V^2]}{\rho}} \quad h$$

Onde P_i é a incógnita. Isolando P_i tem-se:

$$P_i = 0,25 \cdot \rho \cdot V^2 \frac{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 \cdot C_{P2} \cdot (A_2 \cdot C_{Z2})^2 \cdot C_{P1}}{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 + (A_2 \cdot C_{Z2})^2}$$

Antes de substituir a pressão P_i na equação do orifício de uma das aberturas, faz-se necessário manipulá-la de forma a retirar a raiz quadrada da equação, conforme apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} q_1^2 &= A_1 \cdot C_{Z1} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot [P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{P1} \cdot V^2]}{\rho}} \\ \frac{q_1^2}{(A_1 \cdot C_{Z1})^2} &= \frac{2 \cdot P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{P1} \cdot V^2}{\rho} \\ q_1^2 &= (A_1 \cdot C_{Z1})^2 \left(\frac{2 \cdot P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{P1} \cdot V^2}{\rho} \right) \\ q_1^2 &= C_{P1} \cdot (A_1 \cdot V \cdot C_{Z1})^2 + \frac{2 \cdot (A_1 \cdot C_{Z1})^2}{\rho} \cdot P_i \end{aligned}$$

Substituindo P_i na equação anterior tem-se:

$$q_1^2 = C_{P1} \cdot (A_1 \cdot V \cdot C_{Z1})^2 + \frac{2 \cdot (A_1 \cdot C_{Z1})^2}{\rho} \cdot 0,25 \cdot \rho \cdot V^2 \frac{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 \cdot C_{P2} - (A_2 \cdot C_{Z2})^2 \cdot C_{P1}}{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 + (A_2 \cdot C_{Z2})^2}$$

Simplificando:

$$q_1^2 = \frac{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 \cdot (A_2 \cdot C_{Z2})^2}{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 + (A_2 \cdot C_{Z2})^2} \cdot V^2 \cdot (C_{P2} - C_{P1})$$

A equação anterior apresenta as áreas e C_z de ambas as aberturas. Estas podem ser substituídas por uma área e C_z equivalentes, pela relação apresentada por FROTA e SCHIFFER (2000) na forma transcrita a seguir.

$$\frac{1}{S_E^2} = \frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2}$$

Seja S_E o produto equivalente da área das aberturas e C_z , onde S_1 e S_2 representam as aberturas 1 e 2. Substituindo estas relações, tem-se:

$$\frac{1}{(A_E \cdot C_{ZE})^2} = \frac{1}{(A_1 \cdot C_{Z1})^2} + \frac{1}{(A_2 \cdot C_{Z2})^2}$$

$$\frac{1}{(A_E \cdot C_{ZE})^2} = \frac{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 + (A_2 \cdot C_{Z2})^2}{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 \cdot (A_2 \cdot C_{Z2})^2}$$

De onde se obtém a relação entre as áreas e Cz.

$$(A_E \cdot C_{ZE})^2 = \frac{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 \cdot (A_2 \cdot C_{Z2})^2}{(A_1 \cdot C_{Z1})^2 + (A_2 \cdot C_{Z2})^2}$$

Substituindo a área da abertura e Cz equivalentes na equação anterior:

$$q_1^2 = (A_E \cdot C_{ZE})^2 \cdot V^2 \cdot (C_{P2} - C_{P1})$$

O que equivale à fórmula apresentada por FROTA e SCHIFFER (2000):

$$q = A_E \cdot C_{ZE} \cdot V \cdot \sqrt{C_{P2} - C_{P1}}$$

A fórmula anterior é aplicável ao caso particular de uma única zona, com apenas duas aberturas, e permite omitir a presença da pressão interna Pi como variável.

No caso de um problema com três aberturas em uma única zona, o procedimento anteriormente descrito não é aplicável. Além do fato de não ser possível elevar a equação ao quadrado de forma a eliminar as raízes quadradas, o sentido do fluxo em cada abertura não é óbvio. Faz-se necessário acrescentar um termo (S_1) na equação do orifício para determinar o sentido do escoamento em cada abertura:

$$q_1 = A_1 \cdot C_{Z1} \cdot S_1 \sqrt{\frac{2 \cdot |P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{P1} \cdot V^2|}{\rho}}$$

O sentido do fluxo em uma abertura é dado por Δp , pois o sentido do gradiente determina o fluxo provocado por ele. Adota-se uma convenção arbitrária sobre o significado dos sinais, que nas demonstrações a seguir será que $\Delta p < 0$ simboliza o fluxo que entra na zona.

O termo S_1 pode ser escrito conforme equação a seguir:

$$S_1 = \frac{P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{P1} \cdot V^2}{|P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot C_{P1} \cdot V^2|}$$

O termo S_1 terá valor igual a um, e sinal igual ao de Δp .

Na figura e tabela a seguir são apresentados os dados de um problema com três aberturas em uma zona:

Figura 137 . Ventilação em um única zona, por três aberturas

Abertura	área (m2)	Cz	Cp
1	1,50	0,60	0,70
2	2,30	0,80	-1,00
3	4,00	0,30	-0,40

Tabela 10 . Dados das aberturas 1, 2 e 3 para o exemplo de cálculo de vazão unicompartmental com três aberturas

As equações do orifício para cada abertura são apresentadas a seguir:

$$q_1 = 1,16 \cdot \frac{P_i + 10,5}{|P_i + 10,5|} \cdot \sqrt{|P_i + 10,5|}$$

$$q_2 = 2,37 \cdot \frac{P_i - 15}{|P_i - 15|} \cdot \sqrt{|P_i - 15|}$$

$$q_3 = 1,55 \cdot \frac{P_i - 6}{|P_i - 6|} \cdot \sqrt{|P_i - 6|}$$

O balanço de massa é dado por:

$$q_1 + q_2 + q_3 = 0$$

Substituindo as equações do orifício no balanço de massa:

$$1,16 \cdot \frac{P_i + 10,5}{|P_i + 10,5|} \cdot \sqrt{|P_i + 10,5|} + 2,37 \cdot \frac{P_i - 15}{|P_i - 15|} \cdot \sqrt{|P_i - 15|} + 1,55 \cdot \frac{P_i - 6}{|P_i - 6|} \cdot \sqrt{|P_i - 6|} = 0$$

A equação anterior é uma equação não-linear e será demonstrado como resolvê-la por um método iterativo conhecido como Newton-Raphson, utilizado na grande maioria dos softwares de cálculo de ventilação pelo modelo de rede.

Neste método, a equação anterior é considerada uma função $q(P_i)$ da qual deseja-se encontrar a raiz $q=0$. Seja a função $q(P_i)$:

$$q = 1,16 \cdot \frac{P_i + 10,5}{|P_i + 10,5|} \cdot \sqrt{|P_i + 10,5|} + 2,37 \cdot \frac{P_i - 15}{|P_i - 15|} \cdot \sqrt{|P_i - 15|} + 1,55 \cdot \frac{P_i - 6}{|P_i - 6|} \cdot \sqrt{|P_i - 6|}$$

Para utilizá-lo o método de Newton, deve-se obter a derivada $\frac{dq}{dP_i}$ da função anterior. Sendo:

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$

A derivada da função pode ser obtida pelas derivadas de cada uma das equações do orifício de cada abertura:

$$\frac{dq}{dP_i} = \frac{dq_1}{dP_i} + \frac{dq_2}{dP_i} + \frac{dq_3}{dP_i}$$

As equações do orifício podem ser generalizadas segundo a equação a seguir, na qual os termos a e b decorrem dos valores de C_z , C_p e V :

$$q_k = a_k \cdot \frac{P_i + b_k}{|P_i + b_k|} \cdot \sqrt{|P_i + b_k|}$$

Os valores de a e b podem ser calculados pelas fórmulas:

$$a = A \cdot C_z \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}$$

$$b = 0,5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot V^2$$

A tabela a seguir apresenta estes valores para o exemplo com três aberturas em uma zona:

Abertura	a	b
1	1,16	10,50
2	2,38	-15,00
3	1,55	-6,00

Tabela 11 . Valores dos parâmetros "a" e "b" das aberturas 1, 2 e 3 para o exemplo de cálculo de vazão unicompartmental com duas aberturas

Usando esta notação, a derivada da equação do orifício foi obtida com o auxílio do software Mathcad, sendo:

$$\frac{dq_k}{dP_i} = -\frac{a_k \cdot |P_i + b_k|}{2 \cdot \sqrt{|P_i + b_k|}^3} + \frac{a_k}{\sqrt{|P_i + b_k|}}$$

As derivadas de cada equação do orifício são apresentadas a seguir:

$$q'_1 = -\frac{1,16 \cdot |P_i + 10,5|}{2 \cdot \sqrt{|P_i + 10,5|^3}} + \frac{1,16}{\sqrt{|P_i + 10,5|}}$$

$$q'_2 = -\frac{2,37 \cdot |P_i - 15|}{2 \cdot \sqrt{|P_i - 15|^3}} + \frac{2,37}{\sqrt{|P_i - 15|}}$$

$$q'_3 = -\frac{1,55 \cdot |P_i - 6|}{2 \cdot \sqrt{|P_i - 6|^3}} + \frac{1,55}{\sqrt{|P_i - 6|}}$$

E assim a derivada da função é dada por:

$$\frac{dq}{dP_i} = -\frac{1,16 \cdot |P_i + 10,5|}{2 \cdot \sqrt{|P_i + 10,5|^3}} + \frac{1,16}{\sqrt{|P_i + 10,5|}} - \frac{2,37 \cdot |P_i - 15|}{2 \cdot \sqrt{|P_i - 15|^3}} + \frac{2,37}{\sqrt{|P_i - 15|}} - \frac{1,55 \cdot |P_i - 6|}{2 \cdot \sqrt{|P_i - 6|^3}} + \frac{1,55}{\sqrt{|P_i - 6|}}$$

Uma vez obtida a derivada da função, é necessário adotar um valor aproximado de P_{i0} para dar início aos cálculos. A importância de P_{i0} é discutida por YUGUO (2002), que reporta a dificuldade de todos os softwares que utilizam este método para obter convergência.

A dotou-se para definir P_{i0} a média dos valores b das equações do orifício das aberturas.

De posse da função, sua derivada e do valor aproximado P_{i0} , calcula-se o valor de P_{i1} por meio da formulação matemática do método de Newton apresentada a seguir:

$$P_{i_{N+1}} = P_N + q_N \left/ \frac{dq_N}{dP_i} \right.$$

Substituindo-se a função e a derivada pelas equações do orifício das aberturas tem-se:

$$P_{i_{N+1}} = P_N + \frac{q_1(P_N) + q_2(P_N) + q_3(P_N)}{\frac{dq_1}{dP_i} + \frac{dq_2}{dP_i} + \frac{dq_3}{dP_i}}$$

Assim, com base no valor de P_{i0} calcula-se os valores das vazões e das derivadas, obtendo-se P_{i1} . O valor de P_{i1} é utilizado para calcular P_{i2} e assim sucessivamente até a convergência.

A tabela 12 apresenta os valores de 15 iterações baseados em um valor inicial de $P_{i0}=3,5$.

Na última coluna é apresentada a vazão total no recinto em cada iteração. Na iteração 15, a vazão é igual a zero, de forma que o princípio de conservação de massa foi atendido. As vazões em cada abertura são apresentadas na mesma linha, sendo o sinal negativo indicador do fluxo que entra no recinto.

A planilha eletrônica usada para os cálculos da tabela anterior encontra-se no CD anexo a esta dissertação.

N	Pi (N)	q1	q2	q3	dq1/dP	dq2/dP	dq3/dP	Pi (N+1)	q
0	-3,5	-4,35	8,06	2,45	0,53	1,11	0,80	-6,03	6,16
1	-6,03	-4,72	7,12	-0,25	0,52	1,14	-1,56	-28,77	2,14
2	-28,77	-7,28	-8,82	-7,39	0,46	1,09	0,67	-18,18	-23,49
3	-18,18	-6,22	-4,24	-5,41	0,49	1,22	0,72	-11,63	-15,86
4	-11,63	-5,47	4,36	-3,68	0,50	1,22	0,77	-9,71	-4,78
5	-9,71	-5,22	5,46	-2,98	0,51	1,19	0,79	-8,60	-2,74
6	-8,60	-5,08	6,01	-2,50	0,51	1,17	0,80	-7,97	-1,57
7	-7,97	-4,99	6,30	-2,17	0,51	1,16	0,80	-7,62	-0,87
8	-7,62	-4,95	6,45	-1,97	0,51	1,16	0,80	-7,43	-0,46
9	-7,43	-4,92	6,54	-1,85	0,52	1,15	0,79	-7,33	-0,24
10	-7,33	-4,91	6,58	-1,79	0,52	1,15	0,79	-7,29	-0,12
11	-7,29	-4,90	6,60	-1,76	0,52	1,15	0,79	-7,26	-0,06
12	-7,26	-4,90	6,61	-1,74	0,52	1,15	0,79	-7,25	-0,03
13	-7,25	-4,90	6,61	-1,73	0,52	1,15	0,79	-7,24	-0,01
14	-7,24	-4,89	6,62	-1,73	0,52	1,15	0,79	-7,24	-0,01
15	-7,24	-4,89	6,62	-1,73	0,52	1,15	0,79	-7,24	0,00

Tabela 12 . Valores das 15 primeiras iterações do recinto com três aberturas.

A seguir será apresentada a aplicação do método de Newton a um problema mais complexo, onde dois recintos com aberturas para o exterior estão conectados, configurando um problema de multi-zonas.

Figura 138 . Ventilação multi-zona

Abertura	área	Cz	Cp
1	7,00	0,30	0,70
2	2,00	0,80	1,00
3	2,00	0,70	-
4	1,2	0,6	-1
5	1,90	0,60	-0,3

Tabela 13 . Dados das aberturas 1, 2, 3, 4 e 5 para o exemplo de cálculo de vazão multi-zona

A figura 138 apresenta um problema no qual duas zonas (α e β) com pressões internas diferentes entre si (P_α e P_β) estão conectadas pela abertura 3.

A vazão na abertura 3 é dada pela diferença de pressão entre suas faces, logo:

$$\Delta P_3 = P_\alpha + P_\beta$$

Assim, as equações do orifício da abertura 3, para os balanços de massa das zonas α e β é:

$$q_{\alpha_3} = a_3 \cdot \frac{P_\alpha + P_\beta}{|P_\alpha + P_\beta|} \cdot \sqrt{|P_\alpha + P_\beta|}$$

$$q_{\beta_3} = a_3 \cdot \frac{-(P_\alpha + P_\beta)}{|P_\alpha + P_\beta|} \cdot \sqrt{|P_\alpha + P_\beta|}$$

Sendo os balanços de massa:

$$q_\alpha = q_1 + q_2 + q_3$$

$$q_\beta = q_3 + q_4 + q_5$$

Da análise das equações anteriores, conclui-se que em casos multi-zona, a vazão em um dos recintos depende não só da sua pressão interna, mas também das pressões dos recintos com os quais este está conectado. No caso, a vazão em cada um dos recintos (q_α e q_β) é função tanto de P_α como de P_β . E os valores de P_α e P_β devem satisfazer as equações de conservação de massa simultaneamente, configurando o sistema:

$$\begin{cases} q_\alpha(P_\alpha, P_\beta) \\ q_\beta(P_\alpha, P_\beta) \end{cases}$$

Neste caso, deve-se resolver o sistema de equações não lineares com duas incógnitas P_α e P_β .

Para a aplicação do método de Newton a montagem das equações do balanço de massa é feita da mesma maneira, assim como a escolha dos valores iniciais de P_α e P_β .

No caso das derivadas, faz-se necessário distinguir as derivadas nas quais P_α é tratada como variável e P_β como constante:

$$\frac{\partial q_3}{\partial P_\alpha}$$

E aquelas nas quais P_β é tratada como variável e P_α como constante:

$$\frac{\partial q_3}{\partial P_\beta}$$

Chamadas derivadas parciais de q .

Desta forma, cada equação de conservação de massa terá tantas derivadas parciais quantas forem as zonas no modelo.

A matriz formada pelo conjunto de derivadas parciais deste sistema é dada a seguir, e é chamada

matriz Jacobiana:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_\alpha}{\partial P_\alpha} & \frac{\partial q_\alpha}{\partial P_\beta} \\ \frac{\partial q_\beta}{\partial P_\alpha} & \frac{\partial q_\beta}{\partial P_\beta} \end{bmatrix}$$

As derivadas parciais são calculadas seguindo as mesmas relações apresentadas anteriormente, baseadas nos valores de a e b de cada equação do orifício, e são apresentadas a seguir:

$$J = \begin{bmatrix} q'_1 + q'_2 + q'_3 & q'_3 \\ q'_3 & q'_3 + q'_4 + q'_5 \end{bmatrix}$$

De forma a utilizar o método de Newton no sistema de equações não lineares é necessário encontrar a matriz inversa deste Jacobiano, J^{-1} . A inversão de matrizes pode ser feita por meio de diversos algoritmos como, por exemplo, o método de Eliminação de Gauss.

Os métodos de inversão do Jacobiano não serão aqui apresentados, e podem ser encontrados em diversos livros-texto sobre matrizes.

No caso de uma matriz 2x2, como é o caso da matriz deste exemplo, a matriz inversa de A pode ser calculada pela equação a seguir:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \cdot \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}$$

Com base na fórmula anterior, o inverso do Jacobiano é:

$$J^{-1} = \frac{1}{(q'_1 + q'_2 + q'_3) \cdot (q'_3 + q'_4 + q'_5) - (q'_3)^2} \cdot \begin{bmatrix} q'_3 + q'_4 + q'_5 & -q'_3 \\ -q'_3 & q'_1 + q'_2 + q'_3 \end{bmatrix}$$

De posse de J^{-1} , das equações de balanço de massa q_α e q_β e dos valores iniciais de P_{α_0} e P_{β_0} , é possível calcular o valor de P_{α_1} e P_{β_1} , pela equação a seguir - equação do método de Newton aplicada a um sistema de equações não lineares com duas incógnitas:

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha_{N+1}} \\ P_{\beta_{N+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\alpha_N} \\ P_{\beta_N} \end{bmatrix} - J^{-1} \cdot \begin{bmatrix} q_{\alpha_N} \\ q_{\beta_N} \end{bmatrix}$$

Simplificando a relação anterior tem-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} P_{\alpha_{N+1}} &= P_{\alpha_N} - D[(q'_3 + q'_4 + q'_5) \cdot q_{\alpha_N} - q'_3 \cdot q_{\beta_N}] \\ P_{\beta_{N+1}} &= P_{\beta_N} - D[-q'_3 \cdot q_{\alpha_N} + (q'_1 + q'_2 + q'_3) \cdot q_{\beta_N}] \end{aligned}$$

Onde D é dado pela relação:

$$D = \frac{1}{(q'_1 + q'_2 + q'_3)(q'_3 + q'_4 + q'_5) - (q'_3)^2}$$

A tabela 14 apresenta os valores das primeiras 13 iterações usando as relações anteriores:

N	P α 0	P β 0	q						dq/dP					D	P α 1	P β 1	q α	q β
			1	2	3	-3	4	5	1	2	3	4	5					
0	17,0	-2,3	-6,08	4,63	7,94	-7,94	1,64	-2,59	1,36	1,03	0,79	0,48	0,76	0,17	13,6	3,46	6,50	-8,90
1	13,6	3,5	-7,90	2,57	5,74	-5,74	2,77	2,39	1,30	1,06	0,81	0,44	0,76	0,17	13,3	3,84	0,42	-0,58
2	13,3	3,8	-8,01	2,38	5,57	-5,57	2,83	2,56	1,30	1,06	0,81	0,44	0,76	0,17	13,3	3,93	-0,06	-0,18
3	13,3	3,9	-8,01	2,37	5,54	-5,54	2,84	2,60	1,30	1,06	0,81	0,44	0,76	0,18	13,3	3,97	-0,10	-0,10
4	13,3	4,0	-8,00	2,39	5,53	-5,53	2,85	2,62	1,30	1,06	0,81	0,44	0,76	0,18	13,4	4,00	-0,08	-0,07
5	13,4	4,0	-7,99	2,41	5,53	-5,53	2,85	2,63	1,30	1,06	0,81	0,44	0,76	0,18	13,4	4,02	-0,06	-0,05
6	13,4	4,0	-7,99	2,42	5,53	-5,53	2,85	2,64	1,30	1,06	0,81	0,44	0,75	0,18	13,4	4,03	-0,04	-0,04
7	13,4	4,0	-7,98	2,43	5,53	-5,53	2,86	2,64	1,30	1,06	0,81	0,44	0,75	0,17	13,4	4,05	-0,03	-0,03
8	13,4	4,0	-7,98	2,43	5,52	-5,52	2,86	2,65	1,30	1,06	0,81	0,44	0,75	0,17	13,4	4,05	-0,02	-0,02
9	13,4	4,1	-7,98	2,44	5,52	-5,52	2,86	2,65	1,30	1,06	0,81	0,44	0,75	0,17	13,4	4,06	-0,02	-0,01
10	13,4	4,1	-7,98	2,44	5,52	-5,52	2,86	2,65	1,30	1,06	0,81	0,44	0,75	0,17	13,4	4,06	-0,01	-0,01
11	13,4	4,1	-7,97	2,44	5,52	-5,52	2,86	2,65	1,30	1,06	0,81	0,44	0,75	0,17	13,4	4,07	-0,01	-0,01
12	13,4	4,1	-7,97	2,44	5,52	-5,52	2,86	2,66	1,30	1,06	0,81	0,44	0,75	0,17	13,4	4,07	-0,01	-0,01
13	13,4	4,1	-7,97	2,45	5,52	-5,52	2,86	2,66	1,30	1,06	0,81	0,44	0,75	0,17	13,4	4,07	0,00	0,00

Tabela 14 . Valores das 15 primeiras iterações do exemplo multi-zonas

As duas últimas colunas apresentam o balanço de massa para cada uma das zonas em cada iteração. Vê-se que na iteração 13, ambas as vazões são iguais a zero, demonstrando que a conservação de massa foi obtida, e que os valores de P α e P β são as raízes das equações.

A aplicação do método apresentado nesta seção em casos com mais zonas e aberturas depende apenas da sua implementação em rotinas computacionais, tendo sido fornecida a base teórica e matemática para a solução do problema do cálculo da vazão por ventilação natural.

11 Considerações finais

A quantificação da ventilação natural por ação dos ventos se apresenta como um desafio do ponto de vista teórico e prático, dada a profusão de áreas do conhecimento, teorias e ferramentas necessárias ao seu estudo.

Contudo, não há dúvida sobre a importância e relevância do tema, seja para a saúde humana, seja para a eficiência energética.

Assim sendo, não resta outra opção àqueles que lidam com as questões do conforto térmico que não a de enfrentar os desafios colocados pelo tema. Aos que não se sentem confortáveis com o aparato matemático, físico e experimental, pois o uso indiscriminado das ferramentas apresentadas neste trabalho conduz a resultados mais nocivos do que aqueles produzidos com o uso da vivência e observação que caracterizam o arquiteto. Melhor o uso do bom senso do que o mau uso de ferramentas.

Quanto ao procedimento, seu uso e prática se mostraram lições de ventilação, pois a física revela o que aos olhos não seria revelado. No decorrer deste trabalho, muitas convicções pessoais foram derrubadas, pois ao confrontar minhas expectativas com o resultado de cada ensaio, de cada simulação fui chamado a refletir sobre as disparidades encontradas. Assim sendo, faz-se fundamental que o trabalho experimental e de simulação seja precedido pela meditação em relação aos resultados esperados, pois assim é possível detectar erros, demolir preconceitos e introjetar a física que rege os fenômenos em estudo.

Dos trabalhos futuros que esta dissertação propõem, desdobram-se duas possibilidades.

A primeira diz respeito ao aprimoramento de cada uma das etapas, sua otimização, automação, refinamento e aferição. Em particular, coloca-se a questão da transposição dos dados de vento para o local de projeto. Trata-se de um procedimento a ser aplicado às diversas cidades brasileiras de modo que o projetista possa obter os parâmetros para a transposição de uma base única, já tratada

e validada. Centraliza-se assim o árduo trabalho de produção de mapas de rugosidade e simulações numéricas para os efeitos do relevo. A definição das características dos caixilhos pode ser colocada nos mesmos termos, lembrando que o caixilho é um item de alto impacto no custo da construção.

Uma segunda alternativa de desdobramento desta pesquisa se dá pela utilização do procedimento aqui proposto como ferramenta no desenvolvimento de projetos com foco na ventilação natural. O arquiteto, de posse de um programa e terreno, pode desenvolver projetos que explorem as potencialidades da ventilação natural, e utilizar o procedimento para quantificar esta ventilação. Para este tipo de pesquisa faz-se necessário o uso de ferramentas de simulação do desempenho térmico do edifício, como o TAS ou o Energy Plus, assim como o uso de um índice de conforto adequado a situação em estudo. Trata-se de investigar novas maneiras de dispor edifícios na cidade, formas e posições das aberturas e a determinação dos sistemas de controle predial para o condicionamento térmico natural.

Por fim, nota-se um paradoxo na comparação da situação retratada no estado da arte do capítulo quatro com o amplo aparato teórico, experimental e computacional apresentado nesta pesquisa. O tema "ventilação natural" na área de conforto térmico no Brasil tem reconhecida importância, porém apenas algumas pesquisas, quase nenhuma base teórica e resultados desprovidos de significado.

Espera-se que esta dissertação contribua para alterar este panorama.

Anexo 1: Vazão interna por simulação direta

A simulação direta para a determinação da vazão no interior do edifício consiste na utilização de modelos em túnel de vento ou em CFD que representem não apenas a parte externa do edifício, mas também as aberturas e a parte interna, permitindo assim medir a vazão de forma direta, sem a determinação de coeficientes de pressão e de descarga.

A figura 139 apresenta diagrama comparando as etapas para a determinação da vazão da forma apresentada nos capítulos 8, 9 e 10 em relação à simulação direta.

Figura 139 . Cálculo pelo modelo de envelope em comparação com a simulação direta

A inclusão da simulação direta nos procedimentos para a PVN se deve aos resultados promissores desta técnica, pois a qualidade das predições obtidas tende a ser bastante superior às realizadas com os métodos descritos nos capítulos 8, 9 e 10. Isto se deve ao fato da simulação direta eliminar as incertezas inerentes à determinação de C_p e C_z , assim como as premissas envolvidas no método de redes para o cálculo de vazão – regime permanente, sem efeito da turbulência e aberturas com

fluxo em apenas uma direção.

A despeito das vantagens da simulação direta, sua aplicação ainda envolve grandes recursos e está limitada a edifícios simples, conforme será apresentado nas próximas seções.

Outra fragilidade da simulação direta é a dificuldade em acoplar este tipo de simulação com as destinadas a avaliar o desempenho térmico do edifício. A ventilação raramente pode ser entendida como um fenômeno isolado cujo juízo de valor pode ser atribuído sem a análise dos demais fenômenos termo-higrométricos do edifício e de um índice de conforto adequado ao caso em estudo. Não foi possível localizar uma metodologia ou exemplo de aplicação que estabeleça uma forma de utilização, em análises do desempenho térmico do edifício, das vazões obtidas pela simulação direta.

Na seção 11.1, serão apresentadas as bases teóricas e o aparato necessário à simulação direta em túnel de vento, conforme CAREY (2005). Um exemplo de aplicação feito no túnel de vento da SBE será apresentado de forma a ilustrar as potencialidades da simulação direta.

Na seção 11.2, o uso de CFD para a simulação direta será apresentado por meio dos trabalhos YANG (2004), de TORRES et. al. (2005) e da Tokyo Polytechnic University. Será também apresentado um exemplo de aplicação produzido com o software CFX.

Vazão interna por simulação direta no túnel de vento

A simulação direta da ventilação em túnel de vento envolve duas especificidades em relação às orientações apresentadas na seção 8.2: garantir a similaridade entre o modelo e o protótipo em relação às aberturas e o aparato e técnica necessários à medição da vazão no interior do modelo. Todas as orientações apresentadas na seção 8.2 se aplicam aos estudos de simulação direta, sendo aqui discutidas apenas as especificidades deste tipo de ensaio.

Similaridade nas aberturas

A similaridade nas aberturas do modelo é obtida quando estas apresentam o mesmo coeficiente de descarga que as aberturas do protótipo. Parte-se do princípio que a similaridade do modelo não foi obtida dadas as altas velocidades necessárias no túnel de vento, e que o ensaio tira partido da independência que os modelos de cantos vivos apresentam em relação à Re . Caso a similaridade no modelo tenha sido obtida, seja em um túnel de velocidade elevada ou de grande seção, a discussão apresentada nesta seção não se aplica, pois, nestas circunstâncias, as aberturas do modelo e do protótipo também serão semelhantes.

Conforme discutido na seção 8.2 e 9.4, as aberturas com cantos vivos devem apresentar independência de Re da abertura. Em realidade não se verifica este comportamento em baixos Re , mesmo para aberturas de cantos vivos.

A figura 130 da seção 9.5 apresenta dados de C_z obtidos em ensaios no túnel de vento da SBE para uma abertura circular de cantos vivos. Nota-se que, para Re da abertura abaixo de 500, o coeficiente de descarga é bastante dependente de Re , ou seja, nestes ensaios a abertura do modelo não se comportou como a abertura do protótipo e, portanto as vazões medidas nestes ensaios não correspondem a realidade. O valor de Re da abertura no qual se obtém independência é chamado Re crítico, e é fundamental monitorar não só a vazão no modelo, mas também os coeficientes de descarga das aberturas, de modo que seja garantido que o Re crítico foi obtido.

Nos casos em que o coeficiente de descarga nas aberturas não é medido no experimento, é impossível determinar se os resultados de vazão encontrados são válidos.

O valor de Re da abertura varia basicamente com a velocidade do ar através da mesma. Quanto maior a velocidade no túnel de vento, maior será a vazão no modelo e maior será o Re da abertura, e conseqüentemente maior a chance de Re crítico ter sido atingido. Conclui-se que em experimento de simulação direta de ventilação por ação dos ventos deve-se utilizar a maior velocidade possível no túnel.

A figura 140 apresenta as relações entre C_z e Re para uma chaminé, obtidas em experimentos de simulação direta no túnel da SBE, e comparados com os resultados obtidos por CHIU (2005).

Figura 140 . Dependência entre C_z e Re para a chaminé utilizada no ensaio.

Uma vez que a chaminé não pode ser considerada uma abertura de cantos vivos, o gráfico apresenta a forte dependência da mesma em relação à Re , não sendo possível obter um valor crítico que garanta similaridade aos resultados. Nestes casos o uso de simulação direta fica comprometido, e os resultados obtidos devem ser encarados como indicadores do comportamento, e não como previsões da vazão da ventilação natural por ação dos ventos.

Medição da vazão

Medir a vazão representa um desafio em qualquer área de aplicação, pois não se trata de uma grandeza básica como a temperatura ou o comprimento, e sim da conjunção das características dimensionais da abertura, da massa específica do fluido e do perfil de velocidades.

O método mais adequado para a medição da vazão por ventilação natural em modelos é a utilização de um gás traçador. (CAREY, 2005) Este método é comumente empregado na medição de vazão em edifícios reais e uma descrição das variantes desta técnica pode ser obtida em AWBI (1998).

Para a medição da vazão com o uso de um gás traçador são necessários o gás e um sensor de concentração deste gás.

Em geral é utilizado o gás SF_6 , por tratar-se de um gás inerte, não tóxico em baixas concentrações e cuja concentração na atmosfera é irrelevante. No Brasil o SF_6 é comercializado pela White Martins.

Outros gases como o CO_2 , CO , N_2O podem ser utilizados, sendo os sensores em geral mais baratos. Contudo deve-se atentar para a presença dos mesmos na atmosfera e do seu efeito em altas concentrações à saúde humana.

Existem no mercado diversos sensores de concentração de gases, cujas dimensões, princípios de funcionamento, níveis mínimos de detecção e preços apresentam grande variação. Fabricantes como a INNOVA, ONSET, Leybold-Heraeus (Binos) e B&K comercializam soluções para a medição da concentração de gases. É importante ressaltar que, durante o experimento, o sensor será acondicionado no interior do modelo, sendo a sua dimensão um dado importante na definição da escala a ser utilizada.

A medição de vazão por meio do monitoramento da concentração de um gás parte do princípio que, ao promover a renovação de ar, a ventilação reduz a concentração de gases presentes no recinto. Um exemplo deste princípio de medição ocorre quando os odores presentes em um recinto são diluídos após a abertura das janelas, e esta redução é captada pelo sistema olfativo humano. Pela comparação entre os odores existentes no recinto antes da abertura das janelas (C_0) e daqueles percebidos (C) após um tempo (t), é possível estimar a vazão (Q) promovida pela ventilação natural.

No caso da medição da vazão, o gás traçador escolhido é introduzido no modelo e as aberturas são fechadas com fitas adesivas, de modo a permitir a medição da concentração inicial do gás (C_0). O túnel de vento é então posto em operação e as fitas adesivas são removidas permitindo a passagem de ar pelas aberturas. A concentração do gás passa a ser monitorada, e após um dado intervalo de tempo (t) é possível determinar a vazão (Q) no modelo pela fórmula (AWBI, 1998):

$$Q = \frac{V \cdot (\ln C_o - \ln C)}{t}$$

onde V é o volume interno do modelo e as concentrações são dadas em PPM (partes por milhão).

Em condições de regime permanente, a vazão deve ser constante, de modo que eventuais desvios no início do experimento possam ser percebidos e removidos e de forma que seja possível perceber a eficiência da ventilação.

A obtenção da vazão no protótipo, em modelos com independência de Re, é feita pela multiplicação da vazão encontrada pelo fator de escala do modelo.

Está técnica presume que a concentração do gás traçador é uniforme no interior do modelo, o que só ocorre se as aberturas forem pequenas em relação ao volume interno do modelo, e se um ventilador for colocado no interior do modelo para promover a mistura do ar. CAREY (2005) posicionou o ventilador próximo ao sensor de concentração do gás, e em um ponto do interior do modelo distante das aberturas.

A técnica aqui descrita se aplica ao estudo de ventilação em uma única zona. AWBI (1998) descreve algumas técnicas para o uso de traçadores para várias zonas interconectadas, mas o acréscimo no número de sensores e tipos de gás em uso torna este tipo de experimento muito mais complexo.

Sumarizando os pontos fracos desta técnica tem-se:

- necessidade de grandes aberturas e velocidade para obter similaridade;
- necessidade de espaço no interior do modelo para o sensor e o ventilador;
- necessidade de ventiladores no interior do modelo, que modificam escoamento;
- dificuldade na simulação de edifícios com múltiplas zonas.

Como conclusão, entende-se que as dificuldades impostas pelas questões de similaridade e das dificuldades relativas ao experimento dificultam a aplicação da simulação direta à edifícios reais.

Contudo, a fidelidade das predições realizadas é um ponto forte da simulação direta, e que justifica seu uso em trabalhos científicos ou edifícios onde se faça necessária uma avaliação de alta qualidade.

Outra técnica que permite a medição da vazão foi desenvolvida por CHIU (2004) para edifícios dotados de uma chaminé e uma abertura, sendo de uso bastante restrito, porém oferecendo uma análise detalhada do fluxo na chaminé.

O uso de anemômetros posicionados nas aberturas não é aconselhável (YANG, 2004), salvo em túneis de vento de grande seção, como modelos em escala 1:1, de forma que o campo de velocidades na abertura possa ser mapeado por meio de sucessivas medidas ao longo da abertura.

Exemplo de aplicação

De forma a exemplificar as potencialidades da simulação direta em estudos de ventilação natural foram realizadas testes no túnel de vento da SBE. Alguns resultados destes ensaios foram apresentados nos capítulos 8 e 9, para demonstrar as tomadas de pressão e os coeficientes de descarga encontrados.

A figura 141 apresenta um esquema do modelo utilizado nos ensaios, com a convenção de direção do vento adotada, e o posicionamento de cada uma das aberturas do modelo: um orifício circular e uma chaminé.

Figura 141 . Esquema do modelo ensaiado

O modelo consiste em um paralelepípedo com largura de 250mm, comprimento de 500mm e altura de 200mm.

O orifício é uma abertura circular com diâmetro de 16,3 mm e espessura de 1mm, posicionada a 45mm da base do modelo e centralizada na face em relação à largura.

A chaminé possui dimensões externas de 80x40x20mm, e internamente sua seção varia conformando um "Venturi" de seção máxima 30x10mm e mínima 10x10mm.

A técnica utilizada para a determinação da vazão foi desenvolvida por CHIU (2004), e consiste na introdução, na seção mínima do Venturi, de dois anemômetros de fio quente (Dantec 55P71-Dantec MiniCTA system), próximos e paralelos. Quando o fluxo passa pela chaminé, os anemômetros registram a velocidade do fluido, que pode ser considerada uniforme na seção. O produto da velocidade registrada pela seção do Venturi fornece a vazão instantânea. Devido à presença de obstáculos externos o fluxo na chaminé, que em geral é ascendente, pode ser invertido, conforme exemplificado na figura 142.

A utilização de dois anemômetros permite que o sentido do fluxo seja determinado, pois o primeiro anemômetro, na direção do escoamento, provoca uma redução da velocidade registrada pelo segundo anemômetro. Pela comparação das velocidades é possível determinar o sentido do fluxo a cada instante.

Figura 142 . Exemplo de situação com fluxo reverso na chaminé

A figura 143 apresenta um exemplo das velocidades registradas pelos anemômetros em um escoamento provocado por um pistão conectado ao orifício do modelo. O pistão provoca uma oscilação regular na direção do fluxo, que é percebida pela alternância entre o anemômetro que registra a velocidade mais alta.

Figura 143 . Velocidades registradas pelos anemômetros de fio quente sob o efeito do escoamento provocado por um pistão (à esquerda). Foto do pistão (à direita)

A calibração dos anemômetros foi feita in loco, conforme técnica descrita na seção 8.2.3

A pressão provocada pelo vento em cada uma das aberturas foi medida conforme descrito na seção 8.2.4. Com base na vazão e nas pressões medidas, foram calculados os coeficientes de descarga da chaminé (apresentada na seção 11.1) e do orifício (apresentado na seção 9.5).

Cada ensaio teve duração de 34,1 segundos a uma taxa de aquisição de 30Hz, num total de aproximadamente 1.000 leituras por ensaio.

Os testes foram realizados com o intuito de estudar a transição entre a situação de fluxo ascendente e o fluxo reverso.

Quem determina o sentido do fluxo, conforme visto no capítulo 8, é a diferença de pressão entre as aberturas. Contudo, quando esta diferença é pequena, a magnitude do desvio padrão da diferença de pressão se torna importante. Neste contexto o fluxo passa a ser dominado pela turbulência, apresentando, em um mesmo ensaio, ambas as direções alternadamente. (ETHERIDGE,

2000) Os ensaios foram planejados de forma a produzir uma ampla gama de diferenças de pressão entre as aberturas, com diferentes padrões de escoamento sobre a chaminé e conseqüentemente diversos desvios padrão desta diferença de pressão. Isto foi feito por meio da colocação de blocos de diferentes tamanhos e posições na cobertura do modelo.

A figura 144 apresenta as configurações utilizadas durante os ensaios.

Figura 144. Configurações de obstruções utilizadas durante os ensaios.

Para cada configuração os testes foram realizados em diferentes velocidades do vento no túnel, e diferentes orientações totalizando 83 ensaios.

A tabela 15 sumariza os ensaios realizados.

Teste	ϕ (deg)	U (m/s)	configuração	s (mm)
Variando a velocidade	90	1 to 5	A	-
	0	1 to 5	A	-
	180	1 to 5	A	-
	180	1 to 5	B	60
	180	1 to 5	C	270
Efeito da geometria	180	2.7	C	60 to 300
	180	2.7	D	5 to 140

Tabela 15 . Sumário dos ensaios em túnel de vento

A figura 145 apresenta a vazão medida em um ensaio onde o sentido do fluxo é alternado durante o ensaio.

Nota-se que a magnitude das oscilações da velocidade é da mesma ordem que a média da velocidade. Sendo o sinal da velocidade indicador da direção do fluxo, também é possível observar que a despeito da velocidade ser positiva na maior parte do ensaio, em diversos momentos ela

apresenta sinal negativo sendo o fluxo reversos nestes períodos.

Figura 145. Velocidade registrada na chaminé posicionada em zona de alta turbulência

A ocorrência de fluxo reverso na chaminé foi analisada em função da diferença de pressão entre as aberturas (ΔC_p) e do desvio padrão desta diferença (σ) calculado com base nas diferenças de pressão instantâneas medidas nas 1.000 leituras efetuadas.

Na figura 146 é apresentada a porcentagem de fluxo reverso registrado em função do parâmetro adimensional de pressão ($\Delta C_p/\sigma$). Cada ponto representa um dos ensaios da tabela 15.

Figura 146 . Porcentagem de fluxo reverso. Os pontos vazados são resultados de CHIU (2004)

Nota-se que, quando a diferença de pressão (ΔC_p) é menor que o desvio padrão (σ), ambos os

sentidos do fluxo estão presentes em um mesmo ensaio, e a porcentagem de fluxo reverso varia entre 0% (fluxo para fora) e 100% (fluxo para dentro).

Vazão interna por simulação direta com CFD

A simulação direta por simulação de CFD é uma promissora alternativa para a predição da ventilação natural por ação dos ventos.

As diretrizes estabelecidas nas seções 8.3 e 9.2 devem ser seguidas para garantir a obtenção de resultados de qualidade, porém a geração de uma malha compatível com o ambiente externo e interno é um desafio que requer experiência prévia do usuário em ambas as escalas de simulação de CFD. Outra dificuldade relacionada à simulação direta reside na grande demanda computacional, pois as malhas necessárias para simular os ambientes externo e interno simultaneamente demandam capacidade de processamento e memória acima da normalmente encontrada em computadores pessoais.

Uma forma de reduzir a demanda computacional em simulações deste tipo é o uso de paredes sem espessura (thin walls), pois isto permite uma diminuição significativa no número de elementos da malha junto das aberturas.

O estudo de YANG (2004) comparou as vazões obtidas por simulação direta de CFD com a vazão medida em um protótipo pelo uso de um gás traçador. O modelo de CFD utilizou paredes sem espessura com o modelo de turbulência RNG k- ϵ .

O protótipo – um cubo com aresta de 6m dotado de duas aberturas em faces opostas – foi construído em uma área desobstruída, conforme demonstrado na figura 147 à esquerda. A figura 147 à direita apresenta o modelo de CFD deste protótipo.

Figura 147 . Protótipo e Modelo de CFD comparados por YANG (2004)

A conclusão de YANG (2004), amparada por resultados como os da figura 146, é de que o conjunto das simulações diretas realizadas subestimou a ventilação em 12% na média. No caso das janelas posicionadas paralelas ao fluxo, os erros foram de até 300% como apresentados na figura 148.

Figura 148 . Comparação entre a vazão medida em um protótipo e a simulada em CFD (YANG, 2004) para duas direções do vento: 0° e 90°

Abrindo mão da qualidade da simulação, é simples produzir resultados meramente visuais de simulação interna. Assim, em caráter meramente exploratório foi realizada uma simulação direta de CFD sem maiores considerações sobre qualidade da malha, convergência, dimensões do domínio, condições de contorno e adequação do modelo de turbulência.

Utilizou-se como modelo um edifício residencial, com 6x20m e dois pavimentos, acessados por uma escada externa (não modelada), composto por três módulos conforme apresentado na figura 149.

Figura 149 . Modelo de UH objeto da simulação exploratória de CFD: Elevações e planta humanizada

Este tipo de planta da unidade habitacional (UH) é bastante propícia à ventilação por ação dos ventos, pois há janelas nas faces a barlavento e sotavento. Um programa do Governo Federal está construindo aproximadamente 1500 UH deste tipo no município de Guarulhos, na Grande São Paulo.

A figura 150 (à esquerda) mostra o campo de velocidades em um plano horizontal a 5m de altura, mostrando a área onde incide o vento a 3m/s (em magenta, a esquerda), o edifício e a UH analisada, e a área de baixas velocidades na parte posterior do mesmo (vermelho e laranja, a direita).

É curioso notar que existe uma área de grande velocidade nas laterais do edifício, provocada

pelo pequeno recuo deixado entre as bordas do edifício e os limites da simulação. Obviamente esta aceleração não tem qualquer correspondência com a realidade.

Figura 150 . Campo de velocidade em um plano horizontal em uma simulação direta para determinação da vazão com o CFX. À esquerda, todo o domínio; à direita e ao centro , a UH ampliada.

Na figura 150 (à direita), observa-se a ampliação da UH, em uma planta na altura dos caixilhos.

Pode-se ver claramente que as maiores velocidades estão junto às janelas a barlavento, decrescendo na direção dos cômodos a sotavento.

As vazões para cada abertura foram obtidas no CFX-POST, pela construção de "user surfaces" no plano da abertura usadas posteriormente como locações para a função "calculator", que integra a vazão em um dado plano.

Conforme exposto na seção 8.3, a apresentação conjunta dos resultados e dos parâmetros de entrada em simulações de CFD permite o entendimento da qualidade da simulação e por consequência dos resultados obtidos.

Figura 151 . Exemplos de simulação direta produzidos por TORRES et. al. (2005) e pela Tokyo Polytechnic University, acessado em 10.08.2006 em http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/ventilation/CFD_Result_vec0.html.

Diversos trabalhos, como TORRES et. al. (2005) e os ensaios realizados pela equipe da Tokyo Polytechnic University apresentam resultados e conclusões obtidas com simulação direta de CFD sem qualquer menção aos parâmetros de entrada. A figura 151 apresenta exemplos dos resultados

obtidos nestes dois estudos.

Nota-se que é impossível diferenciar a qualidade da simulação pela simples comparação da figura anterior com o trabalho de YANG (2004) e as imagens do exercício exploratório produzido nesta dissertação.

Anexo 2: Modelo de Relatório de Simulação de CFD

Introdução

Esta simulação tem por objetivo determinar os coeficientes de pressão para o edifício tipo do Conjunto Habitacional Residencial Petrópolis.

Estes coeficientes de pressão se destinam ao cálculo das vazões internas de ar por efeito do vento. Assim sendo, os pontos para a leitura dos dados de pressão foram posicionados no centro das janelas das unidades habitacionais do pavimento térreo e do 4º e último andar.

Nesta simulação, ainda de caráter exploratório da ferramenta computacional adotada, o software comercial CFX, foi adotada uma malha relativamente espaçada, e um perfil de ventos com rugosidade de 0,001. O piso e demais fronteiras sólidas no interior do modelo foram definidos como lisos, sem rugosidade.

O relatório contém:

- o projeto do edifício utilizado como base da simulação;
- as variáveis de entrada utilizadas na simulação;
- os coeficientes de pressão calculados para os pontos de interesse.

Esta simulação integra um conjunto de simulações parte da pesquisa de mestrado: "Ventilação Natural por Ação dos Ventos: Procedimento para quantificação".

Projeto do Residencial Petrópolis

Os conjuntos habitacionais de interesse social Residencial Petrópolis 1 e 2 estão localizados no município de Guarulhos, na região metropolitana de São Paulo. Eles são exemplos típicos dos conjuntos habitacionais construídos por meio de programas estatais de acesso à moradia.

Figura 152 . Foto dos Residenciais Petrópolis 1 e 2

Figura 153 . Planta do pavimento térreo do edifício tipo s/esc. Medidas em metros.

Figura 154 . Planta do apartamento tipo s/esc. Medidas em metros.

Figura 155 . Elevações do edifício tipo s/esc. Medidas em metros.

Figura 156 . Posição dos pontos a determinar o coeficiente de pressão. S/esc. Medidas em metros.

Figura 157 . Nomenclatura dos cômodos e direção do vento nas simulações

CFX: Modelo 3D

Arquivo .db: Petro1-vol4.db

Largura x Altura x Profundidade em estudo (m)	18,25 x 12,70 x 15,50
Maior área visível pelo vento (m²)	341
Menor dimensão detalhada no modelo (m)	0,6
Menor distância entre elementos (m)	2,0
Forma do domínio	Prisma de base octogonal
Dimensão do domínio	150 m de diâmetro, 60m de altura
$H_{\text{modelo}}/H_{\text{domínio}}$	0,25
% Obstrução	3,7%
Distância livre a sotavento (em função de H_{modelo})	$4 H_{\text{modelo}} = 60\text{m}$

CFX: 3D Region

Nome do Domínio	Domain
Imagem

CFX: 2D Region

CFX: Malha

Parâmetros da Malha (Set - Mesh Parameter)

Comprimento	4,93
Surface Mesh Spacing	Use volume mesh
Adjust Meshing Spacings	desmarcado
Apply Stretch	desmarcado

Parâmetros de Proximidade (Set - Proximity)

Proximity	Edge marcado
Número de nós entre os elementos	4

Parâmetros da Borda Inflada (Set - Inflated boundary)

Número de camadas	-
Fator de expansão	-

Marcar a caixa "especificar distância do primeiro nó"

Distância do 1º nó	-
--------------------	---

Checar se houve mensagem de erro

Criar controle da malha (Create-Mesh Control-Type:surface)

Nome da 2D region	Mesma faces da 2d region predio
Tipo de mesh control	Surface
Valores: Tipo	Constant
Comprimento máximo	0,5
Fator de expansão	1,2
Raio de Influência	0

Go

Nome do arquivo .gmt	
Quantidade de volumes	
caixa "with inflation"	desmarcado

Imagens

Estatísticas da Malha no CFX-Post

Statistics

Number of Nodes	85769
-----------------	-------

Number of Elements	461856
Tetrahedra	461856
Wedges	0
Pyramids	0
Hexahedra	0

Calculate

Volume Domain [m ³]	1083230
Domain Volume / Number of Elements [m ³ / Element] (calculado manualmente)	2,3

Element Volume Ratio

Mínimo	1
Máximo	46.8914

Minimum Face Angle

Mínimo [degree]	5.27473
Máximo [degree]	90

CFX: Pre

Domain

General Options

Location	domain
Domain Type	Fluid Domain
Fluids list	Air Ideal gas
Coord Frame	Coord 0
Particle Tracking	Desmarcado (default)
Domain Models	
Reference Pressure	(atm)
Buoyance Option	Non Buoyant
Domain Motion Option	Stationary

Fluid Models

Heat Transfer Model – Option	Isothermal
Fluid Temperature (°C)	20
Turbulence Model – Option	k-Epsilon

Turbulent Wall Functions – Option	Scaleble (default)
Reaction or Combustion Model – Option	none (default)
Thermal Radiation Model – Option	none (default)
Additional Variable	u1
	v1

Initialisation

Domain Initialisation	Desmarcado (default)
-----------------------	----------------------

Simulation Type

Simulation Type	Steady State
-----------------	--------------

Solver Control

Basic Settings

Advection Scheme	High resolution
Convergence Control	
Timescale Control	Auto TimeScale (default)
Max N° Iterations	100 (default)
Length Scale Option	Conservative (default)
Maximum Timescale	Desmarcado (default)
Convergence Criteria	
Residual Type	RMS
Residual Target	0,0001
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)

CFX: Boundaries

Opening

Basic Settings

Boundary Type	Opening
Location	Laterais
Coord Frame	Desmarcado (default)

Boundary Details

Flow Regime - Option	Subsonic
Mass and Momentum	
Option	Cart. Vel. Components
U	u1
V	v1
W (m/s)	0
Turbulence	
Turbulence - Option	Medium (intensity=5%)

Piso

Basic Settings

Boundary Type	Wall
Location	Piso
Coord Frame	Desmarcado (default)
Create Thin Surface Partner	Desmarcado (default)

Boundary Details

Wall Influence on flow - Option	No slip
Wall Velocity	Desmarcado (default)
Wall Roughness	
Option	Smooth Wall

Prédio

Basic Settings

Boundary Type	Wall
Location	predio
Coord Frame	Desmarcado (default)
Create Thin Surface Partner	Desmarcado (default)

Boundary Details

Wall Influence on flow - Option	No slip
Wall Velocity	Desmarcado (default)
Wall Roughness	
Option	Smooth Wall

Teto

Basic Settings

Boundary Type	Wall
Location	teto
Coord Frame	Desmarcado (default)
Create Thin Surface Partner	Desmarcado (default)

Boundary Details

Wall Influence on flow - Option	Free slip
---------------------------------	-----------

CFX: Solver

CCS file

LIBRARY :

CEL :

EXPRESSIONS :

```

unitlen = 1. [ m ]
unittime = 1. [ s ]
unitvel = 1. [ m^1s^-1 ]
ak = 0.41 [ ]
cmu = 0.09 [ ]
cmuhalf = cmu^0.5
gradh = 500*unitlen
pi180 = pi/180
dir = 0
dira = (180 + dir)*pi180
thetaa = dira
zref = 0.0*unitlen
zuref = 150*unitlen
uref = 5.564*unitvel
z0 = 0.001*unitlen
epsinner = 0.4*unitlen
epsouter = 1.5*unitlen
ustar = ak*uref/loge((zuref-zref)/z0)
zmod = abs(z + 0.005*unitlen)
speed = ustar*loge((zmod-zref)/z0)/ak
u1 = speed*sin(thetaa)
v1 = speed*cos(thetaa)
te1 = (ustar^2)/cmuhalf
ed1 = (ustar^3)/(ak*(zmod-zref))
tamb = 288.15 [ K ]
pref = 101325. [ Pa ]
rgas = 287.09601 [ J kg^-1 K^-1 ]
denref = pref/(rgas*tamb)
pamb = pref*(exp(-g*z/(rgas*tamb))-1.0)

```

END

END

END

Nota: este arquivo CCS é um exemplo para direção 0° (dir=0). Nas demais simulações foram utilizados outros arquivos CCS com as respectivas direções. O restante do arquivo não foi alterado.

Batch file

```
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-n.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-nne.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-nee.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-e.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-see.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-sse.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-s.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-sso.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-soo.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-o.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-noo.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def  
c:/cfx56/cfx-5.6/bin/5.6/cfx5solve.exe -ccl c:/cfx56/daniel/windcel-nno.ccl -def c:/cfx56/daniel/petro4r001smooth/par4-inf.def
```

Informações do Processamento

Tempo de Processamento

Processador	Pentium (LABAUT ZE)
Memória RAM	500MB
Paralelo	Não
Tempo de processamento total	12 simulações de 1h20m cada = 16h

Resíduos

Equation	RMS Res	Max Res
U-Mom	2.3e-03	1.0e-01
V-Mom	2.7e-03	7.4e-02
W-Mom	1.4e-03	4.3e-02
P-Mass	2.3e-04	5.1e-03
K-TurbKE	4.0e-03	1.1e-01
E-Diss.K	5.7e-03	2.2e-01

Valores e gráficos da simulação com direção 0°

Motivo do término da simulação	Número máximo de iterações atingido
--------------------------------	-------------------------------------

Balances de momento e massa nas bordas do domínio

Equation	Domain Imbalance	Domain Imbalance, in %:
U-Mom	-4.3825e+01	-0.0438 %
V-Mom	3.9678e+00	0.0040 %
W-Mom	3.5410e+00	0.0035 %
P-Mass	1.0352e-01	0.0005 %

Valores da simulação com direção 0°

CFX: Post

Yplus Piso

Mínimo	4,77E+01
Máximo	1,68E+04
Média	5,12E+03

Valores da simulação com direção 0°

Coeficientes de Pressão Calculados

Pressão dinâmica no escoamento livre [Pa]	12,18
Altura de referência [m]	15,43

Direção do Vento 0° nas cozinhas dos apartamentos de final 1 e 2 , sentido horário.

	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
01 sala11	-0,61	-0,06	0,60	0,79	0,69	0,24	-0,42	-0,53	-0,62	-0,14	-0,53	-0,23
03 cozinha 11	0,70	0,57	-0,07	-0,59	-0,47	-0,37	-0,08	-0,43	-0,59	-0,65	-0,07	0,53
03 quarto a11	-0,65	0,15	0,61	0,17	-0,07	-0,14	-0,76	-0,24	-0,46	-0,34	-0,58	-0,41
04 quarto b11	-0,63	0,25	0,63	0,49	0,10	-0,10	-0,61	-0,39	-0,52	-0,15	-0,58	-0,53
05 sanitario11	0,65	0,63	-0,08	-0,56	-0,43	-0,34	-0,14	-0,46	-0,60	-0,62	-0,13	0,42
06 sala 12	-0,30	-0,26	-0,60	-0,33	-0,56	-0,55	-0,46	0,21	0,67	0,81	0,67	0,20
07 cozinha 12	0,71	0,48	-0,12	-0,59	-0,60	-0,42	-0,04	-0,39	-0,47	-0,66	-0,02	0,62
08 quarto a12	-0,34	-0,41	-0,64	-0,38	-0,43	-0,26	-0,65	-0,14	-0,04	0,22	0,68	0,16
09 quarto b12	-0,34	-0,58	-0,65	-0,36	-0,48	-0,39	-0,46	-0,10	0,10	0,54	0,70	0,23
10 sanitario 12	0,67	0,38	-0,19	-0,57	-0,61	-0,46	-0,03	-0,34	-0,41	-0,65	-0,02	0,68
11 sala 13	-0,38	-0,57	-0,61	-0,34	-0,57	-0,25	-0,33	0,17	0,62	0,81	0,72	0,23
12 cozinha 13	-0,14	-0,45	-0,60	-0,75	-0,10	0,51	0,71	0,60	-0,06	-0,63	-0,42	-0,35
13 quarto a13	-0,33	-0,28	-0,47	-0,47	-0,61	-0,39	-0,40	0,13	0,63	0,14	0,02	-0,12
14 quarto b13	-0,13	-0,41	-0,52	-0,51	-0,62	-0,56	-0,39	0,20	0,65	0,49	0,14	-0,09
15 sanitario 13	-0,13	-0,48	-0,60	-0,65	-0,16	0,40	0,67	0,66	-0,07	-0,71	-0,38	-0,32
16 sala 14	-0,56	0,26	0,67	0,79	0,62	0,12	-0,28	-0,29	-0,58	-0,17	-0,51	-0,48
17 cozinha 14	-0,16	-0,42	-0,49	-0,84	-0,05	0,60	0,71	0,51	-0,11	-0,56	-0,56	-0,39
18 quarto a14	-0,34	-0,18	-0,07	0,09	0,63	0,13	-0,59	-0,44	-0,64	-0,42	-0,42	-0,23
19 quarto b14	-0,40	-0,16	0,10	0,47	0,65	0,24	-0,54	-0,59	-0,66	-0,54	-0,46	-0,35
20 sanitario 14	-0,21	-0,39	-0,47	-0,88	-0,05	0,66	0,66	0,40	-0,18	-0,53	-0,58	-0,42
21 sala 41	-0,56	0,27	0,71	0,82	0,80	0,15	-0,46	-0,47	-0,59	-0,19	-0,53	-0,40
22 cozinha 41	0,87	0,67	-0,03	-0,40	-0,51	-0,43	-0,40	-0,47	-0,54	-0,74	-0,05	0,63
23 quarto a 41	-0,61	0,09	0,78	0,57	0,14	-0,12	-0,47	-0,54	-0,60	-0,40	-0,60	-0,52
24 quarto b41	-0,58	0,20	0,68	0,71	0,30	-0,10	-0,55	-0,48	-0,58	-0,43	-0,61	-0,55
25 sanitario 41	0,84	0,74	0,03	-0,35	-0,50	-0,39	-0,39	-0,50	-0,57	-0,62	-0,12	0,52
26 sala 42	-0,26	-0,36	-0,60	-0,33	-0,57	-0,54	-0,44	0,22	0,75	0,84	0,67	0,19
27 cozinha 42	0,87	0,57	-0,10	-0,48	-0,55	-0,46	-0,39	-0,44	-0,51	-0,78	0,03	0,73
28 quarto a42	-0,37	-0,54	-0,65	-0,37	-0,59	-0,53	-0,39	-0,13	0,13	0,57	0,84	0,10
29 quarto b42	-0,37	-0,58	-0,67	-0,35	-0,56	-0,48	-0,44	-0,14	0,24	0,73	0,71	0,18
30 sanitario 42	0,85	0,47	-0,18	-0,53	-0,57	-0,49	-0,38	-0,41	-0,49	-0,75	0,08	0,80
31 sala 43	-0,32	-0,55	-0,60	-0,34	-0,57	-0,32	-0,36	0,17	0,62	0,84	0,80	0,25
32 cozinha 43	-0,38	-0,48	-0,55	-0,66	-0,09	0,60	0,88	0,69	-0,02	-0,75	-0,48	-0,40
33 quarto a 43	-0,34	-0,55	-0,61	-0,57	-0,62	-0,53	-0,46	0,08	0,79	0,53	0,15	-0,10
34 quarto b43	-0,31	-0,50	-0,59	-0,67	-0,64	-0,57	-0,43	0,15	0,66	0,70	0,25	-0,13
35 sanitario 43	-0,38	-0,51	-0,57	-0,67	-0,16	0,49	0,85	0,76	0,03	-0,89	-0,46	-0,36
36 sala 44	-0,54	0,07	0,77	0,82	0,74	0,29	-0,45	-0,47	-0,58	-0,19	-0,53	-0,41
37 cozinha 44	-0,38	-0,45	-0,51	-0,57	-0,01	0,70	0,88	0,59	-0,09	-0,58	-0,51	-0,43
38 quarto a44	-0,42	-0,16	0,09	0,54	0,80	0,05	-0,46	-0,55	-0,64	-0,39	-0,58	-0,49
39 quarto b44	-0,50	-0,13	0,27	0,74	0,71	0,23	-0,50	-0,60	-0,66	-0,41	-0,55	-0,43
40 sanitario 44	-0,38	-0,42	-0,50	-0,52	0,04	0,77	0,85	0,48	-0,17	-0,50	-0,54	-0,45

Distribuição dos Coeficientes de Pressão nas Faces

60°

$\overline{C_p}$

90°

Referências Bibliográficas

- ABNT. NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações – PARTE 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. São Paulo: ABNT, 2005.
- ABNT. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. São Paulo: ABNT, 1988.
- ALLARD, F. Natural ventilation in buildings: a design handbook. London: James & James Science Publishers, 1998.
- ALVES, Silvana e SANTOS, Andréia. Análise de implantação em conjunto habitacional – estudo de caso: Nobuji-Nagasawa. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- ANDERSON, J. Computational Fluid Dynamics. New York: McGrawHill, 1995.
- ASHRAE. Handbook of Fundamentals. American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta: ASHRAE, 1997.
- ASHRAE. Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2004.
- ASSIS, Eleonora S. A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005, p. 92-101.
- ATARASSI, Roberto Terumi. Modelagem do microclima em casa-de-vegetação. Piracicaba, 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo.
- ATEM, Camila Gregório. Apropriação e eficiência dos dispositivos de proteção solar utilizados na arquitetura moderna: o caso de Londrina (PR). São Carlos, 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- AYNSLEY, R. M., MELBOURNE, W. e VICKERY, B. J. Architectural aerodynamics. London: Applied Science Publishers, 1977.
- AWBI, H.B. Ventilation of buildings. London: E & FN Spon, 1998.
- BACCHI, Federico. Estudio Eólico Centro Empresarial Neuquén. In: Workshop de Engenharia de Ventos – IPT, II, São Paulo, 2005.
- BATCHELOR, G. K. An introduction to fluid dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- BSI. BS 5925:1991: Code for practice for Ventilation principles and designing for natural ventilation. BSI, 2000.
- BSI. BS EN 13141-1:2004: Ventilation for buildings – Performance testing of componentes/products for residential ventilation – Part 1: Externally and internally mounted air transfer devices. BSI, 2004.
- BUNGE, Mario. Teoria e realidade. São Paulo: Perspectiva, 1974.
- CAMPONEZ DO BRASIL, René Porfírio. Utilização de exaustores eólicos no controle da temperatura e da ventilação em ambiente protegido. Piracicaba, 2004. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo.
- CÂNDIDO, Christhina; TORRES, Simone; BITTENCOURT, Leonardo. Avaliação do uso de peitoril ventilado para melhorar a ventilação natural em edificações: estudo de caso em núcleo de pesquisa multidisciplinar em Maceió/AL. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- CARDOSO, Sara; PESSOA, Ivvy; BITTENCOURT, Leonardo. Avaliação de utilização de captadores de vento numa

- edificação da Universidade Federal de Alagoas. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- CAREY, P. Direct wind tunnel modeling of natural ventilation for design purposes. Nottingham, 2005. Tese (Doutorado) - School of the Building Environment, The University of Nottingham.
- CAVALCANTI, Fernando; CÂNDIDO, Christhina; BITTENCOURT, Leonardo. Avaliação da ventilação natural em espaços de sala de aula a partir da implantação de pérgulas. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- CCOYLLO, Ódon. Interação entre os poluentes atmosféricos e a circulação local na cidade de São Paulo. São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado) - Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo.
- CFX. CFX 5 Solver Models. Didcot Oxfordshire: CFX, 2003.
- CHIU, Y-H.; ETHERIDGE, D. W. External flow effects on the discharge coefficients of ventilation openings. Submitted to Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005.
- CHIU, Yin-Hao. Development of Unsteady Design Procedures for Natural Ventilation Stacks. Nottingham, 2004. Tese (Doutorado) - School of the Built Environment, The University of Nottingham.
- CIBSE. AM10: Natural ventilation in non-domestic building. London: CIBSE, 2005.
- COST. Cost Action 14: Recommendations on the use of CFD in predicting Pedestrian Wind Environment. Bruxelas: COST, 2004.
- COSTA, Lucio. Registro de uma vivência. São Paulo: Empresa das Artes, 1995.
- COSTOLA, D.; ALUCCI, M. Humano: Software para avaliação do desempenho térmico da edificação. In: ENCAC, VI, Curitiba, 2003. Anais do VI ENCAC: ANTAC, 2003.
- COSTOLA, D.; ETHERIDGE, D. W. Unsteady natural ventilation at model scale - flow reversal and discharge coefficients of a short stack and an orifice. Submitted to The International Journal of Ventilation. 2006.
- CROOME, D. In: Naturally ventilated Buildings. London: E&FN Spon, 1997.
- DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference: Final Report Ashrae RP-884. Sydney: Macquarie Research Ltd, 1997.
- DTS Software do Brasil Ltda. Michaelis Português: Moderno Dicionário da Língua Portuguesa: versão 1.0. s.l.: DTS Software do Brasil Ltda, 1998.
- EDSL. TAS THEORY. s.d., s.l.
- ELDIN, Adil Sharag A parametric model for predicting wind-induced pressures on low-rise vertical surfaces in shielded environments. Solar Energy, "no prelo", Elsevier, 2006.
- ETHERIDGE D.W.; SANDBERG M. Building Ventilation: theory & measurement. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.
- ETHERIDGE, D.W.- Unsteady Flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design - mean flow rates. Building and Environment n. 35, p. 111-133, 2000.
- FANGER, P.O. Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental engineering. New York: McGraw-Hill Book Company, 1976.
- FARIA, João Roberto Gomes de. 1952- Ventilação na camada intra-urbana: o caso de Bauru. São Carlos, 1997. 202p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- FORTUNA, A.O. Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos. Conceitos Básicos e Aplicações. São Paulo: EDUSP, 2000.
- FRAZAO, Paulo Eduardo. Estudo em modelo reduzido da eficiência de sistemas de ventilação para túneis rodoviários. São Carlos, 1990. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- FROTA, Anésia B.; SCHIFFER, Sueli R. Manual de Conforto Térmico. 4. ed. São Paulo: Nobel. 2000.
- GIVONI, B. Basic Study of Ventilation Problems in Housing in Hot Countries. Haifa: Building Research Technion City, 1962.
- GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. Energy and Buildings, v. 18, junho, 1992.
- GONÇALVES, J., DUARTE, D. Environmental design for Petrobrás: A step forward in Brazilian Architecture. In: PLEA, 22, Libano, 2005. Proceedings of PLEA 2005: PLEA, 2005.
- GROSSO, M. Wind pressure distribution around building: a parametrical model. Energy and Building, v. 18, p.101-131, 1992.

- HADDAD, Walter. Aplicação da técnica de simulação de grandes escalas de turbulência para avaliação da eficiência de dutos de exaustão natural de fumaça em edifícios. São Paulo, 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- HARRIES, Alan. Notas de Aula. In: Workshop: CFX – FAU-USP. São Paulo, 2005.
- HEIJMANS, Nicolas; WOUTERS, Peter. IEA Technical report: Impact of the uncertainties on wind pressures on the prediction of thermal comfort performances – HybVent Annex35. s.l, s.d.
- HUNT, J.; JACKSON, P. Turbulent wind flow over a low hill. *Quart. J. R. Met. Soc.* 101, p. 929-955, 1975.
- IDEL'CIK, I. Memento des pertes de charge. s.l.: Editeur Paris, 1960.
- INMETRO. Guia para Expressão da Incerteza de Medição. s.l.: INMETRO, 1998.
- JIANG, Y., QINGYAN, C. Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation. *Building and Environment* n. 37, p. 379-386, 2002.
- KARAM, H.; OLIVEIRA, A.; SOARES, J. Application of mass conservation method to investigate the Wind pattern over na área of complex topography. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 25, n. 2, Rio de Janeiro, 2003.
- KNOLL B.; PHAFF J.C.; DE GIDS W.F. Pressure simulation program. In: Conference on Implementing the Results of Ventilation Research, 16, 1995. Proceedings: AIVC, 1995.
- KUHN, Thomas S. A estrutura das revoluções científicas. São Paulo: Perspectiva, 1987.
- KURABUCHI, Takashi; OHBA, Masaaki; et al. Local Dynamic Similarity Model of Cross-Ventilation Part 1 – Theoretical Framework. *The International Journal of Ventilation*, v. 2, Issue 4, março, 2004.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência energética na Arquitetura. São Paulo: PW, 1997.
- LEAL, Thalianne; BITTENCOURT, Leonardo; CÂNDIDO, Christhina. Estudo de desenvolvimento do peitoril ventilado para aumentar a ventilação natural em escolas. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- LIDDAMENT, M. W. A guide to energy efficient ventilation. Coventry: Oscar Faber, 1996.
- LIMA, Livia; CÂNDIDO, Christhina; BITTENCOURT, Leonardo. Avaliação do uso de pérgulas para aumentar a ventilação natural de salas de aula. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- LOURA, Rejane; CASTRO, Melissa; FERREIRA, Camila; ASSIS, Eleonora. Comparação entre três ferramentas de estimativa de fluxo de ar com dados medidos no edifício do CPEI. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- MARCONDES, M., BODE, K., YANNAS, S. Double-skin façades on high-rise Office building in São Paulo: A possible environmental efficient solution? In: PLEA, 22, Libano, 2005. Proceedings of PLEA 2005: PLEA, 2005.
- MATOS, Michele; WESTPHAL, Fernando; LAMBERTS, Roberto. Análise de área de abertura para ventilação na cidade de Florianópolis utilizando o programa COMIS/Energy Plus. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- MENDES, Angélica Signor. Efeito do manejo da ventilação natural no ambiente de salas de maternidade para suínos. Piracicaba, 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo.
- MENDES, N.; SANTOS, G.; OLIVEIRA, R. DOMUS 2.0: um software para simulações higrótérmicas de edificações multizonas. In: ENCAC, VI, Curitiba, 2003. Anais do VI ENCAC: ANTAC, 2003.
- MOTEZUKI, Fabio; CHENG, Liang; PIPINEL, Eduardo. Análise computacional da influência das aberturas na ventilação cruzada. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- MUNSON, B.; YOUNG, D.; OKIISHI, T. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. Volumes 1 e 2 – Versão SI. São Paulo: Edgard Blucher, 1997.
- NEVES, Letícia; ASSIS, Rosana. Arquitetura bioclimática e a obra de Severiano Porto. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- OKE, T. R. Boundary Layer Climates. 2. edição, 435 pp. New York: Methuen, 1987.
- OLGYAY, V. Arquitetura y Clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.
- OLIVEIRA, M., LABAKI, L., KOWALTOWSKI, D., MONTEIRO, E. Ventilation in self-built houses in Brazil: Desirable but undervalued thermal comfort element. In: PLEA, 22, Libano, 2005. Proceedings of PLEA 2005: PLEA, 2005.
- PRATA, Alessandra Rodrigues. Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano. São Paulo, 2005. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

- RAE JR, W. H. ; POPE, A. Low Speed Wind tunnel testing. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- RAUPACH, M.R.; ANTONIA A.; RAJAGOPALAN, S. Rough-wall turbulent boundary layer. *Appl Mech Rev*, v. 44, n. 1, p. 1-25, janeiro, 1991.
- SANTAMOURIS, M. Passive cooling of building. London: James & James Science Publishers, 1997.
- SILVA, F. A. G. O vento como ferramenta de desenho do ambiente construído: uma aplicação ao nordeste do Brasil. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
- SILVA, Fernando V. M. da. Ventilação Natural de edifícios: Turbulência Atmosférica. Lisboa, 2003. Tese (Doutorado) – Universidade de Lisboa.
- SPANNENBERG, Mariane; WILSON, Silveira; FERNANDO, Barth. Desempenho térmico: avaliação de sistemas de vedação utilizadas em habitação sociais em Marau. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- STANGROOM, Paul. CFD Modelling of wind flow over terrain. Nottingham, 2004. Tese (Doutorado). The University of Nottingham.
- STRAW, Matthew. Computation and Measurement of Wind Induced Ventilation. Nottingham, 2000. Tese (Doutorado) – The University of Nottingham.
- STULL, R. An Introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- TENNEKES, H. A First Course in turbulence. Massachusetts: MIT Press, 1972.
- TOLEDO, Alexandre. Critérios Para o Dimensionamento de Aberturas de Ventilação Natural Dos Edifícios. In: ENCAC, V, São Pedro, 2001. Anais do V ENCAC: ANTAC, 2001.
- TOLEDO, Alexandre; PEREIRA, Fernando. Avaliação da ventilação natural em apartamentos: parte I – como os arquitetos avaliam. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- TOLEDO, Alexandre; PEREIRA, Fernando. Avaliação da ventilação natural em apartamentos: parte II – Como a MAM-VN avalia. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- TOLEDO, E. Ventilação natural de edifícios. Lisboa: LNEC, 1967.
- TORRES, Simone; CÂNDIDO, Christhina; BARRATO, Gianna; PASSOS, Isabela. Avaliação Climática de arranjos construtivos urbanos: um estudo de caso em conjunto habitacional vertical em Maceió-AL. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- TROEN, I.; PETERSEN, E.L. European Wind Atlas. Roskilde: Riso National Laboratory, 1989.
- VIANNA, Eduardo. Edifícios com Átrios: Avaliação Qualitativa de Ventilação Natural. São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
- VIANNA, Nelson. O estado da arte em ensino e pesquisa na área de conforto ambiental no Brasil. São Paulo, 2001. 309p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
- VIEIRA, Jucélia; MELEM, Vanderli; BARBOSA, Miriam. Caracterização da Ventilação Natural em Protótipos Habitacionais a partir de levantamento de dados reais. In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.
- WALMSLEY, J.L. TAYLOR, P.A. On the application of a model of Boundary-layer flow over low hills to real terrain. *Boundary Layer Meteorology* 21, p. 17-46, 1982.
- YANG, T. CFD and field testing of a naturally ventilated full-scale building. Nottingham, 2004. Tese (Doutorado) – School of Civil Engineering, The University of Nottingham.
- YUGUO, Li – Spurious Numerical Solutions in Coupled Natural Ventilation and Thermal Analyses. *The International Journal of Ventilation*, v. 1, n. 1, junho, 2002.