RENAN CID VARELA LEITE

CIDADE, VENTO, ENERGIA:

**LIMITES DE APLICAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL PARA O CONFORTO TÉRMICO
FACE À DENSIFICAÇÃO URBANA EM CLIMA TROPICAL ÚMIDO**

Tese apresentada ao curso de Doutorado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientadora: Dra. Anésia Barros Frota

Processo FAPESP: 2011/08980-9

SÃO PAULO

2015

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

E-MAIL DO AUTOR: renancid@bol.com.br

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL, SOB RESPONSABILIDADE DO AUTOR E ANUÊNCIA DO ORIENTADOR.
O original se encontra disponível na sede do programa.

São Paulo 08 de junho de 2015.

Leite, Renan Cid Varela
L533c Cidade, vento, energia: limites de aplicação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido / Renan Cid Varela Leite. --São Paulo, 2015.
273 p. : il.

Tese (Doutorado - Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) - FAUUSP.
Orientadora: Anésia Barros Frota

1.Ventilação (Simulação computacional) 2.Conforto térmico
3.Morfologia urbana 4.Adensamento urbano I.Título

CDU 697.921.2

FOLHA DE APROVAÇÃO

LEITE, Renan Cid Varela. **Cidade, vento, energia: limites de aplicação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido.** Tese apresentada à comissão de pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de doutor em arquitetura e urbanismo.

Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura

Aprovado em ____/____/____

Banca Examinadora

1. **Anésia Barros Frota**

Titulação: **Professora Doutora – Orientadora**

Instituição: **FAUUSP**

Assinatura: _____

2. **Joana Carla Soares Gonçalves**

Titulação: **Professora Doutora**

Instituição: **AUT/FAUUSP**

Assinatura: _____

3. **Alessandra Rodrigues Prata Shimomura**

Titulação: **Professora Doutora**

Instituição: **AUT/FAUUSP**

Assinatura: _____

4. **Rosana Maria Caram de Assis**

Titulação: **Professora Doutora**

Instituição: **IAU/USP**

Assinatura: _____

5. **Daniel Cóstola**

Titulação: **Professor Doutor**

Instituição: **UNICAMP**

Assinatura: _____

A Ramone, Valéria, Lêda e Amair,
cada uma, à sua maneira, uma fortaleza.

Agradecimentos

A Deus, luz constante em meu caminho.

À minha orientadora, Anésia Barros Frota, pela confiança e amizade que transcenderam os limites acadêmicos ao guiar meus passos nesses anos de pesquisa.

Às professoras Eleonora Sad de Assis e Joana Carla Soares Gonçalves, pelas valiosas contribuições direcionadas ao trabalho na ocasião do exame de qualificação.

À semeadora Alessandra Prata Shimomura, por acompanhar de perto diversos momentos deste percurso.

Ao professor Jorge Alberto Gil Saraiva, do LNEC, pela disponibilidade e interesse em discutir algumas etapas durante o desenvolvimento da tese.

A Alexandre Gomes, por partilhar conhecimentos que construíram parte deste trabalho.

Aos colegas do departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Ceará, nossa Escola, em especial, o professor Dr. Ricardo Fernandes, por todas as oportunidades oferecidas e por assegurarem condições para finalizar este trabalho.

À Bruna Luz, Marieli Lukiantchuki, Mônica Marcondes, Newton Becker, Rafael Brandão e Vanessa Guilhon pelo convívio que foi muito além do ambiente acadêmico, diminuindo muitas das minhas dúvidas na certeza de suas amizades.

Às minhas famílias cearense e gaúcha, que mesmo divididas entre os paralelos 3 e 30, participam das minhas conquistas, vibrando a cada passo.

Aos meus amados José e Pérola, por compreenderem a minha presença quase sempre limitada e, mesmo assim, me retribuem um amor incondicional. Vocês me ensinam muito mais do que poderia sonhar lhes passar.

À minha Ramone, fonte de inspiração, porque *“tua chama me ilumina, me faz virar um astro incandescente”*.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro à pesquisa.

“Quando não há caminhos traçados nós voamos”

Rainer Maria Rilke

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da população urbana e rural de países desenvolvidos e em desenvolvimento entre 1950 e 2050.....	30
Figura 2 – Evolução do consumo de energia primária, emissão de CO ₂ e população mundial a partir de 1971.....	31
Figura 3 – Consumo de energia do setor residencial em diversos países.....	42
Figura 4 – Consumo de energia elétrica atual e projeções para países desenvolvidos e em desenvolvimento.....	43
Figura 5 – Composição setorial do consumo de eletricidade no Brasil	44
Figura 6 – Evolução do consumo de energia nacional por setor	45
Figura 7 – Média nacional do consumo de energia por eletrodoméstico	46
Figura 8 – Média do consumo de energia por eletrodoméstico para a região nordeste.....	46
Figura 9 – Padrões urbanos típicos e proporções de cânions urbanos em Copenhague para avaliar as tipologias de escritório (A) e residencial (B).....	58
Figura 10 – Simulação da disponibilidade de luz natural em sete diferentes configurações urbanas típicas.....	59
Figura 11 – Obstrução causada por um edifício sobre outro.....	60
Figura 12 – Detalhe do modelo de ocupação urbana no ENVI-Met (esquerda) e no EnergyPlus (direita)	62
Figura 13 – Esquema da camada limite urbana.....	64
Figura 14 - Redução da velocidade e pressão devido ao vento em meio urbano adensado.....	65
Figura 15 – Estudo de caso em Mong Kok, China. No caso 1 o planejamento urbano com diretrizes apontadas pelo estudo e o caso 2 corresponde ao desenvolvimento urbano permitido pela legislação.....	66
Figura 16 – Série de edifícios testados com altura variável (esquerda) e outra série com altura constante (direita).....	67
Figura 17 – Visualização em corte (acima) e em planta (abaixo) do comportamento dos fluxos ao encontrar a série de edifícios altos dispostos em fila	67
Figura 18 – Visualização dos fluxos no entorno dos cinco edifícios (a), a pressão incidente sobre as superfícies (b) e o comportamento da ventilação natural no interior das unidades habitacionais....	68
Figura 19 – Exemplos de diferentes classes de rugosidades	72
Figura 20 – Perfis transversais de velocidade do ar de acordo com 5 classes de rugosidade.....	73
Figura 21 – Perfis transversais de velocidade do ar a partir de acordo com quatro classes de rugosidade.....	74
Figura 22 – Perfis transversais de velocidade do ar para diferentes classes de rugosidade	75
Figura 23 – Comparação dos perfis de velocidade do ar descritos por BRE (1978) e EUROCODE EC1-4 (2005) para classes de rugosidade mais elevadas.	76
Figura 24 – Intensidade de turbulência determinado por diferentes níveis de rugosidade	78
Figura 25 – Variação da temperatura operativa determinada através do modelo de Humphreys (1978) para edificações condicionadas e naturalmente ventiladas considerando o arquivo climático TMY para Fortaleza.	83
Figura 26 – Limites de temperatura operativa para edificações naturalmente ventiladas a partir da temperatura média mensal e o percentual de aceitação pelos ocupantes	84
Figura 27 – Elevação nos limites de temperatura operativa com base na velocidade do ar.....	86
Figura 28 - Efeito psicológico do resfriamento com o aumento da velocidade do ar	86
Figura 29 – Incremento da temperatura de conforto com a ventilação.....	87
Figura 30 – Comparação de diferentes equações para determinar a influência do movimento do ar na expansão da temperatura de conforto térmico	88
Figura 31 – Temperatura de conforto para edifícios naturalmente ventilados em Hong Kong e a possibilidade de expansão dos limites da zona de conforto térmico com o movimento do ar.	89
Figura 32 – Comparação da ventilação natural entre duas opções de ocupação do solo para uma mesma área de Hong Kong	99
Figura 33 – Contorno de velocidades e os vetores sobre o corpo humano.....	99

Figura 34 – Variação da temperatura do ar de Fortaleza ao longo do dia e durante o ano	103
Figura 35 – Variação da temperatura e umidade do ar ao longo do ano.....	103
Figura 36 – Evaporação total e precipitação ao longo do ano	104
Figura 37 – Distribuição das horas de sol em Fortaleza ao longo do ano.....	104
Figura 38 – Distribuição da radiação solar em Fortaleza no mês mais quente e no mês mais frio ..	105
Figura 39 – Tabulação dos dados de vento e determinação das principais direções segundo a frequência de ocorrência.....	106
Figura 40 – Rosa dos ventos de Fortaleza para o período entre 2002 e 2011	107
Figura 41 – Distribuição das frequências de velocidade dos dados entre 2002 e 2011	107
Figura 42 – Distribuição das frequências de velocidades para as incidências leste e sudeste entre 2002 e 2011	108
Figura 43 – Correlação entre temperatura e velocidade do ar para dados de vento entre 2002 e 2011	108
Figura 44 – Comportamento do vento em dia típico	109
Figura 45 – Planta baixa do pavimento tipo e a opção pelo apartamento voltado para o quadrante leste-sul	111
Figura 46 – Visualização tridimensional do apartamento modelo utilizado.....	113
Figura 47 – Simplificação da geometria do edifício modelo com a retirada da varanda	113
Figura 48 – Esquema geral da escolha das doze quadras que compõem cada um dos cenários urbanos.....	115
Figura 49 – Conjunto com quatro edifícios residenciais semelhantes ao edifício modelo e implantados numa mesma quadra urbana no cenário 1	116
Figura 50 – Imagem aérea do cenário 1 e a presença das quatro torres residenciais na quadra central	116
Figura 51 – Volumetria geral do cenário 1	117
Figura 52 – Vista geral da verticalização de parte dos bairros que compõem o cenário 2.....	117
Figura 53 – Imagem aérea do cenário 2 e o trecho destinado a implantação dos quatro edifícios modelo	118
Figura 54 – Volumetria geral cenário 2.....	118
Figura 55 – Imagem aérea do cenário 3 e o trecho destinado a implantação dos quatro edifícios modelo	119
Figura 56 – Volumetria geral do cenário 3	119
Figura 57 – Imagem aérea do cenário 4 e o trecho destinado a implantação dos quatro edifícios modelo	120
Figura 58 – Volumetria geral do cenário 4	121
Figura 59 – Esquema das simulações em etapas sequenciais que compõe a metodologia.....	125
Figura 60 – Domínio octogonal para simulação da ventilação urbana	129
Figura 61 – Configuração dos cenários urbanos para apreender os efeitos aerodinâmicos provocados pelas quadras a montante sobre os edifícios modelo	130
Figura 62 – Domínio para simulação da ventilação natural interna.....	130
Figura 63 – Aspecto geral da malha composta por tetraedros para simulação da ventilação urbana	131
Figura 64 – Detalhe em corte da camada de prismas sobre os edifícios onde se deseja avaliar mais precisamente os fenômenos de desprendimento da camada limite.	132
Figura 65 – Aspecto da malha composta por tetraedros (esquerda) e por hexaedros (direita)	132
Figura 66 – Comparação dos tempos de simulação da ventilação natural interna utilizando malhas compostas por tetraedros e hexaedros	133
Figura 67 – Comparação dos resultados de vazão de ar e velocidade do ar obtidos com malhas compostas por tetraedros e hexaedros	134
Figura 68 – Valores de referência para o <i>yplus</i> de acordo com a sua posição em relação à parede	136
Figura 69 – Comparação entre os valores de <i>yplus</i> obtidos para a simulação de fluxos internos (a) e na ventilação urbana (b)	137
Figura 70 – Valores de pressão em seis pontos de interesse nas fachadas do edifício modelo e o valor de <i>yplus</i>	137

Figura 71 – Sistematização das etapas para geração de malha, verificação da sua independência e utilização em diferentes análises de ventilação no apartamento modelo.....	138
Figura 72 – Refinamento sucessivo na malha e sua influência na quantidade total de elementos e valores obtidos nas simulações	138
Figura 73 – Estabilização das variáveis vazão de ar (esquerda) e velocidade do ar (direita) durante a verificação da independência da malha para simular o comportamento dos fluxos no apartamento.	139
Figura 74 – Detalhe da zona de vórtices devido à presença dos edifícios altos descrita pelo modelo k- ϵ padrão (a), RNG k- ϵ (b), SST (c) e Eddy Viscosity Transport (d).	142
Figura 75 – Comparação do tempo de processamento de um mesmo cenário utilizando diferentes modelos de turbulência.....	142
Figura 76 – Sobreposição do esquema de fluxos apresentado por Silva & Saraiva (2005) ao resultado da simulação CFD em planta (esquerda) e em perspectiva (direita)	143
Figura 77 – Comparação da vazão de ar em apartamento segundo os quatro diferentes métodos testados.....	144
Figura 78 – Demonstração do peso da variável perda de carga (ζ) nos cálculos de vazão de ar.....	145
Figura 79 – Trocas de ar calculadas através da simulação computacional e segundo equações de diferentes métodos para o apartamento modelo em três diferentes pavimentos com vento leste	146
Figura 80 – Trocas de ar calculadas através da simulação computacional e segundo equações de diferentes métodos para o apartamento modelo em três diferentes pavimentos com vento sudeste	147
Figura 81 – Modelagem do apartamento modelo no programa <i>DesignBuilder</i> com detalhe para as zonas de permanência prolongada a serem analisadas detalhadamente e a visualização tridimensional da unidade.....	151
Figura 82 – O edifício modelo e o detalhamento apenas dos apartamentos no primeiro, décimo primeiro e penúltimo pavimentos voltados para quadrante leste-sul.	152
Figura 83 – Organização da aba HVAC para simulação utilizando apenas a ventilação natural.....	157
Figura 84 – Comportamento da temperatura do ar na suíte em relação ao aumento na vazão de ar	158
Figura 85 – Comportamento da temperatura do ar no dormitório em relação ao aumento na vazão de ar.....	159
Figura 86 – Comportamento da temperatura do ar na sala em relação ao aumento na vazão de ar	159
Figura 87 – Total de horas durante o ano em conforto térmico nos três ambientes variando-se a taxa de vazão de ar	160
Figura 88 – Variação do comportamento da temperatura neutra para Fortaleza segundo diversos índices adaptativos.....	162
Figura 89 – Zona de conforto proposta por De Dear & Brager (1998) para o clima de Fortaleza com faixas de 80% e 90% de aceitação.....	163
Figura 90 – Visualização do vento leste a 4,5 m do solo no cenário 1	166
Figura 91 – Visualização do vento leste a 34,5 m do solo no cenário 1 com destaque para o desvio causado pelo edifício à frente do edifício modelo	167
Figura 92 – Visualização do vento leste a 67,5 m do solo no cenário 1	168
Figura 93 – Plano vertical ao centro do cenário 1 demonstra como o vento leste atinge os edifícios modelo e a formação da região de vórtices.....	168
Figura 94 – A visualização através de linhas de corrente no plano geral e em detalhe reforçam os desvios causados pelos edifícios mais altos.....	169
Figura 95 – Valores de C_p sobre as superfícies das edificações do entorno no cenário 1 com vento leste e destaque para o edifício modelo escolhido para as análises.....	169
Figura 96 – Contornos de C_p sobre as fachadas principais dos edifícios modelos no cenário 1 com vento leste.....	170
Figura 97 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 1 com vento leste	170

Figura 98 – Visualização em detalhe da redução na velocidade do ar nas partes mais baixas da fachada a sotavento devido ao desvio nos fluxos.....	171
Figura 99 – Visualização do vento sudeste a 4,5 m do solo no cenário 1	171
Figura 100 – Visualização do vento sudeste a 34,5 m do solo no cenário 1	172
Figura 101 – Visualização do vento sudeste a 67,5 m do solo no cenário 1	172
Figura 102 – Plano vertical no cenário 1 demonstra como o vento sudeste atinge os edifícios modelo e a formação da região de vórtices	173
Figura 103 – A visualização através de linhas de corrente no plano geral e em detalhe reforçam os desvios causados pelos edifícios mais altos a sudeste do conjunto	173
Figura 104 – Valores de C_p sobre as superfícies das edificações do entorno e edifícios modelo no cenário 1 com vento leste	174
Figura 105 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 1 com vento sudeste	174
Figura 106 – Visualização do vento leste a 4,5 m do solo no cenário 2.....	175
Figura 107 – Visualização do vento leste a 34,5 m do solo no cenário 2.....	176
Figura 108 – Visualização do vento leste a 67,5 m do solo no cenário 2.....	177
Figura 109 – Plano vertical ao centro do cenário 2 demonstra como o vento leste atinge os edifícios modelo e como se formam vórtices na região posterior.....	177
Figura 110 – A visualização através de linhas de corrente no plano geral e em detalhe reforçam os desvios causados pelo conjunto de edifícios.....	178
Figura 111 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 2 com vento leste	178
Figura 112 – Visualização do vento sudeste a 4,5 m do solo no cenário 2	179
Figura 113 – Visualização do vento sudeste a 34,5 m do solo no cenário 2.....	179
Figura 114 – Visualização do vento sudeste a 67,5 m do solo no cenário 2.....	180
Figura 115 – Plano vertical no cenário 2 demonstra como o vento sudeste atinge o edifício modelo e o desvio específico provocado pelo edifício à frente deste.....	180
Figura 116 – As linhas de corrente reforçam a maior permeabilidade do cenário 2 ao vento sudeste que contribui para pressões positivas na fachada do edifício modelo.....	181
Figura 117 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 2 com vento sudeste	181
Figura 118 – Visualização do vento leste a 4,5 m do solo no cenário 3.....	182
Figura 119 – Visualização do vento leste a 34,5 m do solo no cenário 3 com destaque para o corredor de vento formado entre os edifícios	183
Figura 120 – Visualização do vento leste a 67,5 m do solo no cenário 3	183
Figura 121 – Plano vertical ao centro do cenário 3 demonstra como os fluxos atingem os edifícios modelo e a região de vórtices.....	184
Figura 122 – Linhas de corrente no plano geral e em detalhe reforçam os desvios devido ao conjunto de edifícios e o efeito esteira à frente do edifício modelo.....	184
Figura 123 – Contornos de C_p sobre as fachadas dos edifícios modelos no cenário 3.....	185
Figura 124 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 3 com vento leste	185
Figura 125 – Visualização do vento sudeste a 4,5 m do solo no cenário 3	186
Figura 126 – Visualização do vento sudeste a 34,5 m do solo no cenário 3.....	186
Figura 127 – Visualização do vento sudeste a 67,5 m do solo no cenário 3.....	187
Figura 128 – Plano vertical ao centro do cenário 3 demonstra como o comportamento do vento sudeste é modificado pelos edifícios à frente do edifício modelo	187
Figura 129 – A visualização através de linhas de corrente reforça os desvios devido ao conjunto de edifícios mais à frente e o direcionamento dos fluxos vindos de sudeste.....	188
Figura 130 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 3 com vento sudeste	188
Figura 131 – Visualização do vento leste a 4,5 m do solo no cenário 4.....	189
Figura 132 – Visualização do vento leste a 34,5 m do solo no cenário 4	190
Figura 133 – Visualização do vento leste a 67,5 m do solo no cenário 4	190
Figura 134 – Plano vertical evidencia a ausência de obstáculos mais altos para o vento leste.....	191

Figura 135 – A visualização através de linhas de corrente no plano geral reforça a elevação nos fluxos devido aos desvios causados pelos primeiros edifícios.....	191
Figura 136 – Contornos de C_p sobre as fachadas principais dos edifícios modelos no cenário 4....	192
Figura 137 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 3 com vento leste.....	192
Figura 138 – Visualização do vento sudeste a 4,5 m do solo no cenário 4.....	193
Figura 139 – Visualização do vento sudeste a 34,5 m do solo no cenário 4.....	193
Figura 140 – Visualização do vento sudeste a 67,5 m do solo no cenário 4.....	194
Figura 141 – Plano vertical demonstra a alteração dos fluxos de sudeste devido a presença dos edifícios à frente do edifício modelo.	194
Figura 142 – Visualização através de linhas de corrente no plano geral reforça o efeito de barreira dos edifícios modelo.....	195
Figura 143 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 4 com vento sudeste.....	195
Figura 144 – Formação de espécie de corredor para os fluxos de leste no cenário 3.....	196
Figura 145 – Influência dos poucos edifícios altos presentes no cenário 1 sobre o campo de pressões na fachada do edifício modelo.....	197
Figura 146 – Elevação na camada limite devido a presença de edifícios um pouco mais altos que os demais no cenário 4.....	197
Figura 147 – Comparação dos valores de C_p para o primeiro pavimento com vento leste entre os quatro cenários urbanos.....	199
Figura 148 – Comparação dos valores de C_p para o décimo primeiro pavimento com vento leste entre os quatro cenários urbanos.....	199
Figura 149 – Comparação dos valores de C_p para o vigésimo terceiro pavimento com vento leste entre os quatro cenários urbanos.....	200
Figura 150 – Comparação dos valores de C_p para o primeiro pavimento com vento sudeste entre os quatro cenários urbanos.....	200
Figura 151 – Comparação dos valores de C_p para o décimo primeiro pavimento com vento sudeste entre os quatro cenários urbanos.....	201
Figura 152 – Comparação dos valores de C_p para o vigésimo terceiro pavimento com vento sudeste entre os quatro cenários urbanos.....	201
Figura 153 – Conjunto de máscaras do entorno por pavimento e para cada cenário urbano.....	203
Figura 154 – Variação do ΔC_p entre as fachadas do edifício modelo nos três pavimentos com vento leste.....	205
Figura 155 – Variação do ΔC_p entre as fachadas do edifício modelo nos três pavimentos com vento sudeste.....	206
Figura 156 – Correlações entre AM e ΔC_p (esquerda) e entre TO e ΔC_p (direita).....	206
Figura 157 – Pontos de verificação dos perfis verticais de velocidade do ar com vento leste em cada cenário urbano.....	207
Figura 158 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 2 com vento leste para os quatro cenários.....	208
Figura 159 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 3 com vento leste para os quatro cenários.....	209
Figura 160 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 4 com vento leste para os quatro cenários.....	209
Figura 161 – Comparação da dissipação da energia cinética turbulenta em função da altura no ponto 2 entre os diversos cenários com vento leste.....	210
Figura 162 – Pontos de verificação dos perfis verticais de velocidade do ar com vento sudeste em cada cenário urbano.....	211
Figura 163 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 2 com vento sudeste para os quatro cenários.....	211
Figura 164 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 5 com vento sudeste para os quatro cenários.....	212
Figura 165 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 6 com vento sudeste para os quatro cenários.....	213

Figura 166 – Comparação da dissipação da energia cinética turbulenta em função da altura no ponto 2 entre os diversos cenários com vento sudeste.....	213
Figura 167 – Vazão de ar com vento leste por pavimento e em cada cenário urbano analisado.....	214
Figura 168 – Vazão de ar com vento sudeste por pavimento e em cada cenário urbano analisado	215
Figura 169 – Correlação entre vazão de ar e velocidade do ar.....	216
Figura 170 – Forma de medição da velocidade do ar no interior dos ambientes selecionados	216
Figura 171 – Correlação entre a pressão sobre as aberturas na fachada principal e a velocidade do ar no interior dos ambientes	217
Figura 172 – Correlação entre a vazão de ar e AM.....	218
Figura 173 – Velocidade do ar na suíte nos quatro cenários com vento leste	218
Figura 174 – Velocidade do ar no dormitório nos quatro cenários com vento leste.....	219
Figura 175 – Velocidade do ar na sala nos quatro cenários com vento leste	219
Figura 176 – Velocidade do ar na suíte nos quatro cenários com vento sudeste	220
Figura 177 – Velocidade do ar no dormitório nos quatro cenários com vento sudeste.....	220
Figura 178 – Velocidade do ar no dormitório nos quatro cenários com vento sudeste.....	221
Figura 179 – Distribuição das velocidades do ar no interior dos ambientes analisados	222
Figura 180 – Visualização dos fluxos nos apartamentos entre os quatro cenários com vento leste.....	223
Figura 181 – Visualização dos fluxos nos apartamentos entre os quatro cenários com vento sudeste	224
Figura 182 – Modelagem dos quatro cenários urbanos no <i>DesignBuilder</i>	225
Figura 183 – Comparação das projeções de sombras nos cenários 2 em perspectiva (a) e em planta (b) e no cenário 4 em perspectiva (c) e em planta (d).....	226
Figura 184 – Comparação entre os ganhos de calor devido à insolação entre os pavimentos no cenário 1.....	226
Figura 185 – Comparação entre os ganhos de calor devido à insolação entre os pavimentos no cenário 2.....	227
Figura 186 – Comparação entre os ganhos de calor devido à insolação entre os pavimentos no cenário 3.....	228
Figura 187 – Comparação entre os ganhos de calor devido à insolação entre os pavimentos no cenário 4.....	228
Figura 188 – Comparação da carga térmica devido à incidência solar na suíte entre os quatro cenários	229
Figura 189 – Comparação da carga térmica devido à incidência solar no dormitório entre os quatro cenários	230
Figura 190 – Comparação da carga térmica devido à incidência solar na sala entre os quatro cenários	230
Figura 191 – Total de horas em conforto por ambiente nos quatro cenários com vento leste.....	232
Figura 192 – Total de horas em conforto por ambiente nos quatro cenários com vento sudeste.....	233
Figura 193 – Correlação entre os ganhos de calor devido ao sol e as horas em conforto	233
Figura 194 – Percentual de casos com mais de 80% das horas do ano em conforto térmico com a associação da velocidade do ar aos valores de temperatura operativa	235
Figura 195 – Distribuição das quantidades totais de desconforto devido ao frio por pavimento entre os cenários urbanos	236
Figura 196 – Distribuição das quantidades totais de desconforto devido ao calor por pavimento entre os cenários urbanos	237
Figura 197 – Total de horas em conforto ao considerar a velocidade do ar em cada ambiente nos quatro cenários com vento leste	238
Figura 198 – Total de horas em conforto ao considerar a velocidade do ar em cada ambiente nos quatro cenários com vento sudeste	239
Figura 199 – Fluxograma da metodologia desenvolvida.....	244
Figura 200 – Comparativo temperatura média mensal entre arquivos climáticos TRY e TMY	250

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de rugosidade e características físicas típicas do entorno.....	72
Tabela 2 – Altura da camada limite atmosférica segundo o coeficiente de rugosidade do terreno ..	74
Tabela 3 – Coeficientes de acordo com as características do terreno	75
Tabela 4 – Normais climatológicas para Fortaleza.....	102
Tabela 5 – Quantidade de elementos que compõem as malhas de cada cenário para as simulações de ventilação urbana.	132
Tabela 6 – Intervalos de C_p máximos e mínimos e para cada ponto de interesse na fachada a barlavento de acordo com os modelos de turbulência testados.....	141
Tabela 7 – Rotina de ocupação do dormitório e da sala.....	153
Tabela 8 – Níveis metabólicos de acordo com a atividade realizada nos ambientes escolhidos	154
Tabela 9 – Padrão de utilização da iluminação artificial no dormitório e na sala	154
Tabela 10 – Configurações padrão adotadas nas simulações.....	156
Tabela 11 – Resultados das simulações segundo o total de horas dentro da zona de conforto	240

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E REDUÇÕES

AM	Altura média (m)
Atm	Atmosfera (Equivalente a 101 325 Pa)
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
BRE	<i>Building Research Establishment</i>
BS	<i>British Standard</i> (Norma Britânica)
ccl	<i>CFX command language</i> (Linguagem de comando do CFX)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica dos Fluidos Computacional)
Clo	Unidade de resistência térmica da roupa (1 clo = 0,155 m ² °C/W)
Cm	Centímetro(s)
Cp	Coeficiente de pressão (Adimensional)
CSTB	<i>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment</i>
CT	Capacidade Térmica (KJ/m ² .K)
DoE	<i>U.S. Department of Energy</i> (Departamento de Energia Norte Americano)
DR	<i>Draft Risk</i> (Risco de desconforto por corrente de ar indesejada)
Dr.	Doutor
dT	Sigla em inglês para a extensão da temperatura da zona de conforto devido ao movimento de ar
E	Leste
EIA	<i>U.S. Energy Information Administration</i> (Agência Americana de Administração de Informação sobre Energia)
ESSS	<i>Engineering Simulation and Scientific Software</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
Hab/Km ²	Habitante(s) por quilômetro(s) quadrado(s)
h _c	Coeficiente de troca térmica por convecção (W/m ² °C)
h _e	Coeficiente de condutância térmica da superfície externa (W/m ² °C)
hPa	HectoPascal (Equivalente a 10 ² Pa)
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovenamental sobre Mudanças Climáticas)
ISO	<i>International Standard Organization</i>
I _v	Intensidade de turbulência
kg/m ³	Kilograma(s) por metro cúbico

Kg/s	Kilograma(s) por segundo
Km ²	Kilometro(s) quadrado(s)
KW	Kilowatt(s)
KWh	Kilowatt(s) hora
KW/ano	Kilowatt(s) hora por ano
KWh/mês	Kilowatt(s) hora por mês
LABAUT	Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética
m	Metro(s)
m ²	Metro(s) quadrado(s)
m/s	Metro(s) por segundo
m ³ /s	Metro(s) cúbico(s) por segundo
met	Energia térmica dissipada por uma pessoa por metro quadrado de pele em função da atividade (1 met = 58,2 W/m ²)
mm	Milímetro(s)
NBR	Norma Brasileira
OECD	Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento
Pa	Pascal (Unidade padrão de pressão e tensão)
PIB	Produto Interno Bruto
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (Voto médio predito ou estimado)
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> (Porcentagem de pessoas insatisfeitas)
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
R ²	Coeficiente de determinação ou medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado (Adimensional)
Re	Número de Reynolds (Adimensional)
RTQ – R	Regulamento Técnico da Qualidade - RTQ para o Nível de Eficiência
S	Sul
SE	Sudeste
SECOVI-CE	Sindicato de Comércio e Serviços do Ceará
SINPHA	Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
Tep	Tonelada equivalente de petróleo (1 Tep = 41,85 GigaJoule)
TMY	<i>Typical Meteorrological Year</i> (Ano Meteorológico Típico)
TO	Taxa de ocupação (%)
T _o	Temperatura Operativa (°C)
T _m	Temperatura média mensal (°C)
T _n	Temperatura neutra ou de neutralidade (°C)
TRY	<i>Test Reference Year</i> (Ano Climático de Referência)
TWh	Terawatt(s) hora

U	Coeficiente global de transmissão térmica ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)
W	<i>Watt(s)</i>
W/m^2	<i>Watt(s)</i> por m^2
WWR	<i>Window wall ratio</i> (Razão janela-parede)
WYEC	<i>Weather Year for Energy Calculation</i> (Ano Climático para Cálculos de Simulação Energética)
Y_{plus}	Distância da primeira camada de prismas até a parede do obstáculo (Adimensional)
ZOC	Zona de Ocupação Consolidada
ZOP 1	Zona de Ocupação Preferencial 1
ZOP 2	Zona de Ocupação Preferencial 2
Z_0	Nível de rugosidade (m)
%	Por cento
°	Grau(s)
'	Minuto(s)
°C	Grau(s) Celsius
U_τ	velocidade de atrito (m/s)
ρ	massa específica do ar em função da pressão atmosférica, temperatura e umidade (kg/m^3);
μ	Viscosidade dinâmica (kg/m.s)
ϕ	Vazão de ar (m^3/s)
S	Perda de carga imposta ao fluxo interno devido à presença de obstáculos (Adimensional)
Θ	Ângulo de incidência do vento (°)
Θ_v	Ângulo de obstrução vertical (°)
Θ_h	Ângulo de obstrução horizontal (°)
ΔC_p	Diferença entre os coeficientes de pressão na entrada de ar e na saída de ar (adimensional)

Cidade, vento, energia: limites de aplicação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido.

O objeto desta pesquisa é a alteração das condições de ventilação natural e de incidência solar provocadas pelo meio urbano. Objetiva-se comprovar a hipótese de que o maior adensamento urbano através da verticalização é compatível com o conforto térmico em edifícios residenciais multifamiliares em altura utilizando apenas a ventilação natural durante 80% das horas do ano. Obstáculos no entorno modificam o comportamento do vento, reduzindo ou incrementando o campo de pressões sobre as fachadas. Por outro lado, edifícios altos situados nas proximidades podem reduzir parcelas significativas da radiação solar sobre planos verticais. O estudo tem como foco o clima quente e úmido de Fortaleza (3° S) e analisa quatro diferentes configurações representativas da morfologia urbana presentes nesta cidade. A investigação vale-se de simulações computacionais em diferentes etapas e escalas de abordagem numa metodologia sequencial e complementar na qual cada fase fornece dados necessários ao estágio seguinte. Partiu-se da avaliação da ventilação urbana através de CFD para as duas direções de vento predominantes, que forneceram dados de C_p sobre as aberturas do edifício adotado. Em seguida, simulou-se o comportamento dos fluxos internos, determinando as taxas de renovação do ar e o campo de velocidades no interior do apartamento. O desempenho térmico anual de três ambientes de permanência prolongada foi calculado e os resultados analisados com base no total de horas dentro da zona de conforto utilizando o modelo adaptativo da ASHRAE (2004). A sensação de resfriamento a partir do movimento do ar foi considerada para a extensão dos limites da zona de conforto. A hipótese mostrou-se válida, uma vez que formas urbanas mais verticalizadas como os cenários 2 e 3 obstruíram parcelas significativas da radiação solar em pavimentos mais baixos comparados a conjuntos urbanos formados por edificações mais baixas. Mesmo diante de vazões de ar cerca de 40% mais baixas em alguns casos com vento sudeste, o cenário 2 apresentou maior quantidade de horas em conforto. O mesmo ocorreu com o cenário 3, cujos valores de vazões de ar com vento leste foram discretamente superiores àqueles obtidos nos cenários 1 e 4, porém alcançando maiores períodos em conforto térmico nos pavimentos mais baixos, reforçando a atuação conjunta da obstrução à radiação solar e a manutenção de condições para ventilar naturalmente as fachadas de edifícios. Ao considerar o efeito de resfriamento provocado pelo movimento do ar, foi possível atingir a condição de conforto térmico em 85% dos casos. Ainda, as baixas correlações entre a vazão de ar e a taxa de ocupação do solo em cada cenário ou a altura média das edificações reforçam a premissa de que a variabilidade do vento e o dinamismo da forma urbana impedem a determinação imediata de quais configurações espaciais reduzirão ou potencializarão as condições de ventilação natural, indicando, também, a possibilidade de compatibilizar maiores níveis de densidade urbana e condições ambientais satisfatórias em edifícios.

Palavras-chave: Ventilação (Simulação computacional), Conforto térmico, Morfologia urbana, Adensamento urbano.

City, wind, energy: limits for applying natural ventilation for thermal comfort in its relation to urban densification in the hot-humid tropical climate

The object of this research is the changes in natural ventilation conditions and sunlight caused by the urban environment. The aim is to prove the hypothesis that higher urban density levels through vertical buildings is compatible with thermal comfort in naturally ventilated residential buildings during 80% of total year's hours. Surrounding obstacles modify wind patterns, reducing or increasing the pressure field over façades. On the other hand, tall buildings located nearby might reduce significant solar radiation portions over vertical planes. This study focuses the hot-humid climate of Fortaleza, Ceará, Brazil (3° S) and analyses four different representative urban forms within this city. The investigation uses computational simulations in different stages and approaching scales in a sequential and complementary methodology in which each phase supplies the necessary data to the next level. Starting point was to evaluate the urban ventilation using a CFD tool according to two dominant wind directions, which provided C_p data over buildings openings. Then, internal flows were simulated in order to determine air changes rates and velocity field in the apartment. Annual thermodynamic performance in three long permanence rooms was calculated and the results were evaluated using ASHRAE (2004) adaptive model. Cooling effect due to air movement was considered to extend the limits of thermal comfort zone. The hypothesis proved to be valid since more vertical urban forms such as scenarios 2 and 3 obstructed significant solar radiation portions over lower floors compared to urban settlements with lower buildings. Even with airflow rates about 40% lower in some cases with southeast wind, scenario 2 had more hours within the comfort zone. The same occurred with scenario 3, in which airflow rates for east wind were slightly higher than that obtained in scenarios 1 and 4, but achieving greater comfort periods in lower floors, reinforcing the combined effect of obstructing solar radiation and maintaining the conditions to naturally ventilate building's façades. Considering the cooling effect due to air movement made possible to achieve thermal comfort situations in 85% of the cases. Yet, lower correlations between airflow rates and land use in each scenario or average height of buildings reinforce the premise that wind variability and the dynamism of the urban form prevent the immediate determination of which spatial configuration may reduce or enhance natural ventilation conditions, also indicating that high-density urban levels are compatible with satisfactory environmental conditions within buildings.

Keywords: Ventilation (Computational simulation), Thermal comfort, Urban morphology, Urban density.

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E REDUÇÕES	xix
Resumo	xxiii
Abstract	xxv
1. Introdução.....	29
1.1. Enunciado da hipótese	35
1.2. Objetivo	36
1.2.1. Objetivos específicos.....	36
1.3. Estrutura da tese.....	36
1.4. Conclusões do capítulo	37
2. Arquitetura, conforto térmico e consumo de energia.....	39
2.1. Consumo de energia em edificações residenciais.....	41
2.1.1. Consumo de energia em residências brasileiras.....	44
2.2. O processo de urbanização e as condições ambientais urbanas.....	47
2.2.1. Adensamento urbano e forma de cidade.....	50
2.2.2. A incidência solar em áreas urbanas	56
2.2.3. A ventilação natural em áreas urbanas	64
2.2.3.1. Rugosidade aerodinâmica.....	70
2.2.3.2. Perfil de vento sobre o meio urbano.....	71
2.2.3.3. Turbulência	77
2.2.4. O papel da ventilação natural	79
2.2.5. Índices de conforto térmico e ventilação natural.....	80
2.2.6. Calculando a ventilação natural	90
2.2.6.1. A pressão devido ao vento.....	91
2.2.6.2. A vazão de ar em edifícios	95
2.2.6.3. Ventilação natural e CFD.....	98
2.3. Conclusões do capítulo	100
3. Contextualização	101
3.1. Diagnóstico climático de Fortaleza.....	102
3.1.1. Dados de vento	105
3.2. A definição do edifício e apartamento modelo.....	109
3.3. A seleção dos cenários urbanos	114
3.4. Conclusões do capítulo	121
4. Materiais e método.....	123
4.1. A simulação das condições de ventilação natural.....	127
4.1.1. Programa ANSYS – CFX	128
4.1.1.1. Geometria do modelo e definição do domínio.....	128
4.1.1.2. Geração de malha.....	131
4.1.1.3. Verificação da qualidade da malha	134
4.1.1.3.1. Valor de <i>yplus</i>	134
4.1.1.3.2. Testes de independência da malha	138
4.1.1.4. Adoção de um modelo de turbulência	140
4.1.1.5. Determinação da vazão de ar no apartamento modelo.....	143
4.2. A simulação do desempenho térmico	148
4.2.1. O programa <i>DesignBuilder</i>	149
4.2.2. Parâmetros de simulação do desempenho térmico	150
4.2.2.1. Modelagem da geometria.....	151
4.2.2.2. Escolha do arquivo climático	152

4.2.2.3.	Padrão de uso e cargas internas.....	153
4.2.2.4.	Propriedades térmicas da envoltória	155
4.2.2.5.	Configurações padrão adotadas.....	155
4.2.2.6.	Ventilação natural e desempenho térmico.....	156
4.3.	Critério de avaliação do desempenho térmico.....	161
4.3.1.	Índice de conforto adotado	161
4.4.	Conclusões do capítulo.....	164
5.	Resultados das simulações computacionais	165
5.1.	A ventilação natural urbana	165
5.1.1.	Cenário 1	166
5.1.2.	Cenário 2	175
5.1.3.	Cenário 3	182
5.1.4.	Cenário 4	189
5.1.5.	Sobre os resultados das simulações de ventilação urbana	196
5.2.	A ventilação natural interna.....	214
5.3.	A simulação do desempenho térmico	225
6.	Conclusões	241
6.1.	Sobre os resultados	246
6.2.	Validação da hipótese	248
6.3.	Limitações da tese	249
6.4.	Desenvolvimentos futuros	251
7.	Referências bibliográficas	253

1. Introdução

As sucessivas crises do petróleo, que tiveram início na década de 1970, provocaram discussões acerca do modelo de desenvolvimento mundial até então adotado.

Como consequência, as teorias e os modelos urbanísticos assumidos necessitavam de revisão à luz dos preceitos difundidos pelo movimento ambientalista. O termo “ecodesenvolvimento” é introduzido no cerne dos debates ambientais como proposta para conciliar o progresso econômico com a desejabilidade social e a consciência ecológica. Revisado na década de 1980, o conceito evolui para um modelo desenvolvimentista que incorpore a sustentabilidade nos níveis social e ambiental através do planejamento familiar e mudança dos sistemas de produção predatórios para sustentáveis – o chamado desenvolvimento sustentável¹.

A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), realizada no Rio de Janeiro e popularmente conhecida como Eco 92, consolidou o conceito de desenvolvimento sustentável, tornando-o base para elaboração de políticas voltadas ao meio ambiente. O evento ressaltou a necessidade de refletir sobre a relação entre desenvolvimento econômico e proteção do meio natural ao alertar a opinião pública sobre a maneira como se exploravam matérias primas, degradando o equilíbrio ecológico. A gerência do crescimento passa, então, a constituir uma abordagem mais adequada em relação ao ambiente.

¹ A expressão desenvolvimento sustentável aparece pela primeira vez no relatório Brundtland. Ver: **Nosso futuro comum** – Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1988.

² Durante a Conferência realizada na cidade japonesa de Kyoto, em dezembro de 1997, os países reunidos se comprometeram a reduzir as emissões dos gases CO₂, CH₄, N₂O, NFCs, PFCs e SF₆ até o ano de 2010. Esses gases em suspensão na atmosfera absorvem a radiação emitida pela Terra, dificultando o resfriamento e alterando o balanço energético.

³ O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é o organismo criado em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP) e a Organização Meteorológica Mundial (WMO) para conduzir a avaliação das mudanças climáticas e apresentar uma visão científica sobre o estado atual do conhecimento em mudanças climáticas e seus potenciais impactos ambientais e sócio-econômicos. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/index.htm>

Como principal produto da Conferência, a Agenda 21 reconhece que grande parte dos problemas globais tem suas raízes na escala local. Nesse sentido, a ferramenta evidencia as bases para promover, desde a instância municipal, desenvolvimento compatível com os limites e capacidades do meio natural. A maioria dos aspectos anunciados possui relação direta com as cidades e o setor da construção civil.

Após a Eco 92 outros eventos ocorreram, como as reuniões em Kyoto, em 1997, Haia em 2000 e Johannesburgo em 2002. O objetivo comum é a conscientização de governos e gestores para incorporar a sustentabilidade às diretrizes de planejamento através da legislação e de incentivos ao projeto de edificações que adotem elementos necessários ao menor consumo de recursos e energia. A assinatura do Protocolo de Kyoto, no qual seus signatários, preocupados com o aumento progressivo das temperaturas em escala global, comprometem-se a reduzir as emissões de gases geradores do efeito estufa², representa um marco em relação à questão energética e seus impactos ambientais. No âmbito dos edifícios, o protocolo elevou o rigor de normas internacionais para melhoria do desempenho térmico.

Muito embora constitua tema controverso, as discussões acerca das mudanças climáticas reconhecem que tais alterações são, em parte, resultado de uma abordagem de crescimento econômico que mostrou ser insustentável, e que, por isso, deve transcender a mera relação com consumo de energia ou emissões de carbono, englobando, também, a dinâmica populacional (UNFPA, 2009). Recentemente, em seu quinto relatório de avaliação, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas³ aponta que é clara a influência humana sobre o clima (IPCC, 2013).

O ano de 2009 representa um marco: as cidades passaram a concentrar a maior parte da população mundial, totalizando 3,41 bilhões, ao passo que 3,40 bilhões residiam em áreas rurais. Paralelamente, aglomerações urbanas deverão crescer aos atuais números 2,9 bilhões de habitantes nas próximas quatro décadas. Destarte, os centros urbanos mundiais absorverão todo o crescimento populacional esperado enquanto recebem, também, parte da população emigrada do meio rural. Como resultado, a população rural deverá começar a decrescer em uma década e, em 2050, projeções indicam que estas áreas concentrarão meio bilhão de pessoas a menos do que hoje. Ainda, é válido ressaltar que o maior crescimento de áreas urbanas deverá se concentrar em países menos desenvolvidos, como indica a figura 1 (UNITED NATIONS, 2010).

Figura 1 – Evolução da população urbana e rural de países desenvolvidos e em desenvolvimento entre 1950 e 2050

Fonte: Adaptado de United Nations, 2010.

O crescimento urbano mundial constitui, portanto, desafio na agenda de governos e para o cotidiano dos cidadãos. Por outro lado, a urbanização pode ser um meio positivo para alcançar a desejada sustentabilidade. Ao criar espaços de interação social e efervescência cultural, alivia, também, as pressões do crescimento populacional sobre remanescentes rurais. Com uma população espacialmente mais concentrada, a urbanização pode significar melhor prestação de serviços básicos, maior abrangência e menores custos *per capita*, já que permite economia de escala no desenvolvimento da infraestrutura urbana⁴, reduzindo, também, o consumo energético (UNFPA, 2011).

O rápido crescimento no consumo de energia observado nos últimos anos levantou preocupações acerca do esgotamento de recursos e dos impactos ambientais consequentes, trazendo a questão do consumo energético para o centro da discussão a respeito da preservação ambiental e do desenvolvimento sustentável. À medida que a população urbana cresce, tem-se uma elevação no nível de consumo de recursos e tal fato não ocorre de maneira linear, uma vez que a demanda energética de novas populações aumenta em taxas superiores à de seus antecessores.

Como é possível perceber na figura 2, a elevação no consumo de energia tem como consequência o aumento nas emissões de carbono. Analisando o período entre 1971 e 2010, observa-se que o consumo de energia primária e a emissão de CO₂ apresentaram crescimento significativo, da ordem de 2% e 2,2% ao ano, respectivamente, ao passo que o contingente populacional elevou seu número 1,6% a mais por ano (IEA, 2013).

Figura 2 – Evolução do consumo de energia primária, emissão de CO₂ e população mundial a partir de 1971

Fonte: Adaptado de IEA, 2013.

Em tom alarmista, a Agência Internacional de Energia⁵ aponta que no período entre 1971 e 2011, as emissões globais de CO₂ mais do que dobraram, com uma breve declinação em 2009. No entanto, dois aspectos chamam a atenção para o ano de 2008: pela primeira vez, as emissões dos países que compõem o bloco denominado como *Annex I*⁶ foram superadas pelas emissões oriundas das nações reunidas no grupo chamado *non-Annex I*, a que pertence o Brasil. Ainda, as emissões dos países do conjunto

⁴ Infraestrutura urbana pode ser conceituada como um sistema técnico de equipamentos e serviços necessários ao desenvolvimento das funções urbanas, funções estas de cunho social, econômico e institucional. Sob o ponto de vista social, a infraestrutura urbana visa prover condições de moradia, trabalho, saúde, educação, lazer e segurança. Sob o viés econômico, a infraestrutura urbana deve propiciar o desenvolvimento das atividades produtivas, isto é, a produção e comercialização de bens e serviços. Institucionalmente, a infraestrutura urbana deve propiciar os meios necessários ao desenvolvimento das atividades político-administrativas, entre os quais se inclui a gerência da própria cidade (ZMITROWICZ; DE ANGELIS NETO, 1997).

⁵ A Agência Internacional de Energia (IEA), baseada em Paris, atua como assessora de políticas de energia para 28 países membros com o objetivo de garantir energia confiável, acessível e renovável para seus cidadãos. A agência, fundada durante a crise do petróleo, entre 1973 e 1974, tinha como objetivo inicial coordenar medidas emergenciais para a distribuição do petróleo. Com o desenvolvimento dos mercados de energia, a IEA passou a incorporar a segurança energética, desenvolvimento econômico e a proteção ambiental em sua agenda.

⁶ Nações participantes do denominado Annex I constituem países industrializados membros da Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD), de 1992, e outros cujas economias encontram-se em transição. Os países que compõem o chamado Non-Annex I são, em sua maioria, países em desenvolvimento.

Ainda, certos grupos de países em desenvolvimento são reconhecidos como especialmente vulneráveis aos efeitos negativos das mudanças climáticas, como os ocupam regiões costeiras ou propensas a processos de desertificação e seca (Descrição obtida no *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Disponível em <http://unfccc.int/2860.php>).

⁷<http://www.eia.gov/>

⁸Aqui se utiliza a definição de países mais e menos desenvolvidos adotada pelas Nações Unidas.

⁹Tradução livre do autor para *"that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environment"* (ASHRAE, 2004, p. 2).

Annex I atingiram patamar inferior aos níveis de 1990 devido ao efeito da recessão econômica associada a elevados preços do petróleo (IEA, 2013).

Preocupações sobre o tema levaram a Agência Norte-americana de Administração de Informação da Energia⁷ a comparar o consumo de energia dos países mais desenvolvidos⁸ àqueles registrados pelos países em desenvolvimento. De acordo com dados apresentados pelo órgão, as atuais previsões indicam que a tendência de aumento no consumo energético continuará. Destaca-se, especificamente, a taxa de consumo energético de países menos desenvolvidos (Sudeste asiático, Oriente médio, América do Sul e África), que cresceu em média 4,5% ao ano, valor superior ao dobro da proporção em que se elevou o consumo em países mais desenvolvidos (América do Norte, Europa, Japão, Austrália e Nova Zelândia), da ordem de 2,2% ao ano (EIA, 2013).

Analizando o quadro atual e as projeções para o setor de edifícios, a redução no consumo de energia e emissões de CO₂ se baseia na diminuição da demanda energética para construção e operação de edificações, a utilização de fontes alternativas de baixa emissão de carbono e o controle das emissões de outros gases poluentes (IPCC, 2007). Destaca-se, no entanto, o papel de estratégias menos impactantes, como a aceitação de novos padrões culturais, incluindo a mudança no comportamento dos ocupantes, a posse e a utilização de equipamentos, diretamente responsáveis pelos níveis de energia e emissões. Nesse sentido, enfatiza-se o uso de tecnologias passivas para a diminuição destes níveis, cujo potencial permanece pouco conhecido e, em consequência, raramente explorado.

Um dos aspectos fundamentais da arquitetura é proporcionar conforto aos ocupantes de ambientes internos. A ASHRAE (2004) define conforto térmico como a condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico⁹. Tal condição depende da interação de quatro fatores objetivos: a temperatura, a umidade e a velocidade do ar e a temperatura das superfícies que o cercam. A adoção de limites de temperatura e umidade do ar nas quais o corpo humano está em equilíbrio higrotérmico delimita um intervalo denominado de zona de conforto. Contudo as sensações provocadas pelas interações entre essas grandezas físicas variam subjetivamente, uma vez que dependem de aspectos biológicos, fisiológicos e emocionais, tornando-se, portanto, improvável satisfazer todos os usuários. O objetivo é, então, garantir condições ambientais nas quais o maior número possível de pessoas esteja em conforto térmico (FANGER, 1970).

É sabido que o consumo de energia em edifícios depende dos meios utilizados para controlar as condições ambientais internas. Muito embora o projeto, a construção ou a readequação de edificações ecologicamente conscientes constitua uma necessidade cada vez mais evidente no cenário atual, a economia de energia não deve condenar as condições de conforto e a saúde dos ocupantes (OLESEN, 2007). Nesse sentido, nos últimos anos ocorreram mudanças culturais, comportamentais e nas expectativas de ocupantes de edifícios que, somadas ao aumento verificado nos níveis de consumo e a elevação das cargas térmicas produzidas internamente, resultaram no uso intensivo de sistemas de condicionamento do ar (SANTAMOURIS, 2007).

Tronchin & Fabbri (2008) explicam que no mesmo período em que ocorreram as crises energéticas decorrentes dos aumentos sucessivos no valor do barril de petróleo, a sociedade desenvolveu-se economicamente.

Com o novo patamar econômico atingido, modificaram-se, também, a percepção de conforto e os níveis de satisfação em ambientes fechados. As pessoas buscam o conforto térmico durante todo o ano, independente da estação ou do rigor climático da região. Tais fatores contribuíram para a difusão de instalações de condicionamento do ar e sistemas de refrigeração em edifícios residenciais e para outros fins.

Estima-se que a utilização de sistemas de refrigeração, incluindo o ar condicionado, crescerá de forma contínua nos próximos anos e as taxas de crescimento serão mais significativas nos países em desenvolvimento. Atualmente, a refrigeração corresponde a 15% do consumo global de energia elétrica e os gases refrigerantes (CFCs, HCFCs, HFCs), se liberados na atmosfera, são potenciais causadores do efeito estufa (INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION, 2013). Pérez-Lombard; Ortiz; Pout (2008) reforçam que a intensificação do consumo por parte de sistemas mecânicos de aquecimento, ventilação e ar condicionado deu-se à medida que a demanda por conforto térmico evoluiu, tornando quase essenciais equipamentos antes considerados luxo. Entretanto, tais mecanismos de condicionamento do ar correspondem à maior utilização final de energia tanto no setor residencial como nos demais.

Sobre este aspecto, Santamouris (2006) acrescenta que, como resultado de medidas intensivas de conservação energética, o consumo de energia para aquecimento de edificações praticamente estabilizou-se e, em alguns casos, até diminuiu. Em contrapartida, nos últimos anos a demanda para resfriamento aumentou significativamente, sobretudo devido ao aumento da renda familiar, que tornou popular os sistemas de ar condicionado.

De acordo com Bastide et al (2006), as condições climáticas dos países situados na região dos trópicos e o aumento no poder de compra são os responsáveis pelo uso crescente de aparelhos de ar condicionado, frequentemente vistos como o único meio para atingir o conforto térmico. Bitan (1992) alerta, ainda, para o fato de que áreas urbanas sem a desejada qualidade climática consomem mais energia para condicionamento do ar e iluminação. Nessas situações, é comum a sensação de desconforto térmico da população devido às altas temperaturas, efeitos de canalização do vento nas ruas e elevada turbulência causada pelo planejamento inadequado de edifícios altos que compõem o mosaico urbano.

Contudo, Kolokotroni; Kukadia; Pereira (1996) destacam que o monitoramento extensivo do consumo de energia demonstrou que edifícios naturalmente ventilados comumente gastam menos da metade da energia equivalente utilizada por edificações condicionadas artificialmente. Nesse sentido, reforça-se a necessidade de aprofundar os conhecimentos acerca da estratégia de resfriamento passivo através da ventilação natural, compreendendo os seus limites e possibilidades de aplicação no âmbito do adensamento urbano que atravessam as principais cidades do planeta.

O panorama recente de disseminação da relação entre consumo energético e emissões de CO₂ fez com que as estratégias para redução do consumo de recursos no ambiente construído se tornasse o objetivo principal das políticas energéticas na maioria dos países. Atualmente, tem-se buscado não somente a utilização e o desenvolvimento de fontes de energia renovável, mas também, e principalmente, a redução do consumo de energia através do uso de recursos naturais para condicionamento ambiental com

objetivo de produzir ambientes mais sustentáveis, confortáveis e saudáveis para os usuários e energeticamente eficientes em seus contextos.

Entre as principais diretrizes passivas para condicionamento térmico, a ventilação natural constitui a mais simples estratégia para obtenção de conforto quando a temperatura interna é elevada (GIVONI, 1994). Por outro lado, uma séria limitação à aplicação da ventilação natural em ambientes urbanos deve-se a redução da velocidade do ar provocada pela presença de obstáculos no entorno.

Cheung & Liu (2011) destacam que, apesar do tema da ventilação natural urbana ter sido abordado em diversas pesquisas, a interferência da forma urbana no potencial de ventilação para o conforto térmico e a redução do consumo de energia de edifícios permanece pouco explorada. As principais normas disponíveis (ASHRAE, 1985; 2007; BS 5925, 1991; CISBE, 1997), apesar de reconhecerem a significativa influência das estruturas urbanas sobre o comportamento do ar no interior das edificações, não contém informação suficiente sobre o tema.

Pesquisas recentes investigaram o potencial da ventilação natural para redução da carga térmica em edificações residenciais, contribuindo para a redução do consumo energético (CARRILHO DA GRAÇA et al, 2002; KOTANI; SATOH; YAMANAKA, 2003; PRIYADARSINI; CHEONG; WONG, 2004; LIPING; HIEN, 2007; CHEUNG; LIU, 2011; LIU et al, 2014). Alguns estudos abordam, mais especificamente, a aplicação da estratégia para o conforto térmico na condição tropical quente e úmida (WONG et al, 2002; HIRANO et al, 2006; INDRAGANTI, 2010; PRAJONGSAN; SHARPLES, 2012).

A presente investigação tenciona, no entanto, avançar na avaliação mais precisa dos efeitos do entorno sobre as variáveis climáticas vento e radiação solar e sua influência no conforto térmico em edificações. Pretende, assim, preencher lacuna existente em relação aos estudos de desempenho térmico de apartamentos naturalmente ventilados situados em ambientes urbanos mais adensados.

É sabido a partir de Oke (1987; 1988) que o processo de crescimento e verticalização das cidades produz impactos significativos no balanço térmico, uma vez que a geometria urbana mais obstruída dificulta as trocas radiativas com a atmosfera, consequentemente elevando a temperatura da massa edificada. Paralelamente, a presença de edifícios no entorno modifica o comportamento dos fluxos de ar, invariavelmente elevando a turbulência e diminuindo a sua intensidade, o que pode agravar as condições ambientais internas ao reduzir a possibilidade de arrefecimento da envoltória, a retirada do calor acumulado no interior dos edifícios e o resfriamento dos ocupantes.

Por outro lado, a complexa morfologia verificada nos centros urbanos torna imprevisível o comportamento do vento. Edifícios mais altos situados em determinados contextos desviam fluxos e elevam a turbulência, podendo gerar zonas de recirculação do ar e criar condições mais favoráveis à ventilação natural se comparadas a trechos nos quais os edifícios possuem a mesma altura ou maiores taxas de ocupação do solo (GOLANY, 1996; DUARTE; SERRA, 2003; GONÇALVES, 2003; 2004; BRANDÃO, 2010). Ainda, a obstrução física provocada pelos edifícios do entorno pode reduzir os ganhos de calor em edificações ao impedir a incidência de parcelas significativas da radiação solar sobre suas superfícies (LAM, 2000; LI; WONG, 2007).

Atuando em conjunto, tais aspectos têm reflexos diretos sobre a envoltória, seja na dificuldade para ventilar as fachadas ou devido ao

sombreamento provocado pelos obstáculos do entorno, cabendo, portanto, o questionamento da sua influência combinada sobre a performance termo-energética de edificações. A forma urbana adensada através da verticalização, recorrentemente abordada em literatura sob o viés do impacto negativo sobre a ventilação natural, poderia contribuir para a melhoria das condições ambientais internas, o que motiva a presente investigação. Nesse sentido, torna-se necessária a avaliação específica de diferentes arranjos espaciais urbanos para determinar o impacto do adensamento construtivo através da verticalização sobre o comportamento das variáveis ambientais e seus reflexos no desempenho e conforto térmico em edificações.

Em clima quente e úmido, Givoni (1994) afirma ser óbvia a necessidade de minimizar a penetração de sol tanto pelas aberturas como a sua absorção através de paredes e pela cobertura. No entanto, quando entram em conflito a orientação do edifício em relação ao sol ou ao vento, a ventilação natural deve ser o fator preponderante para sua implantação.

A opção pela cidade de Fortaleza deve-se ao fato da configuração atual da metrópole apresentar uma série de problemas ambientais. Estes são agravados pela ausência de um planejamento capaz de acompanhar o processo de crescimento urbano vivenciado nos últimos anos. Como principais reflexos dessa rápida e recente urbanização, caracterizada pelo aumento exponencial da malha urbana, expressiva verticalização e uso intensivo do solo, destaca-se a alteração de seus elementos naturais, o que pode comprometer a qualidade de vida dos cidadãos. Entre tais elementos, a modificação do clima original da capital cearense é tema de diversas pesquisas buscando evidenciar a presença de ilhas de calor em partes da estrutura urbana (SANTANA, 1997; 2002; MALVEIRA, 1998; PETALAS, 2000; MOURA, 2008) ou a diminuição nas taxas de velocidade do ar sobre a metrópole (XAVIER, 1996; 2001).

Ademais, no processo de adensamento através da verticalização pelo qual atravessa a capital cearense é possível identificar, numa série de formas urbanas espalhadas pela cidade, situações que retratam as condições de obstrução de parte do percurso solar e ao fluxo de ar que são determinantes para o desempenho térmico de edificações. O enfoque que motiva a presente investigação é fundamental para condição tropical quente e úmida de Fortaleza, uma vez que a realidade climática da cidade tem na ventilação natural associada à redução dos ganhos de calor solar suas principais estratégias passivas para obtenção de conforto térmico em edifícios.

1.1. Enunciado da hipótese

Considerando o adensamento como uma das formas mais eficientes para reduzir os impactos ambientais provocados pela condição urbana e a tipologia habitacional multifamiliar em altura como um produto cada vez mais consolidado na paisagem da cidade, busca-se comprovar a hipótese de que há compatibilidade entre maiores densidades através da verticalização e a manutenção do conforto térmico em edificações naturalmente ventiladas durante 80% das horas do ano.

Nesta tese, de caráter experimental e exploratório, são utilizadas simulações computacionais para avaliar o comportamento dos parâmetros ambientais envolvidos no processo de ventilação natural e de desempenho térmico de apartamentos.

1.2. Objetivo

O objetivo da tese é elaborar um método para investigar os efeitos combinados da obstrução à ventilação natural e à radiação solar provocados por diferentes níveis de adensamento urbano na qualidade ambiental interna de edificações residenciais multifamiliares.

1.2.1. Objetivos específicos

Alguns objetivos deverão ser cumpridos para atingir o objetivo geral e testar a validade da hipótese:

- Identificar formas urbanas representativas de diferentes níveis de adensamento construtivo através da verticalização entre as diversas configurações espaciais existentes na cidade de Fortaleza;
- Elencar as principais variáveis projetuais e construtivas que permitem determinar um padrão de edifício residencial multifamiliar em altura;
- Analisar, através de CFD, o impacto de diferentes formas urbanas sobre o campo de pressões devido ao vento incidente nas fachadas de edifício residencial modelo;
- Descrever o comportamento dos fluxos de ar nos ambientes do apartamento, tomando as condições de contorno calculadas para cada cenário representativo do adensamento urbano;
- Calcular o desempenho térmico anual de ambientes de permanência prolongada no apartamento;
- Determinar a aplicabilidade de índice de conforto em relação à condição climática local, estabelecido como critério de avaliação das condições de conforto;
- Comparar os resultados de desempenho térmico com os parâmetros espaciais em cada cenário de ocupação do solo.

1.3. Estrutura da tese

A tese está estruturada em sete capítulos. Parte-se de uma introdução sobre o tema abordado, justificando-se sua escolha face às atuais necessidades ambientais nas escalas urbana e arquitetônica. Em seguida, no capítulo dois, realiza-se a revisão bibliográfica dos principais conceitos sobre forma de cidade, adensamento urbano e seus reflexos sobre as condições ambientais, além da teoria sobre os fenômenos físicos envolvidos nesta investigação. No capítulo três é caracterizado o contexto climático da cidade de Fortaleza, são definidos os modelos de edifício e de apartamento a serem utilizados na pesquisa e escolhidos os cenários urbanos com diferentes níveis de adensamento construtivo. As ferramentas computacionais empregadas são apresentadas em conjunto com a descrição do método no capítulo quatro. A discussão dos resultados das simulações computacionais de ventilação urbana, dos fluxos internos e do desempenho térmico dos ambientes escolhidos está reunida no capítulo cinco. Finalmente, no capítulo seis, são apresentadas as considerações finais, a validação da hipótese e as possibilidades que se colocam para desenvolvimentos futuros. O capítulo sete lista as referências bibliográficas consultadas na elaboração da tese.

1.4. Conclusões do capítulo

No primeiro capítulo, a introdução aos assuntos abordados na tese e a justificativa da escolha do tema foram apresentados em paralelo aos objetivos a serem cumpridos para testar a validade da hipótese proposta.

Aproveitou-se, ainda, para delinear a estrutura da tese e as bases da metodologia a ser aplicada. Esta última se vale de simulações computacionais realizadas em sequência e em diferentes escalas de abordagem.

2. Arquitetura, conforto térmico e consumo de energia

Muito embora o despertar para a necessidade de uma arquitetura que considere seu impacto sobre o ambiente somente tenha se intensificado a partir da Eco 92, Gauzin-Müller (2011) esclarece que a arquitetura e seu viés ecológico, de baixo impacto ou ambientalmente consciente existe a várias décadas. Mais precisamente, é a partir dos anos 1970, como resposta às preocupações suscitadas pela primeira crise do petróleo, que alguns pioneiros idealistas propuseram alternativas em relação à questão ambiental e à restrição imposta ao consumo de combustíveis fósseis. O objetivo era reduzir o consumo de energia através de edificações em harmonia com o meio, trazendo conceitos como o *low-tech* e mesmo o *no-tech*.

Nesse mesmo período, alguns arquitetos e planejadores urbanos, conscientes do papel do contexto para manter o ambiente construído em equilíbrio com o meio natural, passaram a considerar o clima, os recursos naturais e as forças da natureza como os responsáveis por moldar nossas edificações, entendendo que tais elementos eram fundamentais para determinar adequadamente a implantação das construções e as formas urbanas mais eficientes, além da escolha apropriada de materiais e meios construtivos a serem utilizados em concordância com as possibilidades e limitações daquela localidade.

¹⁰ O termo foi criado pelos irmãos Victor e Aladar Olgyay em seus estudos para o MIT (OLGYAY; OLGAY, 1957).

¹¹ A Síndrome de Edifícios Doentes (do inglês *Sick building syndrome*) é a combinação de diversos fatores negativos que resultam do fechamento hermético das edificações, principalmente ambientes de escritórios. Entre os impactos sobre a saúde e conforto dos ocupantes, pode-se citar o aumento na concentração de bactérias, vírus e fungos, a formação de mofo devido às altas taxas de umidade e a manutenção de diversas partículas poluentes e compostos tóxicos respiráveis em suspensão no ar (<http://www.epa.gov/iaq/pubs/sbs.html>).

Como forma de obter conforto térmico e minimizar o consumo de energia, tanto projeto de arquitetura como planejamento urbano devem adequar-se às características climáticas da região (OLGYAY, 1963; GIVONI, 1969; 1998; IZARD; GUYOT, 1980; RIVERO, 1985; FATHY, 1986; STEEMERS et al, 1997; FROTA; SCHIFFER, 2003; HIGUERAS, 2006). A manutenção de condições ambientais satisfatórias no interior de edifícios a partir do aproveitamento dos elementos do clima local e dos recursos naturais para condicionamento traduz-se no bioclimatismo¹⁰.

Preocupações sobre o tema são fundamentais, uma vez que edifícios são grandes consumidores de recursos naturais e energia. Mundialmente, utilizam cerca de 16% da água potável, 25% de toda a madeira extraída e 40% dos combustíveis fósseis e materiais fabricados (WINES, 2000). Edificações consomem entre 30% e 40% de toda a energia primária mundial. Correspondem a 40% nos Estados Unidos e países europeus, chegando a 50% no Reino Unido. Relativamente às emissões de CO₂, correspondem a aproximadamente 45% do total de lançamentos antropogênicos na atmosfera (IEA, 2008). Paralelamente, o Grupo de Trabalho III do IPCC ressalta em seu relatório de avaliação que o setor de edificações é o que apresenta as maiores possibilidades de redução nas emissões de carbono. Contudo, para atender esse objetivo são necessárias mudanças no *design* das edificações visando, sobretudo, a diminuição do uso de ar-condicionado, o incremento dos meios passivos de condicionamento e o controle dos ganhos de calor através da envoltória (IPCC, 2007).

Em diversos países europeus e, posteriormente, nos Estados Unidos, como reação imediata à crise energética iniciada em 1970, diversos programas governamentais apoiados por normas e legislação específicas foram criados visando diminuir o consumo de energia para a operação de edificações. Para Roméro & Reis (2012), além da própria criação da Agência Internacional de Energia (IEA), o momento após a crise do petróleo, ocorrido mais especificamente nos primeiros meses de 1974, marcou o desenvolvimento dos primeiros códigos com o intuito de restringir o dispêndio energético em edifícios. Antes da força de lei que apoiava os chamados regulamentos energéticos recém-criados, a eficiência energética dependia do desejo do arquiteto ou do empreendedor em incorporar diretrizes e estratégias que levassem ao melhor desempenho.

Entretanto, naquele período o principal objetivo era reduzir, em climas frios, as perdas de calor provocadas pela renovação do ar. A medida foi obtida com envoltórios cada vez mais herméticos associadas aos sistemas de condicionamento de ar que, nos anos anteriores, já haviam produzido encantamento. Como reflexo da utilização de elevados índices de isolamento térmico, os edifícios passaram a apresentar condições impróprias para a saúde¹¹ de seus ocupantes. Paralelamente, o sobreaquecimento da edificação no verão aumentou a necessidade de resfriamento.

A consciência de que os recursos utilizados para condicionamento artificial não eram inesgotáveis contribuiu para uma revalorização da arquitetura e urbanismo integrados ao clima e como forma de atender às solicitações ambientais e energéticas. Como esclarecem Roméro & Reis (2012), as primeiras medidas e regulamentações para restringir o consumo energético eram consideradas no âmbito das estratégias passivas ou ativas ou a associação de ambas. Contudo, estas ainda eram implantadas por decisões voluntárias de projetistas ou proprietários. Como apoio técnico para atingir os objetivos de menor dispêndio energético, diversos países possuíam cadernos

técnicos de apoio aos arquitetos, com normas e recomendações, cuja elaboração deu-se nos institutos de tecnologia governamentais ou organizações da sociedade civil, como o *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB), na França, ou o *Building Research Establishment* (BRE), no Reino Unido e a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), nos Estados Unidos.

A efetiva evolução tem início, mais tarde, sob o signo da eficiência energética, compreendendo que a conservação de energia deve associar-se à qualidade de ambientes internos e externos. Nesse sentido, sistemas de certificação energética em edifícios surgiram em 1990 como uma iniciativa regulatória para diminuição do consumo energético e redução nas emissões de CO₂ (PÉREZ-LOMBARD et al 2009). O conceito geral de projeto de ambientes construídos energeticamente eficientes surge, então, da observação de todos os aspectos ambientais, não somente do ponto de vista do desempenho, mas diversos outros critérios qualitativos. O objetivo principal é consumir menos energia provendo o mesmo nível ou mesmo aprimorando a qualidade ambiental de espaços internos.

Nesse mesmo período surge, no Brasil, o PROCEL¹². O escopo do programa era coordenar alternativas para alcançar a desejada eficiência energética em edificações.

Na década seguinte iniciaram-se as discussões com o objetivo de definir as bases e para a normalização brasileira. Roriz; Ghisi; Lamberts (1999) apresentaram uma proposta de Norma Técnica para definir os requisitos mínimos de desempenho térmico para o projeto de habitações de interesse social. A publicação serviu de base à criação da NBR 15220 - Desempenho térmico para edificações de interesse social, publicada mais tarde, em 2005.

Impulsionado pela crise energética de 2001, o governo brasileiro instituiu política nacional para conservação e uso racional de energia através da indicação dos níveis máximos de consumo ou a eficiência mínima para equipamentos e edificações residenciais, comerciais e industriais. Representando avanços nas diretrizes e ações traçadas por essa política, o Procel Edifica, instituído em 2003, estimulava a aplicação de princípios de conservação e eficiência energética em edifícios desde a fase de concepção projetual até a sua utilização, uma vez que parte considerável do potencial energético é consumida durante a construção e operação de edificações.

2.1. Consumo de energia em edificações residenciais

Atualmente, o consumo de energia encontra-se no centro da discussão a respeito da preservação ambiental e do desenvolvimento sustentável. Apesar de inexistir um consenso em relação ao conceito de sustentabilidade, é possível identificar algumas etapas necessárias para atingir níveis de desenvolvimento em equilíbrio com o meio, partindo da alteração nos padrões de consumo energético nos edifícios, a requalificação do espaço público, modificações na legislação urbana, melhoria no tratamento dos resíduos, abastecimento de água e energia, entre outros.

Com raras exceções, a demanda energética para alimentar aparelhos e sistemas elétricos domésticos ao redor do mundo parece não diminuir. Apesar da tendência de menos pessoas por domicílio, porém considerando a elevação média na renda, estamos, cada vez mais, adquirindo e utilizando equipamentos em casa. Esse consumo não é uniforme, varia por região e é

¹² O governo brasileiro criou, através da Eletrobrás, em dezembro de 1985, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). Desde então, o projeto vem incentivando e desenvolvendo pesquisas no sentido da conservação energética como forma de retardar a necessidade de novos investimentos em hidrelétricas, evitando os impactos ambientais, econômicos e sociais resultantes desta matriz.

determinado por diversos fatores, entre renda *per capita*, custos, tamanho da casa, clima, posse de aparelhos, padrões de consumo, preferências dos consumidores e eficiência energética, entre outros (IEA, 2003).

Por outro lado, edificações residenciais são as que apresentam o maior potencial para aplicação de meios naturais para garantir o conforto térmico. Os ganhos de calor devido à ocupação, iluminação e outros sistemas verificados em edifícios residenciais são menores se comparados a prédios comerciais, públicos ou industriais. Tais aspectos podem contribuir significativamente para a economia de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; ASHRAE, 2001). Em geral não há muitas pessoas ocupando os ambientes de uma casa, nem muitas lâmpadas ou equipamentos que gerem calor. Em consequência, os ganhos de calor solar são determinantes para o perfil de consumo de energia em edificações residenciais. O envelope da edificação, suas características construtivas, a localização, dimensão e proteção das aberturas têm grande impacto no consumo de energia (CHALIFOUX, 2013).

Conforme Swan & Ugursal (2009), o setor residencial consome a chamada energia secundária, que corresponde àquela que é recebida de forma apropriada ao consumo pelos sistemas de suporte ao padrão de vida dos usuários de edificações. Os principais grupos de uso final de energia são:

- Aquecimento e refrigeração de ambientes internos – parcela de energia necessária para controlar perdas ou ganhos térmicos através da envolvente do edifício e a quantidade necessária para manter condições confortáveis de temperatura e qualidade do ar.
- Aquecimento de água – energia necessária para aquecer água a uma temperatura confortável ou adequada ao uso dos ocupantes.
- Equipamentos e iluminação artificial – energia consumida na operação de equipamentos residenciais e obtenção de níveis de iluminação apropriados às atividades desenvolvidas.

O impacto de cada um desses grupos sobre o consumo de energia total depende diretamente do clima, das características construtivas das habitações, do desempenho de sistemas e aparelhos elétricos e do comportamento dos ocupantes (SWAN; UGURSAL, 2009). Pérez-Lombard et al (2008) acrescentam que, no setor residencial, o tamanho e a localização são fatores importantes para o consumo energético. Pequenos apartamentos consomem menores quantidades de energia uma vez que a área para condicionamento é menor.

Figura 3 – Consumo de energia do setor residencial em diversos países
Fonte: Swan & Ugursal (2009)

Tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento, nas regiões onde o rigor climático de períodos frios torna imprescindível o uso de sistemas ativos para aquecimento, este é o principal responsável pelo consumo energético em edificações residenciais. Nos Estados Unidos, manter a temperatura no interior de edifícios dentro de níveis aceitáveis quando, no exterior, os valores caem, pode atingir 29% do total de energia utilizada em uma residência, ao passo que o consumo para resfriamento dos ambientes soma apenas 11%. Na China, por sua vez, o aquecimento das casas corresponde a 32% do total de energia, enquanto que o resfriamento do ar não chega a uma parcela significativa, totalizando 4% (EIA, 2006; ZHOU, 2007).

Em contrapartida, no caso de edifícios residenciais situados em regiões de clima quente, onde a maior necessidade é por resfriamento, o mais indicado é a adoção de alternativas projetuais adequadas ao clima como forma de manter temperaturas internas dentro de limites considerados confortáveis, dispensando a utilização de meios mecânicos e, consequentemente, reduzindo o consumo de energia (IPCCb, 2013). Relativamente às edificações residenciais do grupo de países que não pertencem a Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD¹³), dados indicam a tendência de aumento no consumo energético nos próximos 25 anos a uma taxa média de 4,4% ao ano, valor bastante superior às taxas de países mais desenvolvidos. Ainda, acrescente-se a este quadro que, nos países menos desenvolvidos, o crescimento econômico, comercial e populacional pressionará a demanda por educação, saúde e outros serviços, com consequências sobre o consumo de energia (EIA, 2014).

¹³ Em 14 de dezembro de 1960, 20 países assinaram a Convenção da Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento. Desde então 14 outros países tornaram-se membros da organização.

Figura 4 – Consumo de energia elétrica atual e projeções para países desenvolvidos e em desenvolvimento

Fonte: Adaptado de EIA (2014).

No Brasil, Lamberts et al (2007) ressaltam que o aumento do consumo de energia em edificações acompanha o crescimento do PIB nacional, reforçando a relação entre desenvolvimento econômico e elevação no consumo de energia elétrica. Entre 1987 e 2004, juntamente com o crescimento da economia, representado pelo aumento do Produto Interno Bruto (PIB), as edificações de uso público, comercial e residencial apresentaram crescimento constante, interrompido pela brusca queda

ocorrida em 2001, período que corresponde ao racionamento de energia. Nesse mesmo período, o consumo de energia em edificações residenciais teve o maior crescimento comparado com os demais setores.

2.1.1. Consumo de energia em residências brasileiras

As edificações residenciais brasileiras foram uma das principais causas do aumento no uso total de energia no país entre 1975 e 2000, totalizando uma elevação de 250% (GELLER, 2003). Mais especificamente, no período entre 1987 e 2000, o consumo energético em residências apresentou um crescimento de 38 TWh para 84 TWh, o que representou um aumento médio de 6,1% ao ano (GHISI; GOSCH; LAMBERTS, 2007).

O setor residencial apresenta, portanto, uma participação expressiva dentro da estrutura de consumo de energia elétrica no Brasil. Diante dos dados divulgados nos últimos anos, Lamberts & Triana (2007) ressaltam que a tentativa de redução nas taxas de crescimento do consumo energético no país deve priorizar ações nesse setor.

Atualmente, as edificações em geral consomem 47,6% do total de energia elétrica do país. O setor residencial, especificamente, é responsável por 23,6% desse consumo, enquanto que os setores comercial e público consomem menos, com 16% e 8%, respectivamente, como demonstra a figura 5 (BEN, 2013).

Figura 5 – Composição setorial do consumo de eletricidade no Brasil
Fonte: Adaptado de BEN (2013)

Em 2012, o setor residencial brasileiro apresentou crescimento de 2,1%. Nos outros setores, como o industrial, a elevação no consumo foi menos expressiva, correspondendo a 0,3% em relação ao ano anterior (BEN, 2013). Como é possível perceber na figura 6, o consumo de energia no setor de edificações nacional apresentou, nos últimos anos, uma taxa de crescimento constante, com um breve declínio após 2009, aspecto que se deveu à crise de energia vivenciada naquele ano.

Figura 6 – Evolução do consumo de energia nacional por setor

Fonte: BEN, 2013

Os usos finais de energia foram objeto de diversas pesquisas para quantificar a média no consumo residencial brasileiro (JANNUZZI; SCHIPPER, 1991; ALMEIDA; SCHAEFFER; ROVERE, 2001; GHISI; GOSCH; LAMBERTS, 2007; ELETROBRÁS, 2007). Segundo Achão (2003), o consumo energético no setor residencial brasileiro é caracterizado pela simplicidade dos usos finais e especificidade de utilização dos equipamentos domésticos.

A pesquisa empreendida por Almeida; Schaeffer; Rovere (2001) tomou como base um questionário aplicado em 1989 e dividido pelas cinco regiões do país. O levantamento apontou que, no setor residencial, os sistemas de refrigeração em geral eram responsáveis por 34% do consumo de energia elétrica, a iluminação 12% e o aquecimento de água 21%.

Ainda de acordo com Almeida; Schaeffer; Rovere (2001), o consumo de eletricidade no setor residencial apresenta diferenças por região, as quais refletem principalmente as condições climáticas, indicadas através do uso de equipamentos como chuveiro elétrico ou ar condicionado. Alguns anos mais tarde, Ghisi; Gosch; Lamberts (2007) reforçaram tal aspecto em levantamento realizado em 12 estados, totalizando 70% da população. Os resultados evidenciaram, também, que uso de energia elétrica no setor residencial brasileiro tem aumentado especialmente com relação ao uso de ar-condicionado e de freezers.

A pesquisa de campo realizada pelo Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos (SINPHA) apresenta o perfil de participação dos eletrodomésticos no consumo de energia na classe residencial do país e segundo a região. A primeira pesquisa, realizada em 1988, foi coordenada pela Eletrobrás, através do PROCEL, e abrangeu 291 municípios. Cerca de dez anos mais tarde, entre 1997 e 1998, a pesquisa foi repetida com o apoio da PUC do Rio de Janeiro. Entre 2004 e 2006 a pesquisa foi realizada com base na mesma metodologia e abrangendo 92% do mercado de energia elétrica nacional.

Como é possível verificar na figura 7, que apresenta a média nacional de consumo por eletrodomésticos, o item condicionamento ambiental corresponde a 20% do total, sendo composto por aparelhos convencionais como o ar condicionado e outros que podem funcionar com ciclo reverso, fornecendo ar quente ou frio (ELETROBRÁS, 2007).

Figura 7 – Média nacional do consumo de energia por eletrodoméstico

Fonte: ELETROBRÁS (2007)

A análise por regiões permite avaliar melhor o impacto do item condicionamento ambiental, que sofre variações de acordo com as características climáticas. No caso do nordeste brasileiro, o ar condicionado representa um consumo considerável entre os demais itens, com 27%, valor que se sobrepõe ao total consumido pelo chuveiro elétrico e próximo do consumo referente à geladeira, como demonstra a figura 8 (ELETROBRÁS, 2007).

Figura 8 – Média do consumo de energia por eletrodoméstico para a região nordeste

Fonte: ELETROBRÁS (2007)

Ainda de acordo com o levantamento feito pelo SINPHA, os entrevistados na região nordeste revelaram que durante períodos em que as temperaturas situam-se em intervalos mais baixos apenas 6% fazem uso médio do ar condicionado, o que corresponde ao seu acionamento de 1 a 3 vezes por semana, enquanto que 5,5% fazem uso regular do equipamento,

ligando-o de 1 a 3 vezes por mês. Em condição de clima frio, 72 % declararam não fazer uso do equipamento. Em condição de clima quente, no entanto, 34,5% responderam fazer grande uso do eletrodoméstico, quando a sua utilização é superior a 4 vezes por semana e 30% indicaram fazer uso médio do aparelho, quando seu acionamento se dá de 1 a 3 vezes por semana (ELETROBRÁS, 2007).

Reforçando a relação entre o consumo de energia e condições climáticas, em 2006, a região nordeste apresentou a menor média de consumo residencial entre as regiões brasileiras, com 96,8 kWh/mês. O valor representou uma redução de 0,3% em comparação com o ano anterior, quando o consumo foi de 97,1 kWh/mês. Comparando os dois anos, em 2006 as temperaturas médias foram predominantemente mais baixas na região (EPE, 2007).

Para as próximas duas décadas, entretanto, prevê-se o aumento na demanda de energia elétrica no setor residencial brasileiro. Visando o seu controle, Loura; Assis; Bastos (2012) destacam como fundamental atuar sobre o condicionamento ambiental, um dos usos finais cada vez mais incorporado ao cotidiano das habitações e que tem significativo impacto sobre a energia. Como ressaltam Ghisi; Gosch; Lamberts (2007), possíveis estratégias para redução do consumo energético em edificações residenciais englobam a melhoria do desempenho térmico das habitações, uma vez que, para os eletrodomésticos do mercado nacional, já se encontram disponíveis etiquetas de eficiência energética. Nesse sentido, reforçam-se as estratégias passivas de melhoria das condições ambientais em edifícios e, em caso de clima quente e úmido comum a esta região, maior ênfase é dada à utilização da ventilação natural.

2.2. O processo de urbanização e as condições ambientais urbanas

Aglomerações urbanas nascem das necessidades sociais do homem e multiplicam tanto os seus costumes como os seus meios de expressão (MUMFORD, 1961). A cidade constitui a expressão máxima do processo de produção da humanidade, servindo como meio à circulação da produção e base para as relações sociais (CARLOS, 2007).

Atualmente, o fenômeno da urbanização representa uma realidade cada vez mais generalizada¹⁴. No entanto, apesar dos incontestes benefícios que trouxe à vida em sociedade, por diversas vezes a urbanização concretiza-se através da ocupação excessiva e desordenada do solo urbano. Entre os principais impactos negativos destacam-se a alteração do clima original e a formação de microclimas diferenciados em diversos trechos do tecido urbano.

A substituição da superfície natural por outras de maior capacidade térmica provoca alterações no balanço de energia, levando a variações na temperatura e umidade do ar em escalas local e mesoclimática. A canalização dos cursos d'água e a retirada da camada de vegetação preexistente modificam a permeabilidade do solo. A constante modificação na morfologia urbana através da incorporação cada vez maior de edifícios compromete a porosidade ao vento e redireciona as correntes de ar, alterando seu comportamento em termos de velocidade e produzindo elevada turbulência.

¹⁴ No caso do Brasil, a população residente em centros urbanos em 1950 correspondia a 36% do total de brasileiros, contrastando com os 64% que viviam em áreas rurais. A década de 1970 constitui o marco desta transição, registrando 56% dos brasileiros morando em cidades, enquanto 44% ainda habitavam a zona rural. A população urbana brasileira atingiu o percentual de 81% em 2000, de acordo com dados do IBGE (2007). O Censo Demográfico de 2010 mostrou a continuidade deste processo de diminuição do volume da população rural, na ordem de 2 milhões de pessoas entre 2000 e 2010. O acréscimo de quase 23 milhões de habitantes urbanos resultou no aumento do grau de urbanização, que passou de 81,2% em 2000, para 84,4% em 2010. Esse incremento foi causado pelo próprio crescimento vegetativo nas áreas urbanas, além das migrações com destino urbano (IBGE, 2011).

Em síntese, o processo de urbanização produz mudanças radicais na natureza das superfícies e nas propriedades atmosféricas da região. As transformações envolvem a modificação das características radiativas, térmicas, de umidade e aerodinâmicas associadas ao entorno imediato, alterando, em consequência, os balanços térmico e hidrológico naturais (OKE, 1987). Os efeitos da urbanização sobre o clima são muitos e variados, constituindo o resultado da interferência na operação dos sistemas naturais, alterações estruturais nas características meteorológicas do ar no interior e imediatamente acima das cidades, gerando um comportamento específico denominado clima urbano (CHANDLER, 1976).

Para Monteiro (1976), os impactos deste clima próprio são manifestações ligadas ao conforto térmico, à qualidade do ar, aos impactos pluviais e a outras implicações capazes de desorganizar o cotidiano nos centros urbanos e prejudicar a saúde e a qualidade de vida de seus habitantes. É nesses aglomerados populacionais que ocorre um acúmulo de calor capaz de produzir estresse térmico, conformando o que se convencionou denominar ilha de calor, e que pode ser considerada a mais clara manifestação climática da urbanização (LANDSBERG, 1981).

Muito se avançou desde as primeiras pesquisas sobre as manifestações ambientais ligadas à formação do clima urbano, realizadas ainda no século XIX por Luke Howard, em Londres, e Emilien Renou, em Paris. Como principal legado, destaca-se a compreensão de que o clima constitui elemento fundamental do ambiente urbano, indissociável deste e das condições ambientais invariavelmente resultantes do processo de urbanização.

O desenvolvimento das pesquisas sobre os aspectos envolvidos na dinâmica espacial urbana e sua relação com o clima é fundamental para a compreensão da qualidade térmica dos espaços construídos, contribuindo no processo de planejamento. Contudo, mesmo diante da necessidade de considerar as características climáticas locais para alcançar a desejada sustentabilidade ambiental urbana, Alcoforado et al (2005) denunciam que a qualidade do clima não chega a ser considerada na maioria das agendas de planejamento das cidades, inexistindo legislação específica.

Diversos trabalhos científicos reconhecem a urbanização como responsável pela mudança no comportamento dos parâmetros climáticos locais e, conseqüentemente, das condições de conforto térmico nas cidades, mantendo, portanto, estreita ligação com a atividade de planejamento (OLIVEIRA, 1985; OKE, 1987; 1988; BITAN, 1992; MENDONÇA, 1995; BRANDÃO, 1996; KATZSCHNER, 1997; 2007; ASSIS, 1990; 1997; 2000; ROMERO, 1988; 2001; DUARTE, 2000; MONTEIRO; MENDONÇA, 2003; PRATA, 2005; HIGUERAS, 2006; BARBIRATO, SOUZA, TORRES, 2007; GOMES, 2008; BRANDÃO, 2009).

Algumas pesquisas abordam, especificamente, a condição tropical quente e úmida de baixa latitude e indicam a possibilidade da existência de relações particulares nessas regiões, a exemplo da interação entre a temperatura do ar e a morfologia urbana (SAMPAIO, 1981; CARVALHO, 2006), as prescrições edilícias e o escoamento do vento (SILVA, 1999; COSTA, 2001; PEREGRINO, 2005) ou a densidade de ocupação do solo urbano e seus reflexos sobre o conforto térmico (COSTA, 2003; FREITAS, 2008; MOURA, 2008). Tais investigações permitiram a compreensão de algumas dessas relações e, paralelamente, incitaram o seu aprofundamento.

De maneira geral, as pesquisas que abordam o clima e a sua condição alterada pela estrutura urbana reforçam a necessidade de adotar uma escala adequada para analisar os fenômenos envolvidos e a aplicação cada vez mais frequente de conhecimento, métodos e técnicas interdisciplinares. Os trabalhos desenvolvidos recentemente lançam mão de diferentes ferramentas disponíveis aos pesquisadores, sejam medições, equipamentos ou programas computacionais, cujo avanço tecnológico permite quantificar e mesmo prever a alteração nas variáveis climáticas envolvidas. O ideal, no entanto, é o desenvolvimento de uma linguagem que aproxime planejadores e climatologistas para o estabelecimento de diretrizes e linhas de ação a serem efetivamente inseridos nos instrumentos de controle construtivo, manejo e ordenação do solo urbano. Nesse sentido, os estudos são taxativos ao afirmar a necessidade de aplicação do conhecimento acumulado no planejamento das metrópoles.

Andrade (2005) concorda que a aplicação da climatologia no planejamento de áreas urbanas é objetivo comum a todos os autores que abordam o tema. Todavia, o que se observa com maior frequência é a falta de uma inserção mais efetiva. Tal constatação, adverte o autor, é prejudicial, uma vez que o clima urbano deve ser considerado como componente da qualidade do ambiente, com significativa contribuição para a determinação da qualidade de vida em cidades. Golany (1996) reforça o papel fundamental que reside no conhecimento do clima e acrescenta que planejamento deve ser capaz de oferecer formas urbanas adaptativas que considerem as especificidades climáticas de cada localidade.

Duarte & Serra (2003) ressaltam que, muito embora tenha se avançado na compreensão dos fenômenos que envolvem a condição diferenciada do clima urbano, o desafio consiste em converter os dados acumulados em critérios de ocupação que possam ser incorporados à legislação urbana. Sobre tal dificuldade, Assis (2005) acrescenta que, mesmo diante do reconhecimento do papel da climatologia urbana para o desenvolvimento de cidades com qualidade ambiental, sua aplicação à atividade de planejamento permanece limitada, fato que se deve à abordagem fragmentada entre os campos do conhecimento envolvidos e ao caráter descritivo e restrito dos estudos realizados. Para Gomes & Lamberts (2009), a abordagem permite associações tanto com o planejamento das áreas livres, do qual são derivadas questões como o zoneamento, a preservação ambiental e a expansão urbana, entre outros, quanto das áreas construídas, que se relacionam ao uso e ocupação do solo e ao código de edificações, podendo contribuir para a criação de índices urbanísticos mais apropriados em termos de insolação, iluminação e ventilação naturais.

Outra dificuldade em estabelecer critérios de ocupação do solo mais adequados ao ambiente urbano reside no fato de que as cidades compõem estruturas espaciais muito diversificadas, constituídas por diversas unidades de uso do solo. Estas unidades são caracterizadas por diferentes funções, sejam habitacionais, industriais, de serviços ou lazer entre outras, e diversas morfologias (ALCOFORADO et al, 2005). Centros urbanos representam um aglomerado de diversas formas de ocupação do espaço, com configurações que variam ao longo do tempo, negando ou incorporando, em maior ou menor grau, o ambiente natural preexistente.

Em alguns casos, adverte Oke (1988), a incorporação da questão climática na atividade de planejamento urbano envolve a tomada de decisões até mesmo antagônicas. No caso de desenho de vias urbanas, a geometria

¹⁵ Por ocasião da revisão do Plano Diretor de Desenvolvimento de Fortaleza de 1992, que resultou na redação do Plano Diretor Participativo de Fortaleza (PDPFor), Lei Complementar nº 062, aprovada em 02 de fevereiro de 2009, o parâmetro densidade populacional foi inserido em associação ao zoneamento urbano proposto, o controle e ordenamento dos processos de transformações e ocupações urbanas com o objetivo de evitar inadequações urbanísticas e ambientais (FORTALEZA, 2009). Salienta-se, no entanto, a ausência de valores indicados pelo plano diretor como adequados ou mesmo determinando limites quantitativos para cada bairro, região ou zona em função de suas condições ambientais ou possibilidades face à infraestrutura disponível. urbano (IBGE, 2011).

mais aberta é positiva para a dispersão da poluição e garantia de acesso à luz do sol, enquanto que um trecho urbano mais adensado é favorável à proteção solar e, possivelmente, à economia de energia.

Em relação a esse aspecto, Mascaró & Mascaró (1996) observam que o consumo de energia para manter adequados os níveis de conforto ambiental não tem origem apenas nas condições climáticas, mas, em grande parte, deve-se ao desconforto resultante de uma ordenação espacial urbana e arquitetônica que desconsidera as características climáticas do meio e o entorno imediato. Em grandes centros urbanos, o modo de vida da comunidade conduz a um consumo mais intenso, fato que se deve aos acentuados deslocamentos, verticalização e adensamento populacional, investimentos em infraestrutura e conforto ambiental apropriados à escala e ao estilo de vida da população.

Na opinião de Freitas (2008), a relação entre o clima urbano e a forma da cidade estabelece um tema relevante nos dias atuais, não havendo um consenso quanto aos limites e possibilidades para o adensamento construtivo, tema que se coloca cada vez mais frequente no debate sobre os rumos do planejamento urbano contemporâneo. As pesquisas a respeito do tema justificam-se diante do quadro de agravamento dos problemas ambientais nas cidades, tornando-se fundamental discutir o quanto a forma urbana influencia a qualidade de vida, a sustentabilidade e o consumo energético.

Dada à importância do parâmetro urbanístico densidade, este vem sendo paulatinamente incorporado ao debate e processo de planejamento urbano nos mais recentes planos e regulamentações urbanísticas, fornecendo referências para a gestão e decisão sobre a forma de ocupação mais adequada das diferentes partes que compõem o tecido da cidade.

Para Barbirato; Souza; Torres (2007) a discussão acerca da otimização do espaço nas cidades passa, necessariamente, pela questão do adensamento urbano e os impactos ambientais consequentes. Considerando que a qualidade ambiental de edificações é reflexo direto da qualidade ambiental urbana, as variáveis e processos climáticos devem ser considerados na adequação climática das edificações como forma de garantir o conforto térmico e reduzir o consumo de energia.

2.2.1. Adensamento urbano e forma de cidade

O rápido processo de urbanização ocorrido a partir de 1950 exerceu forte pressão sobre o desenvolvimento de diversas metrópoles. Paralelamente, este processo se confrontava com a escassez de terra em algumas áreas urbanas. Em consequência, o adensamento urbano se tornou um tópico de interesse, figurando entre as medidas de planejamento em todo o mundo (CHENG, 2010; PITTS, 2010). A variável insere-se na necessidade de controle da expansão urbana, um dos principais desafios na atual agenda de planejamento das cidades (COUCH; KARECHA, 2006).

Diante do panorama recente, Yeang (1999) acredita que as cidades continuarão em intenso desenvolvimento e expansão, não tendo dúvidas quanto à necessidade de construir estruturas de alta densidade. Com o exponencial crescimento da população e altas taxas de urbanização, Roaf (2010) conclui que, para o século 21, a alta densidade de ocupação não somente é irreversível como, também, inevitável.

Hui (2001) concorda que, visto sob o viés econômico e social, a concentração urbana é imprescindível, tornando obrigatório aumentar a densidade para acomodar pessoas, reduzir os custos de serviços públicos e atingir a necessária coesão social. A realidade da urbanização contemporânea indica densidades mais elevadas do que assentamentos tradicionais e essa tendência é particularmente importante em países menos desenvolvidos.

Parte significativa das correntes urbanísticas contemporâneas é categórica ao pontuar os benefícios proporcionados pelo adensamento. Um modelo de cidade adensada possibilita benefícios ecológicos maiores através de um planejamento integrado que visa concentrar o ambiente urbano em áreas menores, maximizando o aproveitamento da infraestrutura disponível, centralizando as opções de moradia, trabalho e lazer ao mesmo tempo em que aumenta a proximidade das construções para minimizar o consumo de recursos naturais, reduzir o número de viagens e o tempo de deslocamento, diminuindo a emissão de poluentes e, sobretudo, evitando o crescimento sobre as áreas rurais remanescentes que resulta da constante expansão horizontal da malha urbana (ACIOLY; DAVIDSON, 1998; YEANG, 1999; JENKS; BURGESS, 2000; NOBRE, 2004; GIRARDET, 2007; NUCCI, 2008; FREITAS, 2008; LEITE, 2012). É importante acrescentar que a diversidade e a proximidade de usos atribuídas ao adensamento contribuem para a vitalidade urbana, dotando a cidade da necessária efervescência cultural e ocupada ao longo de todo o dia, evitando o esvaziamento de alguns trechos em determinados períodos, tornando-a mais segura e socialmente coesa (ROGERS, 1997; JACOBS, 2000).

O posicionamento acerca dos aspectos positivos, impactos negativos e a eficiência do modelo de cidade adensada como forma de atingir a desejada sustentabilidade ambiental têm sido discutidos em comparação com formas urbanas de baixa densidade ou urbanização dispersa sem, contudo, adotar soluções definitivas, uma vez que cada cidade possui limites e possibilidades específicas (BREHENY, 1997; PEISER, 2001; NEUMAN, 2003; VALE; VALE, 2010; ROAF, 2010). A dificuldade de gestores urbanos em assumir tal posição decorre do fato de que a concentração da população em áreas relativamente pequenas, aspecto defendido pelo discurso do adensamento urbano, pode converter-se em prejuízos ao meio ambiente, uma vez que a pressão de demanda sobre os recursos em alguns casos pode ser incompatível com a capacidade de suporte do meio em questão, tornando insustentável uma determinada distribuição de população sobre um trecho urbano.

Mesmo diante das possibilidades permitidas pela densificação de alguns trechos da cidade devem-se considerar seus limites em relação à qualidade ambiental que resulta desta opção. Freitas (2008) adianta que a densidade adequada para uma área específica é uma expressão relativa, pois densidades muito altas ou muito baixas colocam em risco o meio, a qualidade de vida e a sustentabilidade ambiental. Densidades elevadas podem pressionar o sistema viário, criando congestionamentos, e saturar redes de infraestrutura, expondo a incapacidade de atender a drenagem, ao abastecimento de água e ao esgotamento sanitário de uma região. Jacobs (2000) acrescenta que determinar a densidade adequada para uma região é algo complexo, cabendo uma avaliação segundo a sua performance também em termos qualitativos e não somente quantitativos.

Acseelrad (1999) acrescenta à discussão sobre o tema ao afirmar que existe uma contradição entre a sustentabilidade no âmbito global e a

sustentabilidade local, ou, em outras palavras, “*o que é bom para o planeta não seria o melhor para a cidade*”, explica. O autor pondera que as economias de escala obtidas com transporte, iluminação e aquecimento em cidades adensadas tendem a reduzir o consumo de energia *per capita*, com benefícios para a sustentabilidade global. Em contrapartida, adverte que, uma vez que a capacidade de regeneração dos ecossistemas é constante por unidade espacial, cidades de ocupação mais densa sofrem efeitos negativos da maior produção de resíduos, o que acarreta impactos mais significativos sobre a sustentabilidade no âmbito local.

Steemers (2003) explica que o custo de energia relativamente baixo durante o século passado permitiu a dispersão nas atividades e a diminuição da densidade urbana. Estas baixas densidades, por sua vez, resultaram em grande separação física e difusão de atividades, tornando cada vez mais difícil a organização do transporte. Urbanisticamente, o que se vivenciou neste período foram tentativas de ordenação e contenção do crescimento caótico dos principais centros urbanos europeus. Estas, por sua vez, impulsionaram o desenvolvimento do planejamento regional preconizado por Patrick Geddes baseado nas premissas utópicas de Robert Owen, Charles Fourier e Ebenezer Howard como forma de concretizar a vida na cidade associada à natureza, conceito concretizado pela cidade-jardim como uma fuga a condição tipicamente urbana (HALL, 2007).

Tal desenvolvimento foi impulsionado pela expansão da indústria e da comercialização do automóvel, lançando a base necessária à expansão horizontal das cidades (ECKARDT, 1975). Contudo, reflete Higuera (2006), o alto consumo de solo e elevado dispêndio energético para manutenção das infraestruturas horizontais e a necessidade de deslocamentos cada vez maiores comprometem a sustentabilidade do modelo de urbanização dispersa.

Nobre (2004) esclarece que, a partir da década de 1980, a inserção da questão do desenvolvimento sustentável no cerne dos estudos e teorias urbanas gerou um novo impulso. Diversos autores buscaram o estabelecimento de parâmetros visando ao desenvolvimento urbano sustentado em teorias que valorizavam formas de cidade compactas e adensadas, maximizando o uso da infraestrutura já disponível e reduzindo a necessidade de expandir o tecido urbano em direção à periferia.

Na década de 1990 ocorre uma mudança de paradigma: a performance e a produtividade de uma cidade passam a ser observadas como alguns dos principais parâmetros de uma gestão urbana considerada eficiente, avaliando a forma como é possível maximizar investimentos de origem pública e privada e pela capacidade de gerar os próprios recursos de forma continuada, duradoura. Portanto, as barreiras à produtividade devem ser eliminadas. Isso significa que a deficiência em infraestrutura urbana, que eleva valores de serviços e produtos, a geração de deseconomias e ineficiências e a utilização de legislação urbana obsoleta devem ser suprimidas (ACIOLY; DAVIDSON, 1998).

Uma vez que o adensamento urbano surge como tentativa de evitar tais desajustes na utilização de recursos, serviços públicos e infraestrutura urbana, logo, esclarece Nucci (2008), uma área urbana dotada de infraestrutura subutilizada e sem impedimentos relativamente ao meio físico é considerada como passível de adensamento.

Para Acioly & Davidson (1998) este é um referencial importante para determinar a distribuição e o uso do solo urbano, a infraestrutura e os serviços públicos de uma área urbanizada, constituindo um instrumento de avaliação da eficiência e desempenho das propostas e projetos de parcelamento do solo. A necessidade de elevadas densidades, acrescentam os autores, está diretamente ligada à eficiência na provisão e manutenção das infraestruturas e serviços urbanos, uma vez que há uma diminuição sensível na dimensão de redes por unidade edificada. Consequentemente, pela lógica da eficácia urbana e da economia de escala, mais pessoas terão acesso às redes e serviços básicos. Baixas densidades, ao contrário, significam longas redes de infraestrutura para poucos consumidores e altos custos de investimentos *per capita* para instalação e durante a sua operação.

Campos Filho (1989) p. 94 defende que:

“O critério em um país pobre como o nosso, com gigantescas carências urbanas, deve ser sempre o de extrair o máximo de possibilidades de adensamento oferecido pela estrutura viária e de transportes evitando-se desta forma o parcelamento na área rural.”

Hui (2001) justifica que para lidar com o crescimento da população em um espaço limitado a palavra “densidade” torna-se inevitável. Em vez de expandir as fronteiras urbanas, as cidades geralmente respondem à pressão por desenvolvimento fixando metas para o aumento do nível de densidade de partes destas. Como resultado, a paisagem urbana ganha edifícios em altura e uma forma mais compacta.

Carlos (2007) explica que, por constituir um bem finito, dotado de valor e impossível de ser criado por meio do trabalho, a reprodução do espaço na cidade possui, então, um novo sentido, não acontecendo somente através da adição de terras ociosas ou antes pertencentes ao meio rural, mas, também, a partir do adensamento e verticalização. Somekh (1997) acrescenta que o próprio processo de urbanização determina a concentração da população e de atividades em determinadas partes da cidade, gerando novas configurações do espaço, o que, inevitavelmente, corresponde à verticalização de trechos do tecido urbano.

A verticalização pode ser considerada como a ruptura mais radical na morfologia urbana. Representa uma das principais formas de adensamento, uma vez que permite a construção de um número maior de unidades no mesmo local, necessitando, por outro lado, de maiores áreas segundo o prescrito em legislação. Gonçalves & Umakoshi (2010) explicam que já nas primeiras décadas do século 20, as ideias e propostas para acomodar o crescimento populacional indicavam o papel da tipologia de edifícios altos.

Nos atuais processos de expansão urbana, define Macedo (1988), a produção do solo através da verticalização é, certamente, um dos principais responsáveis pela criação de novas morfologias e na destruição concomitante de uma série de importantes formas de organização do tecido urbano. O que ocorre, segundo o autor, é que o mercado imobiliário elabora e difunde padrões de ocupação do solo verticalizado que são aceitos, consumidos e pouco discutidos pela sociedade, quer no tocante a sua formalização espacial, quer no tocante a qualidade do ambiente, dos espaços produzidos, quer no processo de substituição de tecidos urbanos que este processo está gerando, desvalorizando antigas estruturas ou sobrevalorizando novas situações.

Freitas (2008) observa que, contraditoriamente, são justamente as áreas mais valorizadas pelo mercado que mais sofrem os impactos decorrentes desses processos de alteração na configuração urbana, onde ocorrem a verticalização excessiva, a supressão da vegetação, o aumento na demanda por infraestrutura, a maior poluição do ar e a formação de ilhas de calor.

Para Gonçalves (2003), a maior vantagem do edifício alto reside na capacidade de adensar uma área da cidade promovendo, também, a proximidade de usos, atividades e otimizando o transporte público. Não obstante, por sua natureza e tamanho, a autora adverte que edifícios altos representam um desafio projetual porque afetam negativamente a qualidade ambiental do espaço público. Com edifícios em grande altura são criadas grandes barreiras à circulação do ar, trechos sombreados e elevada turbulência em seus arredores.

Nesse sentido, Brandão (2009) destaca o papel fundamental que cabe a regulação urbanística em relação aos edifícios verticalizados, uma vez que estes representam impactos na estrutura espacial, social e ambiental da cidade. Via de regra, edifícios altos necessitam de maiores áreas segundo o prescrito em legislação, gerando grandes áreas livres, disponíveis para o usufruto coletivo. Em cidades de alta densidade construída, descreve Pitts (2010), são comuns quarteirões de edifícios com 40 pavimentos ou mais e entre 8, 12 ou mesmo 16 apartamentos por andar. O resultado é uma população equivalente ao total de habitantes de um distrito rural ocupando apenas um quarteirão.

O conjunto de medidas que compõe a legislação urbanística visa normatizar a forma de uso e ocupação do lote. Mais do que isso, a morfologia urbana resulta, em grande parte, das possibilidades de ocupação de lotes diante das restrições impostas sob a forma de recuos, a área admissível para edificar em seu interior e a relação entre a dimensão vertical permitida atrelada ao coeficiente de aproveitamento. Assim, a forma urbana, como reforça Macedo (1988), é o resultado da articulação desse conjunto de limitações construtivas direcionadas aos volumes e espaços contidos em cada unidade-lote, entre si e com os demais espaços livres de edificação.

Consequentemente, a manutenção de condições ambientais satisfatórias no interior do ambiente urbano é, em grande parte, influenciada pelas prescrições edilícias. A limitação ou a permissividade construtiva determinada pelos planos diretores e códigos de obra impõe novas formas ao tecido urbano, responsáveis pela porosidade aos fluxos de ar, a maior ou menor incidência solar em áreas urbanas e nas fachadas dos edifícios, as características dos revestimentos e a permeabilidade do solo entre outros aspectos.

Uma vez que a produção do espaço físico na cidade passa, fundamentalmente, pela arquitetura que o constitui (ROSSI, 1995; LAMAS, 2007), as exigências expressas em índices, taxas e dimensões que compõem a legislação urbana são responsáveis por criar as diferentes situações que compõem o mosaico urbano, influenciando o desempenho termoambiental de cada trecho da cidade. Estes, por sua vez, são determinantes para as condições ambientais no interior dos edifícios ali inseridos. Isso ocorre porque o desempenho térmico e o consumo de energia em edificação são influenciados, em grande parte, pelos processos de trocas térmicas que ocorrem entre a envoltória e o ambiente térmico do entorno.

Nesse contexto é preciso destacar que tanto podem ser criadas situações que comprometam as condições ambientais urbanas, com reflexos no comportamento térmico de edifícios, como a relação entre ilhas de calor e o consumo de energia reconhecida por Santamouris et al (2001), como também tais decisões podem gerar situações que não existiam e cuja ambiência é melhor do ponto de vista térmico, como admitem Duarte & Serra (2003), citando a possível compatibilidade entre alta densidade, verticalização e manutenção das condições de ventilação natural urbana.

Miana (2010) resume que o impacto, positivo ou negativo, provocado por uma edificação sobre o entorno inclui a ventilação natural e sua influência sobre a qualidade do ar e o conforto do pedestre; a insolação das fachadas e a disponibilidade de luz natural, relacionadas ao conforto térmico, luminoso e o consumo de energia para atingir níveis satisfatórios desses parâmetros; o acúmulo de calor devido à radiação e seus reflexos sobre o desempenho térmico de edifícios; e a propagação do ruído urbano.

Em cidades adensadas, explica Givoni (2010), os fatores climáticos que comprometem a sensação de conforto térmico são a baixa velocidade do ar, as temperaturas mais elevadas devido ao efeito da ilha de calor e o acesso restrito à radiação solar comparados às condições ambientais comumente verificadas em configurações de baixa densidade. Chama-se atenção para o último aspecto evidenciado pelo autor: a obstrução à incidência do sol tende a ser um dos principais problemas para localidades de clima frio, diretamente dependentes da radiação solar para o aquecimento passivo de edifícios. Em climas quentes, ao contrário, o controle e mesmo a sua redução pode constituir medida fundamental para a determinação de condições de conforto.

Especificamente, no clima quente e úmido é consenso a necessidade do planejamento urbano preservar as condições de ventilação natural (GIVONI, 1994; GOLANY, 1996; FROTA; SCHIFFER, 2003; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005). Do ponto de vista do desenho de cidade, a variação em altura de edificações eleva a turbulência do vento, desvia fluxos e pode gerar áreas de maior e menor circulação do ar, atingindo o nível do pedestre e as aberturas de edifícios mais baixos (GIVONI, 1998). Aliado a essa configuração de ventilação, é recomendada a distribuição de áreas verdes ao longo do tecido urbano devido ao seu potencial para melhoria das condições microclimáticas (ASSIS, 1990; SPIRN, 1995). Esta distribuição pode ser feita atrelada às áreas mais verticalizadas, onde a ventilação natural sofre maiores prejuízos. A proposta tem como objetivo reestabelecer, mesmo que em parte, o padrão de escoamento do ar, antes livre da influência urbana quando soprava de áreas mais abertas, como a zona rural adjacente ou mesmo o mar. Sob a forma de diversos parques espalhados pela cidade, é possível amenizar o sobreaquecimento de recintos urbanos mais adensados. Estas áreas constituem porções menos quentes no interior da cidade ou mesmo ilhas de frescor devido à evapotranspiração, cujo resfriamento pode ser sentido pelos usuários e contribuir à redução do consumo de energia para a climatização de edifícios (SANTAMOURIS, 2001; GIVONI, 2010).

Na escala arquitetônica, há que se considerar que a maior altura dos edifícios pode amenizar o rigor climático, uma vez que a rugosidade do meio urbano impõe efeitos mais significativos sobre o perfil de velocidade do ar. Distantes do solo, os fluxos tem mais intensidade, incidindo com maiores pressões sobre as aberturas localizadas em pontos mais elevados da edificação, permitindo maiores trocas de ar nos ambientes internos.

No entanto, apesar das possibilidades que se colocam à medida que o discurso, as pesquisas e, em alguns casos, os resultados do adensamento urbano são apresentados à comunidade científica e à população das grandes cidades, é fundamental reforçar que a relação entre a densidade urbana, o conforto térmico e o consumo de energia em edifícios é um complexo equilíbrio entre parâmetros climáticos locais, organização espacial urbana e características arquitetônicas. Mesmo considerando os benefícios proporcionados por uma condição urbana mais concentrada, rica em interações sociais e vivência, é preciso atentar para o fato de que o adensamento construtivo tem efeitos diretos sobre o uso e ocupação do solo da cidade, que por sua vez, são determinantes para a formação do clima urbano e sustentabilidade ambiental.

A maior compacidade urbana associada à verticalização de edifícios pode gerar recintos mais confinados, o que é prejudicial do ponto de vista das trocas térmicas. Em paralelo, a menor permeabilidade ao vento, um dos principais responsáveis por refrigerar o ambiente urbano, agrava as condições encontradas em meio às assentamentos compactos. Acrescente-se a essa situação a presença dos materiais que comumente revestem as superfícies das cidades, dotados de maior capacidade térmica e diretamente responsáveis pela geração de estresse térmico devido às temperaturas mais elevadas.

Steemers (2003) enfatiza que as complexas relações entre clima urbano, a forma de cidade mais apropriada e o consumo energético em edificações permanecem como um assunto que necessita de aprofundamento nas pesquisas.

De acordo com Givoni (1998), a compreensão dos fenômenos de aquecimento do meio urbano demonstrou que é mais adequado substituir o parâmetro população, utilizado no desenvolvimento de alguns dos modelos de ilha de calor urbana, por densidade construída. Tal medida, concorda Duarte (2000), deve-se ao fato deste último representar uma relação mais direta ou causal com o aquecimento urbano, reforçando o papel do planejamento do uso e ocupação do solo na cidade.

Não obstante, é necessário considerar a existência de relações complexas, que variam de acordo com a localidade e suas características climáticas, indicando possibilidades distintas ao adensamento para as diversas cidades. Freitas (2008) lembra que, na prática, em localidades de baixa latitude, a altura do sol é maior e o sombreamento interessante ao conforto térmico, o que indica a possibilidade de elevação dos índices urbanísticos, aumentando a densidade urbana desde que se garanta a ventilação e iluminação naturais. No caso específico de climas tropicais quentes e úmidos, a densidade encontra como limite a necessidade de afastamento entre edificações para permeabilidade aos ventos, aspecto fundamental ao desempenho térmico e economia de energia.

2.2.2. A incidência solar em áreas urbanas

Quando o sol não incide sobre as superfícies de uma edificação, a temperatura destas situa-se próximo da temperatura do ar exterior. Por outro lado, quando em exposição à radiação solar, seja direta, difusa ou refletida, a temperatura dessas superfícies se eleva proporcionalmente à quantidade da energia que é absorvida (GIVONI, 1969). O fluxo de calor absorvido pela

depende das características termofísicas dos materiais que a compõem, da sua cor e da orientação em relação aos raios solares, influenciando diretamente a temperatura de ambientes internos.

Ao ser absorvido pela edificação, o calor proveniente do sol transforma-se em carga térmica, e, se a temperatura ambiente supera os limites estabelecidos para o conforto térmico, esta deve ser retirada ou compensada por estratégias de resfriamento tais como a ventilação, seja natural ou mecânica, a evaporação ou o resfriamento do ar. Entretanto, advertem Voss et al (2007), levando-se em consideração a inércia térmica típica de construções convencionais e as limitações das estratégias passivas para resfriamento, o controle das cargas térmicas devido à radiação solar é condição essencial para o adequado desempenho térmico de edificações.

O sol constitui a principal fonte de ganhos de calor em edifícios residenciais situados na região tropical. Nessas localidades não é a temperatura do ar a principal causa de desconforto térmico, mas a temperatura radiante, resultado da incidência solar sobre as diversas superfícies que compõem o ambiente, aquecendo estas que, posteriormente, irradiam energia para o interior do edifício.

A exposição à radiação solar deve, portanto, ser minimizada em climas quentes como forma de reduzir a maior fonte de ganhos de calor e que é capaz de comprometer o conforto térmico no interior dos edifícios residenciais, elevando significativamente o consumo energético para resfriamento. Comumente, a orientação mais indicada às edificações é a norte-sul, com maiores áreas de superfícies verticais paralelas ao equador, reduzindo as proporções de fachadas voltadas para leste e oeste, que recebem taxas de insolação mais elevadas (GIVONI, 1994; 1998; FROTA; SCHIFFER, 2003). Na condição de baixa latitude, a qual a maior parte da região tropical quente e úmida está submetida, a cobertura do edifício receberá a maior quantidade de radiação solar devido à exposição contínua ao sol, que permanece em posição elevada na abóbada celeste a maior parte do tempo. No entanto, deve-se considerar, também, que desde o início da manhã o sol começa a incidir sobre as fachadas voltadas para o quadrante leste, podendo aquecer a envoltória por horas até que o sombreamento proporcionado pela própria cobertura possa proteger as superfícies verticais. Durante a tarde o mesmo ocorre nas fachadas voltadas para oeste.

A relação entre exposição solar de edifícios e a sua alteração devido ao entorno é uma questão comumente analisada sob o viés urbanístico, apesar de sua relação direta com o edifício.

Mormente, a preocupação sobre a garantia de acesso ao sol reside na necessidade de iluminar naturalmente os ambientes dos edifícios. A estratégia é fundamental para a higiene dos compartimentos, além da função fisiológica para os seres vivos. Ainda, para o caso de regiões onde o clima torna necessário o aquecimento solar, este contribui para a manutenção do conforto térmico e a redução do consumo de energia.

A abordagem da insolação de edificações situadas em meio urbano remonta a história. Vitruvius (1960) já ressaltava o cuidado necessário para que todos os edifícios fossem bem iluminados, estabelecendo-se, para tanto, a limitação em dimensões das obstruções provocadas por obstáculos externos sobre o ambiente onde a luz natural deve incidir. Nesse sentido, diversos estudos demonstram a necessidade de considerar o entorno edificado na avaliação das condições ambientais internas ao reforçar a sua

influência sobre o desempenho térmico e luminoso dos edifícios. Um dos impactos diretos da maior verticalização e do adensamento construtivo é a redução do potencial da iluminação natural.

Brandão (2004) demonstrou que a obstrução à luz natural provocada pelos edifícios altera significativamente o consumo energético, uma vez que, em áreas urbanas adensadas, lança-se mão dos sistemas artificiais para condicionamento térmico e iluminação.

Andersen & Sattrup (2011) investigaram o desempenho energético de edifícios situados em cânions urbanos encontrados em cidades europeias. Na investigação foi utilizado um edifício modelo com duas opções de fachada (residencial e comercial) inserido em diferentes situações urbanas comumente encontradas na cidade de Copenhague para verificar a distribuição da radiação solar e da iluminação natural em edifícios, como resume a figura 9. A investigação demonstrou que a luz refletida constitui uma valiosa contribuição para iluminar habitações e escritórios localizados em pavimentos mais baixos de áreas de alta densidade, e, dentro de certas características climáticas, os edifícios do entorno podem contribuir positivamente para redução do consumo energético e o conforto de edifícios vizinhos. No Brasil, Araújo & Cabús (2007) também investigaram tais relações.

Figura 9 – Padrões urbanos típicos e proporções de cânions urbanos em Copenhague para avaliar as tipologias de escritório (A) e residencial (B)

Fonte: Andersen & Sattrup (2011)

Cheng et al (2006) examinou a relação entre forma urbana, adensamento e insolação. O estudo, desenvolvido a partir de dezoito cenários paramétricos, considerou as condições de obstrução ao céu, a disponibilidade de luz natural nas fachadas dos edifícios e o potencial de geração fotovoltaica a partir da envoltória da edificação. Na investigação foram adotadas as condições de céu da cidade de São Paulo. O estudo sugere que a organização espacial urbana mais espaçada ou irregular é, em geral, benéfica. Mais especificamente, reforça que a variação espacial é fundamental à disponibilidade de luz natural nas fachadas e como forma de obter melhores níveis de fator visão de céu.

Em Zhang et al (2012) foi explorada a relação entre densidade urbana, tipologias construtivas e a qualidade ambiental resultante. Os autores escolheram sete quadras típicas de cidades europeias para representar

elevadas densidades, analisando o desempenho destas em relação à quantidade de céu visível (figura 10).

Figura 10 – Simulação da disponibilidade de luz natural em sete diferentes configurações urbanas típicas

Fonte: ZHANG et al (2012).

No entanto, a despeito de sua influência na iluminação natural, o adensamento urbano através da verticalização pode influenciar o desempenho térmico de edificações, não se restringindo à redução da quantidade de luz disponível no interior de ambientes. A redução de parcelas visíveis de céu e sol devido à presença de obstáculos no entorno imediato de um edifício diminui a radiação solar incidente sobre as suas superfícies, alterando a quantidade de energia absorvida.

A magnitude dos impactos dessa obstrução varia de acordo com a latitude e as necessidades de condicionamento ambiental diante das características climáticas do local. Assim, como avalia Miana (2010), é fundamental levar em consideração a influência de edifícios sobre as construções vizinhas e espaços abertos no processo de adequação das edificações a um determinado clima e contexto. Enquanto que em países frios o acesso ao sol é fundamental para aquecer a edificação, contribuindo para o conforto térmico e para a economia de energia, a necessidade em países quentes pode ser outra, acrescenta a autora.

O fator visão de céu permite medir o nível de confinamento dos recintos urbanos devido à presença de edifícios. O parâmetro constitui um importante indicador, uma vez que a relação de proximidade entre edificações, além de reduzir o acesso ao sol, diminui a possibilidade de trocas térmicas devido à alteração nas condições de exposição de edifícios à radiação solar (SANTAMOURIS, 2001).

Brandão (2004) explica que, ao obstruir parte do céu, as edificações situadas no entorno impedirão as trocas de calor por radiação com aquela parte da abóbada celeste em comprimentos de onda longa e curta. Assim, será menor o ganho por radiação difusa de onda curta, mas, em contrapartida, será menor a perda por radiação de onda longa que aconteceria entre as superfícies que compõem os edifícios e o céu,

normalmente em temperatura menor. Quando o sol percorrer aquele trecho que compreende a região obstruída pelo conjunto de edificações, estas impedirão que a radiação solar direta atinja as fachadas dos edifícios próximos. Como resultado, a redução nos ganhos devido à radiação solar e, em consequência, da carga térmica, pode ser significativa. No caso de climas quentes, acrescenta Duarte (2000), o efeito pode ter impacto positivo no desempenho térmico da edificação, apesar do possível aquecimento urbano, uma vez que as obstruções artificiais, diferentemente das naturais, acumulam o calor absorvido durante o dia, tendo dificuldade de libera-lo durante a noite.

O nível de obstrução depende do ponto analisado. Este está relacionado às dimensões de altura e largura do obstáculo e à distância deste até o ponto avaliado. Assim, a obstrução causada pelo objeto é definida a partir dos ângulos de obstrução verticais (Θ_v) e horizontais (Θ_h), como demonstra a figura 11 (BRANDÃO, 2004).

Figura 11 – Obstrução causada por um edifício sobre outro
Fonte: Adaptado de Brandão (2004)

Gupta (1987) avaliou a exposição solar em três diferentes configurações urbanas e sua relação com o desconforto no interior de ambientes. O autor partiu da premissa de que, para climas quentes, uma forma de edifício que intercepta a menor quantidade de radiação solar possível, associada à ventilação natural quando necessária, apresenta melhor desempenho térmico.

Considerando três diferentes condições de análise, entre o uso ou não de sombreamento das janelas e da proteção solar associada à ventilação natural constante (6 trocas de ar por hora), o estudo demonstrou, contudo, que embora a forma de pavilhão apresente a maior área de exposição ao sol, esta obteve menores níveis de desconforto. Assim, concluiu-se que outros fatores exercem maior influência no controle da temperatura interna.

Outro exemplo das especificidades existentes na relação entre o sombreamento provocado pelo entorno adensado é apresentada por Steemers (2003). Na investigação, que se baseou no clima de Londres, foi constatado que as edificações dispostas em situação isolada apresentam perdas energéticas cerca de 40% superiores às de apartamentos, o que reforça o papel da envoltória para controle das condições ambientais interiores. O autor evidencia que o principal fator de redução do consumo de energia é determinado pela incidência de radiação solar nos edifícios, sendo impossível dissociar densidade urbana e condições adequadas de insolação.

Contrariamente a essa situação, Lam (2000) buscou avaliar o quanto o sombreamento provocado pelo entorno pode reduzir a demanda por resfriamento de sistemas de condicionamento do ar em edifícios comerciais. A investigação partiu da análise de 120 edifícios situados em diferentes distritos comerciais de Hong Kong para preparar um modelo genérico. Com base nesse modelo, simulações para cada hora foram realizadas no programa DOE 2.1E. Os resultados indicaram que 30% da carga térmica a ser retirada pelo sistema de refrigeração está relacionada aos ganhos pela envoltória. Durante o período de verão, mais precisamente às 15:00, o sombreamento pode significar uma redução de 14% no consumo de ar condicionado durante o pico comparando-se a uma situação desobstruída.

Também seguindo a hipótese de que a obstrução à incidência solar é benéfica ao desempenho térmico, Li & Wong (2007) se valeram de técnicas de regressão para relacionar as reduções no consumo de energia e a obstrução à iluminação natural devido à maior verticalização do entorno. Analisando a condição adensada da subtropical Hong Kong, os autores evidenciam que o aumento nos ângulos de obstrução é acompanhado pela diminuição na carga térmica interna, uma vez que a radiação solar não penetra no interior dos ambientes da mesma forma como se estivesse em condição desobstruída.

Martins; Adolphe; Bastos (2014) abordaram o mesmo tema, contudo, sob a ótica da diminuição no potencial de geração fotovoltaica. A investigação lidava com dois aspectos conflitantes para uma cidade de clima quente e úmido: de um lado a redução no potencial para geração de energia e, de outro, o aumento no consumo devido aos indesejáveis ganhos de calor em edifícios devido ao sol.

Como evidenciam as pesquisas anteriores, a preocupação em relação à diminuição da quantidade de radiação solar absorvida pelas superfícies pode ser válida para a melhoria das condições ambientais internas e redução do consumo de energia em regiões de clima quente. Contudo, alguns dos estudos ressaltam não somente a necessidade de orientação solar e isolamento térmico adequados, mas, também, a avaliação do contexto urbano em que se inserem as edificações, uma vez que o próprio meio pode reduzir parte da energia que seria absorvida pelo envelope do edifício. É possível, porém, dificultar a perda de calor para o meio externo, devendo existir aí um meio termo entre estas relações.

A interação térmica entre o ambiente interno e as condições ambientais externas é, em grande parte, realizada pela envoltória do edifício, cabendo a esta a função de excluir do interior os extremos climáticos que caracterizam os diversos climas (OLGYAY, 1963; SERRA, 1999). Lamberts & Triana (2007) acrescentam que as características da envoltória e dos sistemas construtivos utilizados são determinantes para o desempenho térmico da edificação. A definição dos tipos e cores dos materiais utilizados, o emprego ou a ausência de isolantes térmicos, a orientação solar, a dimensão e a

tipologia das esquadrias, as cargas térmicas produzidas internamente e a aplicação de estratégias bioclimáticas influenciam o desempenho e consumo de energia da edificação.

Numa metodologia que associa simulações de clima urbano através do programa *ENVI-met* e a previsão do desempenho térmico utilizando o *EnergyPlus*, Yang et al (2012) desenvolveram um método para quantificar a performance energética de um edifício em um dado contexto urbano. Como ressaltado no estudo, é comum a inserção inadequada de parâmetros climáticos do meio urbano nos estudos de desempenho térmico de edifícios, o que motivou a investigação. Via de regra, são assumidos arquivos climáticos ou situações que diferem das condições ambientais verificadas no entorno imediato do edifício analisado, influenciando os resultados e, possivelmente, determinando imprecisões significativas.

Na investigação foram adotadas variáveis microclimáticas de radiação solar, temperatura, umidade do ar e vento resultantes dos processos que ocorrem no conjunto utilizado para representar o meio urbano, obtidas através do *ENVI-met*. Os dados foram, posteriormente, inseridos nas avaliações de desempenho térmico no *EnergyPlus*. Os resultados reforçaram as premissas de que a carga para resfriamento é diretamente afetada pela quantidade de radiação solar que atinge as fachadas do edifício. Ainda, as trocas de calor por convecção induzidas pelo vento têm um peso considerável tanto nas cargas para resfriamento como para aquecimento (YANG et al, 2012).

Figura 12 – Detalhe do modelo de ocupação urbana no ENVI-Met (esquerda) e no EnergyPlus (direita)

Fonte: Yang et al (2012)

Ainda que tratem do conforto e fenômenos térmicos envolvidos numa perspectiva urbana, algumas das pesquisas evidenciam o papel da obstrução ao sol na determinação das condições ambientais, permitindo, por outro lado, o questionar o potencial dessa estratégia para ambientes internos.

Emmanuel; Roselund; Johansson (2007) ressaltam, por exemplo, a existência de “ilhas de frescor” devido ao sombreamento provocado por edifícios e árvores em cidades tropicais. Mesmo diante de ângulos elevados de insolação nessas localidades, os autores ressaltam que a possibilidade de manipular o fator sombreamento constitui uma valiosa estratégia para mitigar os efeitos da ilha de calor. Assim, a densidade construída poderia ser utilizada como uma estratégia de resfriamento do meio urbano durante o dia,

e, a partir dessa premissa, um benefício pode ser derivado da rápida urbanização pela qual atravessam cidades nessa faixa de clima.

Da mesma sorte, Assis & Frota (1999) investigaram o campo térmico de áreas urbanas em Belo Horizonte utilizando dados do clima local e através de simulações físicas. A ocupação do solo, a forma urbana e as temperaturas médias máximas e mínimas foram analisadas em conjunto. Utilizando um índice de conforto térmico, as autoras avaliaram as condições de conforto nas áreas escolhidas.

Por meio de uma análise utilizando a técnica de regressão simples entre temperaturas e densidades urbanas, demonstrou-se a tendência de elevação na temperatura durante o dia foi observada predominantemente em área de pouca verticalização com rarefeita vegetação. As áreas mais verticalizadas, por sua vez, permaneciam mais aquecidas durante a noite, tanto no verão como no inverno. No geral, o estudo concluiu que para densidades entre 130 a 150 habitantes por hectare com pouca vegetação (3%), o impacto negativo de áreas menos verticalizadas sobre o conforto térmico é maior do que em áreas com edifícios altos durante o verão.

Em seus estudos baseados na cidade de São Paulo, Sakamoto (1994) concluiu existir uma conexão entre a configuração do céu e a temperatura do ar. Contudo, esta relação não era linear ou constante ao longo do tempo. Nas áreas da cidade onde o fator de visão do céu era maior, trechos onde não há predomínio de edifícios altos e outros obstáculos, como no bairro Jardins, a temperatura do ar durante o dia era mais elevada em relação às regiões onde o fator visão do céu era menor, como no centro da capital paulista, dominado por edifícios altos. Esse efeito se invertia durante a noite. O estudo ressaltou, ainda, que as diferenças de temperatura podem criar deslocamentos de ar e a interação entre o vento e a temperatura tem influência significativa em alguns períodos, reduzindo a influência da configuração do céu.

Para Carvalho (2006), o fator visão de céu é fundamental para caracterizar a capacidade de um determinado ambiente em dispersar a radiação térmica acumulada durante o dia. Ainda, para o caso de climas quentes, a ferramenta pode ser utilizada para indicar o ganho de radiação solar direta, como afirmado nos estudos de Sakamoto (1994), Brandão (1996) ou Assis (2000).

Analisando uma cidade de baixa latitude, Carvalho (2006) identificou fracas correlações entre a temperatura do ar e o fator de visão do céu. Seguindo esta mesma metodologia para medir a influência da sombra provocada pelos edifícios em diferentes orientações da malha urbana de João Pessoa sobre o campo térmico, Carvalho et al (2009) demonstraram que um bairro menos verticalizado apresentou temperaturas mais elevadas em comparação a outro, cujas edificações mais altas geraram maiores dimensões e períodos de sombras. Assim, concluem que a verticalização, desde que planejada, pode ser associada à permeabilidade ao vento e ao controle da radiação solar como forma de melhorar as condições ambientais urbanas e reduzir o consumo de energia em edifícios.

As diversas investigações apresentadas anteriormente atestam a eficiência do sombreamento para melhorar a ambiência térmica de partes do tecido urbano. A presente pesquisa inclui, especificamente, a necessidade de avaliar o potencial da obstrução provocada pelo entorno para reduzir a carga térmica interna, questionando sua influência efetiva sobre o conforto térmico em edifícios.

2.2.3. A ventilação natural em áreas urbanas

Entre os elementos que compõem o clima, o vento é o que mais facilmente pode ter seu comportamento alterado e, ao mesmo tempo, controlado pelo desenho urbano. A densidade construída, a altura e a largura dos edifícios, a orientação das ruas e o espaçamento entre as edificações, o tamanho e a distribuição das áreas livres são responsáveis pela permeabilidade do meio urbano (GIVONI, 1994; 1998; ROMERO, 2001).

Ao adentrar a cidade, o vento sofre desvios, modificando verticalmente seu perfil de velocidades em função do atrito com as superfícies que formam a paisagem urbana e, conseqüentemente, reduzindo a pressão incidente sobre as fachadas de edifícios.

Quando o ar flui das áreas adjacentes para o ambiente urbano, este se ajusta às novas condições definidas pela cidade. As peculiaridades devidas às características urbanas têm como resultado o surgimento de duas camadas verticais: uma primeira, chamada de camada dossel urbana ou camada de cobertura urbana, que vai do nível do solo até o topo dos edifícios e na qual os processos atmosféricos estão relacionados à escala do nível das ruas e dos espaços entre as estruturas construídas, e um nível livre da presença de obstáculos, que se estende desde o topo dos edifícios, a qual se denominou camada limite urbana e cujos fenômenos atmosféricos possuem escala e natureza local ou mesmo regional (MELARAGNO, 1986; OKE, 1987; ALCOFORADO, 1992; GIVONI, 1998; GEORGAKIS; SANTAMOURIS, 2005).

Para Chandler (1976), o processo de urbanização é responsável pela alteração significativa no comportamento do vento, elevando a altura da camada limite atmosférica e reduzindo a velocidade do ar próximo à superfície. É justamente no nível obstruído desta primeira camada que o fluxo de ar livre tem seu momento transformado em pressão sobre as fachadas dos edifícios, afetando o comportamento do vento nas regiões adjacentes.

Figura 13 – Esquema da camada limite urbana

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

Ao analisar o vento sobre o ambiente construído é possível concluir que o comportamento dos fluxos é influenciado pela geometria e orientação dos obstáculos, sendo fundamental o conhecimento dos efeitos aerodinâmicos gerados pelas estruturas urbanas. O edifício, dada a sua massa volumétrica, é capaz de alterar significativamente os fluxos de ar em seu entorno, possuindo uma área de influência mais expressiva do que somente o seu volume. Em condições normais de escoamento, o edifício divide as correntes que incidem em sua fachada, acelerando o ar junto às suas arestas, criando condições altamente turbulentas no solo e vórtices na região

imediatamente posterior, como retratado em diversos trabalhos (GIVONI, 1962; OLGYAY, 1992; EVANS; SCHILLER, 1994). De acordo com as dimensões e o posicionamento da massa construída em relação aos fluxos, uma série de efeitos é criada, com diferentes impactos e diversas possibilidades para o planejamento urbano.

Diversos meios podem ser utilizados para avaliar o comportamento da ventilação natural em meio urbano e no interior de edifícios, dos mais simples, como a mesa d'água, os algoritmos simplificados para determinar a vazão de ar, passando pelos ensaios em túnel de vento até os avançados programas de dinâmica dos fluidos computadorizada. Allard (1998) resume que a compreensão dos fenômenos envolvidos e o conhecimento das características específicas do escoamento de ar num determinado espaço, assim como prever as taxas de vazão de ar em edifícios, tornam-se necessários por razões de conforto e face à questão do consumo energético.

Santamouris (2001) demonstrou, por exemplo, que edifícios situados em cânions urbanos na cidade de Atenas sofrem redução de até 90% nas taxas de fluxos de ar através da ventilação natural. Os experimentos realizados pelo projeto URBVENT¹⁶ quantificaram as alterações provocadas no vento e temperatura em ambiente urbano comparando-as à condição não perturbada. Entre as principais limitações ao aproveitamento do vento foram investigadas as relações de incidência do vento e a velocidade do ar no interior de cânions urbanos (GEORGAKIS; SANTAMOURIS, 2005), o nível de ruído (NICOL; WILSON, 2003) e a presença de contaminantes.

Considerando a condição urbana adensada, Ghiaus et al (2006) mediram o efeito das principais variáveis ambientais sobre o potencial de utilização da ventilação natural. Compreendendo que o agravamento de tais parâmetros passa a restringir a aplicação dessa estratégia, os autores realizaram medições de velocidade do ar, temperatura, nível de ruído e concentração de poluentes em diversas configurações de cânions urbanos.

Como resultado da série de medições, modelos empíricos foram elaborados para calcular os limites e reais possibilidades de aplicação da ventilação natural dentro de certos intervalos. O estudo evidenciou, ainda, que algumas características verificadas em cânions urbanos tais como a presença de varandas e o sombreamento devido à proximidade dos edifícios podem atenuar as condições extremas verificadas nestes (GHIAUS et al, 2006).

¹⁶ O projeto intitulado URBVENT: *Natural Ventilation in the urban Environment* (2004), constitui o esforço comum entre pesquisadores e instituições reunidos no quinto Programa de Pesquisa e Desenvolvimento promovido pela Diretoria de Ciência, Pesquisa e Desenvolvimento da Comissão Europeia. Um dos objetivos do projeto consistia numa ferramenta acessível a arquitetos e projetistas a partir de uma metodologia para compreensão do potencial e aplicação eficiente da ventilação natural como estratégia de diminuição do consumo energético para resfriamento, melhoria das condições de conforto térmico e qualidade do ar no interior das edificações.

Figura 14 - Redução da velocidade e pressão devido ao vento em meio urbano adensado
Fonte: Ghiaus et al (2006).

Allard; Ghiaus; Szucs (2010) realizaram um levantamento sobre as recentes pesquisas envolvendo a ventilação natural urbana. De maneira geral, os estudos reconhecem a importância das taxas de renovação do ar para o conforto térmico e qualidade do ar no interior de edificações e a sua dependência em relação à velocidade e pressão sobre as fachadas. Nas pesquisas foram examinados os principais fenômenos envolvidos na ventilação natural de edifícios, quantificando-os através da formulação de modelos empíricos na tentativa de mitigar os efeitos da redução significativa que os fluxos sofrem em sobre o meio urbano, comprometendo o potencial da ventilação natural como ferramenta para redução do consumo energético.

A necessidade de otimizar as condições de circulação do ar na adensada Hong Kong através da maximização da ventilação natural motivou a elaboração do sistema de avaliação da ventilação (*Air Ventilation Assessment* – AVA), iniciativa realizada no âmbito da gestão administrativa pública. O objetivo do estudo era determinar meios para atingir níveis aceitáveis de movimento do ar em ambientes internos e no nível do pedestre. A equipe, multidisciplinar e composta por pesquisadores de diversas instituições, desenvolveu um indicador simples, denominado razão de velocidade do vento, utilizado para auxiliar no planejamento e avaliação das propostas. Gráficos e índices também foram confeccionados contendo recomendações em relação ao movimento do ar para o conforto térmico tanto na escala urbana como no ambiente interno (HKPD, 2005).

Posteriormente, as contribuições dessa iniciativa foram apresentadas em Ng (2008; 2009) e representam uma perspectiva prática de aplicação dos indicadores desenvolvidos no planejamento urbano. Utilizando um túnel de vento, estabeleceu-se um cenário de ocupação de alto adensamento construtivo para avaliar a pressão incidente nas fachadas e o comportamento do ar nos espaços entre os edifícios. A quantidade de trocas de ar por hora foi utilizada como indicador do potencial de ventilação interna de acordo com as diferentes configurações urbanas testadas para avaliar a qualidade do desenho urbano proposto. Os resultados evidenciaram a necessidade de criação e manutenção dos percursos livres para os fluxos de ar em meio urbano, somente possíveis ao aliar alto adensamento aos intervalos, sejam estes vazios urbanos sob a forma de praças, parques ou simplesmente o espaçamento entre os edifícios (NG, 2008). Posteriormente, os estudos sobre a ventilação urbana foram estendidos motivados por uma severa crise na qualidade do ar ocorrida em 2003 na cidade de Hong Kong (NG, 2009).

Figura 15 – Estudo de caso em Mong Kok, China. No caso 1 o planejamento urbano com diretrizes apontadas pelo estudo e o caso 2 corresponde ao desenvolvimento urbano permitido pela legislação.

Fonte: Ng et al (2011)

Os resultados das simulações CFD apontaram a maior permeabilidade ao vento no caso 1 em relação ao caso 2. As frequências de ventos de baixa intensidade no caso 1 foram menores do que no caso 2. Ainda, a frequência de ventos de alta velocidade foram maiores no caso 1 do que no caso 2, reforçando a importância de diretrizes como afastamentos, taxa de ocupação e organização da morfologia urbana mais consciente do papel do vento no espaço da cidade (NG et al, 2011).

Hang & Li (2012), também investigando o fluxo de ar sobre áreas urbanas adensadas, demonstraram a influência do alinhamento de uma série de edifícios altos com dimensão vertical variável e uniforme, entre 80 e 60 m de altura (figura 16).

Figura 16 – Série de edifícios testados com altura variável (esquerda) e outra série com altura constante (direita)

Fonte: Hang & Li (2012).

Utilizando simulações computacionais validadas por ensaios em túnel de vento, os autores reforçaram as premissas de que um conjunto de edifícios altos representa uma barreira de resistência significativa, reduzindo a intensidade dos fluxos no espaço entre a série de edifícios altos. Perfis verticais da velocidade do ar e a intensidade de turbulência foram medidos, como demonstra a figura 17 (HANG; LI, 2012).

Figura 17 – Visualização em corte (acima) e em planta (abaixo) do comportamento dos fluxos ao encontrar a série de edifícios altos dispostos em fila

Fonte: Hang & Li (2012)

Analizando um conjunto de seis edifícios residenciais em Chongqing, na China, com 35 pavimentos cada, Liu et al (2014) avaliaram o comportamento dos fluxos e o sombreamento provocado pelos edifícios através de simulações computacionais, como resume a figura 18. Nas análises foram considerados intervalos de afastamento entre os edifícios segundo diferentes ângulos de incidência do vento, determinados a partir dos dados meteorológicos da localidade. Primeiramente foram realizadas as simulações da ventilação natural urbana para determinar a distribuição da pressão incidente e a velocidade do ar. Os resultados indicaram que o potencial de ventilação natural, obtido com base na diferença média de pressão, aumenta com o espaçamento entre os edifícios, diminuindo na medida em que o ângulo de incidência do vento torna-se obtuso em relação à fachada (LIU et al, 2014).

Em outro momento, definido após as análises dos fluxos, foi investigada a performance de três propostas de implantação do conjunto edificado em relação à luz natural e sombreamento provocado pelos edifícios. Nesse caso, enquanto a diminuição do ângulo de incidência do vento em relação à fachada representa uma melhoria para a ventilação natural, o sombreamento provocado pelos edifícios sobre os demais revela um aspecto negativo, o que tornou necessária a alteração das propostas até então analisadas visando compatibilizar as duas variáveis (LIU et al, 2014).

Figura 18 – Visualização dos fluxos no entorno dos cinco edifícios (a), a pressão incidente sobre as superfícies (b) e o comportamento da ventilação natural no interior das unidades habitacionais.

Fonte: Liu et al (2014)

No Brasil, o desenvolvimento de trabalhos e o conhecimento das questões relacionadas ao vento e ao planejamento urbano podem ser considerados relativamente recentes. As pesquisas desenvolvidas por Silva (1999), Costa (2001), Prata (2005), Souza (2006), Peregrino & Silva (2007), Leite (2008), Leite (2010) tratam, mesmo diante da variação de enfoque de um caso para outro, dos reflexos da transformação do espaço urbano através da

verticalização e o maior adensamento construtivo sobre o comportamento do vento na escala da cidade.

A metodologia empreendida por Silva (1999) para avaliar as condições de ventilação natural no ambiente urbano tomou como base a cidade de João Pessoa e estabeleceu os regimes de vento como condição limite, na qual os dados colhidos durante períodos significativos são analisados de forma a constituir um atlas de vento. Simultaneamente aos registros feitos pelo aeroporto local foi realizada uma medição *in loco* visando a sua integração. A partir de ensaios em túnel de vento, a influência das mudanças nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural foi verificada qualitativa e quantitativamente.

Costa (2001) analisou os três últimos planos diretores do desenvolvimento urbano de Natal, avaliando os resultados das prescrições edilícias permitidas sobre o campo de vento em bairro suscetível à verticalização. Os diversos cenários confeccionados à luz da legislação urbana foram submetidos a um aplicativo CFD para visualização dos fluxos.

Prata (2005) combinou ensaios em túnel de vento e simulações através de CFD para determinar os impactos da ocupação verticalizada na orla de Santos sobre as condições de ventilação natural urbana e o conforto do pedestre. Considerando que as condições de ventilação sofrem alteração segundo a altura e a posição dos edifícios, a autora conclui que para a melhoria do clima urbano é imprescindível o aumento das distâncias entre edificações como forma de aumentar a permeabilidade ao vento.

Souza (2006) avaliou os impactos da elevação do gabarito permitido a um bairro de Goiânia sobre a ventilação natural. No estudo, modelos tridimensionais de ocupação do solo foram submetidos à simulação computacional para visualizar o escoamento do vento sobre a área. Como resultados, foram determinadas as configurações que geravam baixas velocidades do ar, comprometendo o conforto térmico dos habitantes e o consumo energético das edificações inseridas naquela parte da cidade.

Peregrino & Silva (2007) investigaram a relação entre o escoamento do vento e padrões de ocupação do solo determinados pela legislação de João Pessoa. Através de modelos em escala reduzida submetidos ao túnel aerodinâmico de camada limite atmosférica, os autores concluíram que o escalonamento proposto pela legislação vigente compromete o aproveitamento da ventilação natural. Em contrapartida, um cenário proposto para a área composto por edificações verticalizadas e maior adensamento construtivo, apresentou maiores velocidades do ar, contribuindo para a qualidade do ar, o conforto térmico e a economia de energia.

Também analisando o impacto da verticalização de trechos da orla sobre a ventilação natural no interior da malha urbana, Leite (2008) investigou a elevação do gabarito das edificações junto à avenida litorânea de São Luís. Com cenários virtuais submetidos a ambiente CFD, a autora avaliou os padrões de velocidade e direção do vento, concluindo que a verticalização da avenida litorânea influencia significativamente os padrões de vento predominante sobre as quadras adjacentes.

Leite (2010) examinou a influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural. A verticalização que vem ocorrendo em um trecho específico de Fortaleza, impulsionada pelo mercado imobiliário e permitida pela legislação urbana, intensifica o adensamento

¹⁷ RAUPACH, M. R.; ANTONIA A.; RAJAGOPALAN, S. **Rough-wall turbulent boundary layer.** Appl Mech Rev, v. 44, n. 1, p. 1-25, janeiro, 1991 apud Cóstola (2006).

construtivo. Comparando cenários de ocupação máxima e uma proposta intermediária desconsiderando a exceção presente no plano diretor, e que era responsável pela elevação na altura das edificações, o autor apontou melhores condições de ventilação para o trecho estudado mesmo com edifícios mais altos. Em contrapartida, a elevação no gradiente de vento comprometia a ventilação na região posterior ao trecho estudado.

2.2.3.1. Rugosidade aerodinâmica

O vento, ao entrar em contato com uma superfície, tem seu fluxo influenciado pela fricção. As características desta superfície definem o nível de atrito imposto ao movimento do ar, potencializando um rápido decréscimo da velocidade média ao se aproximar da superfície. Na ausência de significativos efeitos térmicos, a magnitude da influência do atrito depende da rugosidade da superfície (OKE, 1987).

A rugosidade aerodinâmica (Z_0) pode ser definida como a altura acima do solo na qual a velocidade média do deslocamento é zero (STULL, 1988). Raupach; Antonia; Rajagopalan (1991)¹⁷ explicam que a rugosidade aerodinâmica é aplicada para caracterizar a influência de uma superfície sobre o escoamento, sendo que os resultados desta análise somente são válidos acima da dimensão vertical dos elementos que geram esta rugosidade.

De acordo Peregrino & Silva (2007), até a fronteira da camada limite atmosférica, os fluxos e velocidades estão condicionados às características tridimensionais e turbulentas do terreno, às condições atmosféricas e à intensidade do vento. Estas características fazem com que a espessura da camada varie desde poucas centenas de metros até quilômetros de altura.

Parâmetros de rugosidade servem para descrever o quão eficiente é uma determinada área de superfície para transformar a energia de um vento “médio” que flui sobre ela em movimento turbulento na Camada Limite Atmosférica (CLA) acima desta (WIERINGA et al, 2001).

No caso da complexa geometria verificada nas cidades, observa Prata (2005), é comum a utilização de valores de rugosidade já testados e publicados. Diversas referências apresentam valores pré-definidos de rugosidade (STULL, 1988; DAVENPORT et al, 2000; LOPES, 2003), com algumas investigações voltadas à discussão e mesmo a revisão desses dados visando sua aplicação adequada às condições encontradas no ambiente urbano (GRIMMOND; OKE, 1999; WEIRINGA et al, 2001; OKE, 2006). O objetivo é, de maneira geral, considerar a perda de velocidade que ocorre na aproximação com a superfície em função da rugosidade. Prata-Shimomura (2010) acrescenta que valores de rugosidade associados a cálculos de ventilação natural urbana e índices de conforto podem auxiliar no reconhecimento e na caracterização de áreas presentes em nossas cidades.

Comumente, as análises de ventilação natural são realizadas com base em dados climáticos de estações meteorológicas cujas condições de exposição ao vento diferem significativamente da região de interesse. Em função da rugosidade do meio, da presença de obstáculos e da altura de coleta das informações é necessário corrigir a velocidade do ar para aproximar os valores disponíveis da situação estudada. Tais correções podem ser feitas a partir de uma série de equações para calcular o perfil transversal de vento, como apresentado em diversos documentos (BS 5925, 1991; ASHRAE, 2003; EUROCODE EC1-4, 2005).

2.2.3.2. Perfil de vento sobre o meio urbano

O campo de vento na camada limite é controlado pela fricção imposta ao fluxo devido às características físicas da superfície sobre a qual se desenvolve. Com base nesse fenômeno, Cândido & Bittencourt (2005) explicam que o aumento da velocidade do ar ao longo de um eixo vertical varia: seu valor é nulo junto à superfície e atinge intensidade máxima igual ao seu fluxo em uma área livre de obstruções em uma determinada altura, conformando o que se convencionou chamar de gradiente da velocidade do vento.

Lopes (2003) explica a relação direta entre a rugosidade do meio e a altura da camada limite (Z_g) na atmosfera. Em comparação às áreas abertas e planas, o topo da camada limite, que corresponde ao nível em altura acima do qual a velocidade média do ar é constante, é mais baixo do que as áreas rurais, cuja rugosidade é um pouco mais elevada. Já para o caso das cidades, onde o nível de rugosidade é ainda mais expressivo, a altura em que são desprezíveis os efeitos da rugosidade é bem mais afastada. Conclui-se, portanto, que o gradiente de velocidade do ar diminui em função do aumento na rugosidade. Melaragno (1982) resume que a altura do gradiente (Z_g) é aquela acima da qual o atrito com a superfície terrestre não mais afeta a velocidade do vento.

A variação da velocidade média em função da altura corresponde ao perfil transversal de velocidade do ar. Este pode ser descrito pela lei logarítmica de Prandtl (equação 1):

$$U_{(z)} = \frac{u_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$U_{(z)}$: velocidade média do vento em determinado nível (z);

u_* : velocidade de atrito;

k : constante de Von Kármán (comumente adota-se o valor de 0,40);

z : altura em relação ao solo;

z_0 : comprimento característico da rugosidade do solo ou simplesmente rugosidade.

A equação 1 descrita anteriormente apresenta, no entanto, dois parâmetros desconhecidos (u_* e z_0). Por outro lado, é possível determinar a velocidade do ar segundo a altura em relação ao solo a partir da transposição das medidas tomadas em estações meteorológicas. A equação 2, retirada de EUROCODE EC1-4 (2005), permite calcular a velocidade média do ar (V_m) em função da altura.

$$V_m = C_r(z) \cdot C_o(z) \cdot v_b \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

C_r : fator rugosidade

C_o : fator orografia (para condições normais, normalmente adota-se o valor de 1)

V_b : velocidade média do ar tomada da estação meteorológica mais próxima.

O valor de do fator de rugosidade (C_R) pode ser obtido a partir da equação 3, baseada no perfil logarítmico da velocidade do ar. O cálculo é possível para a situação em que a altura da cota (z) está entre a altura mínima ($z_{\min}$) definida pela tabela 1 e uma altura máxima ($z_{\max}$) de 200 m (EUROCODE EC1-4, 2005).

$$C_r = k_r \cdot \ln(z/z_0) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

k_r : fator do terreno em função da rugosidade calculada a partir da equação 4 (EUROCODE EC1-4, 2005):

$$k_r = 0,19 \cdot (Z_0/Z_{0,II}) \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$Z_{0,II}$ corresponde ao valor de 0,05 (terreno categoria II da tabela 1.

Classe	Categoria	z_0 (m)	$z_{\min}$ (m)
0	Mar ou área costeira exposta ao mar	0,003	1
I	Lagos ou área plana com pouca vegetação e sem obstáculos	0,01	1
II	Área com baixa vegetação como grama e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separação de pelo menos vinte vezes a altura dos obstáculos	0,05	2
III	Área com presença regular de vegetação ou edifícios ou com obstáculos isolados separados por distâncias máximas de 20 vezes a altura dos obstáculos (vilas, subúrbio, floresta)	0,3	5
IV	Área na qual pelo menos 15% da superfície é coberta por edifícios e a altura média é superior a 15 m	1	10

Tabela 1 – Classes de rugosidade e características físicas típicas do entorno
Fonte: EUROCODE EC1-4 (2005)

Figura 19 – Exemplos de diferentes classes de rugosidades
Fonte: EUROCODE EC1-4 (2005)

Adotando-se uma velocidade de referência com base em registros de uma estação meteorológica, como a localizada no aeroporto Pinto Martins, em Fortaleza, pode-se perceber que a variação da velocidade do ar em diferentes alturas é proporcional o comprimento apresentado por cada classe de rugosidade. Tomando as cinco classes de indicadas anteriormente, é possível inferir acerca da influência da rugosidade sobre a velocidade do ar, como descrito graficamente nos perfis transversais (figura 20).

Figura 20 – Perfis transversais de velocidade do ar de acordo com 5 classes de rugosidade
Fonte: Adaptado de EUROCODE EC1-4 (2005)

Apesar de descrever a alteração provocada por diversos tipos de terreno, pode-se notar, a partir das imagens que correspondem às classes de rugosidade definidas por EUROCODE EC1-4 (2005), que estas não permitem avaliar adequadamente a influência dos atuais arranjos urbanos mais densos sobre a intensidade do vento. A equação 5 presente em ASHRAE (2003) adota metodologia semelhante para descrever a alteração do perfil transversal de vento em função do terreno, agora em classes definidas de acordo com as características do meio. A norma prevê, entretanto, coeficientes mais altos para representar a condição de meio urbano.

$$U_H = U_{\text{met}} \left(\frac{\delta_{\text{met}}}{H_{\text{met}}} \right)^{\alpha_{\text{met}}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

U_H : velocidade do vento no sítio;

U_{met} : velocidade do vento na estação meteorológica;

δ : espessura da camada limite;

δ_{met} : altura da camada limite, comumente em área livre de obstáculos (270 m).

H : altura do ponto de medição;

H_{met} : altura da estação meteorológica (comumente as medições são a 10 m do solo);

α : coeficiente dependente do terreno;

α_{met} : coeficiente da estação meteorológica, em área livre de obstáculos (0,14).

A tabela 2 apresenta outros parâmetros da camada limite atmosférica.

Tipo de terreno	α	δ (m)
Cidades grandes com 50% dos edifícios com altura superior a 21 m	0,33	460
Área de subúrbio com residências espaçadas ou áreas de florestas	0,22	370
Terreno livre com alguns obstáculos com altura inferior a 10 m	0,14	270
Áreas expostas próximas a grandes massas d'água até 500 m da costa	0,10	210

Tabela 2 – Altura da camada limite atmosférica segundo o coeficiente de rugosidade do terreno

Fonte: ASHRAE, 2003

De modo análogo ao realizado anteriormente, os perfis gerados pela equação presente em ASHRAE (2003) são apresentados na figura 21, elaborada com base na velocidade média para a principal incidência de vento registrada pela estação situada em Fortaleza. É possível perceber que, diferentemente dos resultados apresentados por EUROCODE EC1-4 (2005), a influência da rugosidade é mais significativa não somente nos níveis mais baixos como também com a elevação em altura.

Figura 21 – Perfis transversais de velocidade do ar a partir de acordo com quatro classes de rugosidade

Fonte: ASHRAE, 2003.

Outra expressão é definida por BRE (1978)¹⁸, bastante difundida e comumente aplicada aos estudos de ventilação natural urbana. Na equação, valores de velocidade do ar medidos em estações localizadas em pontos desobstruídos ou fora dos limites urbanos são multiplicados por fatores (k e a) em função do tipo de terreno, determinando a velocidade do ar na cota z desejada (equação 6).

$$V = V_m \times k \times z^a \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

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

V_m = velocidade média do vento na estação meteorológica registrada a 10 m (m/s);

z = altura determinada (m);

k, a = coeficientes segundo a rugosidade da superfície do terreno (tabela 3)

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

Tabela 3 – Coeficientes de acordo com as características do terreno

Fonte: BRE (1978)

Também utilizando a velocidade média estabelecida para a incidência leste, em Fortaleza, apresentam-se, na figura 22, os perfis transversais com base na equação de BRE (1978).

Figura 22 – Perfis transversais de velocidade do ar para diferentes classes de rugosidade

Fonte: BRE (1978)

As equações utilizadas para descrever a alteração no perfil transversal de velocidade do ar devem ser capazes de representar reduções significativas na intensidade do vento sob condições urbanas adensadas. Dado do atual estágio de desenvolvimento das metrópoles, mesmo os valores previstos nas classes de rugosidade mais elevadas em EUROCODE EC1-4 (2005), ASHRAE

(2003) e BRE (1978) devem ser reavaliados em sua aplicação às situações de maior adensamento urbano comum aos centros urbanos contemporâneos.

A preocupação em descrever adequadamente a significativa influência dos assentamentos urbanos sobre o perfil de vento é pertinente uma vez que as cidades apresentam os mais elevados valores de rugosidade (Z_0) e de elevação na camada limite (Z_g). As características morfológicas e físicas verificadas no ambiente urbano têm impactos no arrasto aerodinâmico, na condutância térmica, na escala e intensidade da turbulência, na velocidade do ar e no perfil transversal do vento. Por isso, o conhecimento preciso das características aerodinâmicas das cidades é fundamental para descrever, modelar e prever o comportamento do vento (GRIMMOND; OKE, 1999).

Como forma de avaliar a adequação das equações anteriores às situações abordadas nesta pesquisa, que retrata, em alguns casos, significativa verticalização e obstrução, comparou-se os perfis que caracterizam condições de área urbana e centro de cidade previstos pelo BRE (1978) e ASHRAE (2003) às classes de rugosidade mais elevadas apresentadas pelo EUROCODE EC1-4 (2005), reunindo-os na figura 23. O objetivo é verificar se tais coeficientes, que reconhecidamente possuem maior influência no comportamento do vento, descrevem perfis logarítmicos adequados.

Figura 23 – Comparação dos perfis de velocidade do ar descritos por BRE (1978) e EUROCODE EC1-4 (2005) para classes de rugosidade mais elevadas.

A partir da comparação é possível perceber a sobreposição dos perfis que descrevem centro de cidade (BRE, 1978) e cidade (ASHRAE, 2003), sendo os mais agressivos para descrever a perturbação dos fluxos pela condição urbana e, portanto, podendo ser considerados como condição superior ou limite para os perfis transversais.

Conclui-se, também, que a classe de rugosidade 1 apresentada em EUROCODE EC1-4 (2005), ainda que corresponda a mais elevada categoria presente nesta norma, tem comportamento muito próximo à condição de subúrbio descrita por ASHRAE (2003), porém ambas estão bastante afastadas do perfil descrito pelos coeficientes de área urbana indicados pelo BRE (1978), configurando uma condição diferenciada. Analisando as três equações e seus respectivos perfis, conclui-se que essa diferenciação parece mais adequada para descrever a perturbação dos fluxos em algumas situações urbanas abordadas nesta pesquisa, cuja alteração a barlavento é sempre significativa mesmo nos cenários de menor adensamento, que invariavelmente tratam do interior da malha da cidade. Adota-se, portanto, a equação apresentada por BRE (1978) para incorporar o perfil transversal de velocidade do ar às simulações realizadas no âmbito desta investigação.

A heterogeneidade da cobertura da superfície associada aos seus aspectos geomorfológicos tende a reduzir a velocidade do ar. Como resultado, a elevação do nível de rugosidade do meio provoca a redução do valor de C_p sobre as superfícies dos obstáculos. Em relação a este aspecto, diversas investigações reforçam a necessidade de incorporar o efeito da rugosidade como condição de contorno fundamental em simulações CFD ou ensaios em túnel de vento (MARUYAMA, 1999; CÓSTOLA, 2006; LEITE; FROTA, 2013).

2.2.3.3. Turbulência

Um fluido pode ter seu escoamento caracterizado como laminar ou turbulento. A definição mais geral para um fluxo turbulento é que este reúne vórtices de diversos tamanhos imbricados uns nos outros, sofrendo flutuações quase aleatórias em todas as variáveis que o compõem, seja a velocidade, pressão ou temperatura, entre outras ao longo do tempo e em seu percurso (STULL, 1988; ETHERIDGE; SANDBERG, 1996; MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 1997).

Os escoamentos de interesse prático, como o vento, apresentam comportamento turbulento. A turbulência é parte intrínseca da camada limite atmosférica. No entanto, a aleatoriedade da turbulência dificulta a sua determinação e quantificação, o que compromete a compreensão do fenômeno. Em virtude dessa dificuldade, recorre-se às análises estatísticas. Ao observar-se o espectro do vento é possível notar que, ao longo de um determinado período, a sua velocidade sofre oscilações sem um padrão definido, caracterizando a turbulência (STULL, 1988).

Allard & Ghiaus (2006) acrescentam que o fluxo turbulento é um dos problemas insolúveis da física clássica. Mesmo diante do desenvolvimento de pesquisas sobre a questão, inexistente um completo entendimento do seu comportamento. A turbulência deforma o fluxo, determinando-lhe grande complexidade. O campo de velocidade de um fluxo turbulento pode ser explicado como a superposição de uma grande quantidade de correntes de vários tamanhos, no qual o tamanho da maior é limitado pela dimensão transversal do fluxo.

A turbulência também varia de acordo com a escala, sendo mais perceptível no nível do solo, onde o aquecimento do meio, as diferentes alturas e formas do terreno levam à alteração das características do escoamento. Com o aumento da altitude, a tendência é a diminuição dessa

perturbação até que o vento atinja uma zona livre da influência do atrito com a superfície, chamada de altura do gradiente. Este nível é função da rugosidade do meio.

É justamente na complexidade do meio urbano que os efeitos da turbulência são mais sensíveis, produzindo situações imprevisíveis aos fluxos desviados em diferentes direções e que se somam às variações térmicas que ocorrem ao longo do dia. Por essa razão é necessário considerar a turbulência nas análises do seu comportamento e efeitos sobre o ambiente construído, constituindo parte importante dos problemas de ventilação natural.

A intensidade de turbulência (I_v) em uma determinada altura (z) é definida como o desvio padrão da turbulência dividido pela velocidade média do vento. A componente de velocidade do ar turbulenta tem um valor médio de zero e um desvio padrão (σ_v) que pode ser determinado usando a equação 7, retirada de EUROCODE EC1-4 (2005).

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_t \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

k_t : é o fator de turbulência, cujo valor recomendado de 1,0

Com o valor de σ_v , é possível determinar a intensidade de turbulência para situações comuns de ventilação urbana através da equação 8:

$$I_v = \frac{k_t}{c_0 \cdot \ln(z/z_0)} \quad (\text{Equação 8})$$

Como é possível perceber no gráfico (figura 24), a turbulência é maior nos níveis mais baixos, diminuindo à medida que se afasta da superfície, num comportamento oposto à relação entre rugosidade e velocidade do ar. No entanto, é também significativa a influência da rugosidade, aumentando a intensidade de turbulência em função do aumento do nível de rugosidade imposto ao fluxo.

Figura 24 – Intensidade de turbulência determinado por diferentes níveis de rugosidade
Fonte: EUROCODE EC1-4 (2005)

Os aspectos até aqui discutidos tem relação direta com a ventilação natural na escala urbana e, atuando em conjunto, influenciam o potencial de ventilação natural em edificações. Em síntese, a alteração no comportamento do vento provocada pelo meio urbano tem reflexos na qualidade do ar, na saúde e conforto dos ocupantes de edifícios, relacionando-se diretamente ao consumo de energia. A menor velocidade do ar, sobretudo dentro de certos limites de temperatura e umidade encontrados nas regiões de clima quente e úmido, reduz as possibilidades de resfriamento da envoltória, além de diminuir a quantidade de trocas de ar necessárias à manutenção de condições satisfatórias no interior de edifícios.

2.2.4. O papel da ventilação natural

A ventilação natural constitui o acesso intencional de fluxo de ar do exterior para o interior do edifício através das aberturas (ASHRAE, 2003). O fenômeno ocorre devido à ação do vento ou em função das pressões estáticas criadas pela diferença de temperatura entre o ambiente externo e interno ou ainda pela combinação dos dois (BS 5925, 1991).

A estratégia tem sido tradicionalmente utilizada para resfriar edifícios em diversas localidades. Ao retirar a carga térmica absorvida pela envoltória devido à radiação solar e o calor produzido internamente devido os ocupantes, equipamentos e iluminação, elevadas taxas de ventilação podem garantir temperaturas internas dentro de limites aceitáveis (GANDEMER; BARNAUD, 1989).

O movimento do ar através de uma edificação está relacionado a diversas variáveis e sujeito aos fenômenos descritos pelas leis da física. Para que haja movimento do ar em um ambiente deve haver diferença de pressão e um percurso. O percurso se faz no espaço entre as aberturas de entrada e saída do ar, e a diferença de pressão pode ocorrer por ação do vento ou através da diferença de densidade do ar que ocorre no efeito chaminé ou ainda pela ação combinada dos dois (ALLARD, 1998; ASHRAE, 2003).

A técnica, onde é possível a sua aplicação, proporciona a renovação do ar interior, contribuindo para a higiene dos espaços internos, com papel fundamental no suprimento de oxigênio e diluição do gás carbônico, e reforça a sensação de resfriamento através da aceleração das trocas térmicas entre o indivíduo e o ambiente, permitindo reduzir o consumo de energia para condicionamento térmico (TOLEDO, 1999; FROTA; SCHIFFER, 2003; YARKE, 2005; SANTAMOURIS, 2005; SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006). O resfriamento do corpo humano pela convecção ocorre quando o ar que o circunda encontra-se mais frio do que a pele e, então, retira calor do corpo. Givoni (1994; 1998) acrescenta que o aumento na transferência de calor por convecção ocorre em função da velocidade do ar, uma vez que o movimento aumenta as taxas de evaporação na superfície da pele, minimizando o efeito fisiológico causado pela alta umidade.

Quanto mais alta a velocidade do ar, maior é o efeito de resfriamento. Para situações onde a velocidade do ar é mais elevada, a percepção de conforto térmico é determinada principalmente pela temperatura do ar (CLARK, 1989¹⁹). Em situações de baixas velocidades do ar, ao contrário, o conforto térmico é influenciado tanto pela temperatura radiante, resultado das trocas térmicas por radiação entre o indivíduo e as superfícies que o cercam, como pela temperatura do ar. Assim, avaliações de conforto térmico

¹⁹ CLARK, G. **Passive cooling systems**. Chapter 6 of *Passive cooling*. Cook, J. (ed.). Cambridge: MIT Press, 1989 apud Bittencourt & Cândido (2005).

em edificações naturalmente ventiladas devem considerar a temperatura do ar como parâmetro para definição da condição de conforto térmico.

Sobretudo em regiões de clima quente e úmido, onde há pouca variação da temperatura do ar ao longo do dia e elevados níveis de umidade relativa, é fundamental o controle da radiação solar e o incremento da ventilação natural no espaço urbano e no interior das edificações. Nesses ambientes, os edifícios devem evitar ganhos de calor do meio externo, dissipando aqueles produzidos em seu interior (KOENIGSBERGER et al, 1974). Nessas localidades, a zona de conforto está diretamente relacionada à velocidade do ar (FANGER, 1987). Ao manter a temperatura interna dentro de limites aceitáveis, evita-se a utilização de sistemas mecânicos de resfriamento, o que, do ponto de vista do consumo de energia, torna a ventilação natural uma das mais eficientes estratégias de condicionamento passivo.

Szokolay (2004) afirma, contudo, que o clima quente e úmido é o mais difícil do ponto de vista do projeto de edificações, uma vez que as altas taxas de umidade do ar dificultam o efeito de resfriamento. Nessas regiões, a maioria das zonas de conforto térmico estabelecidas exclui situações nas quais a temperatura do ar ultrapassa 30°C associadas a taxas de umidade acima de 60%. Entretanto, tais condições ambientais são recorrentes durante a maior parte do ano. Comumente, as edificações apresentam baixa inércia térmica e alta permeabilidade ao vento, o que reduz a diferença entre a temperatura externa e interna, em torno de 2 graus, tornando o efeito chaminé insignificante. A alta umidade reduz o potencial de resfriamento evaporativo promovido pelo suor e a possibilidade de reestabelecer o conforto térmico no interior de edifícios recai sobre o movimento do ar. (AYNSLEY; MELBORNE; VICKERY, 1977; AYNSLEY, 1999a; 1999b; FROTA; SCHIFFER, 2003).

Santamouris & Wouters (2006) explicam que influência do movimento do ar no conforto térmico representa uma área ainda em aberto, sobretudo quando se trata de seu efeito na determinação dos limites de desconforto por calor. A dificuldade deve-se, em grande parte, à complexidade dos fenômenos envolvidos na ventilação natural, o que torna difícil a interpretação de seus impactos e a avaliação da sua eficiência para atingir os objetivos (ALLARD, 1998). Por essa razão, Awbi (1999) adverte que algumas simplificações são necessárias como forma de estabelecer algumas relações ou tornar possível prever de taxas de vazão de ar. Entre estas, assume-se que o escoamento do ar acontece de maneira constante ao longo do tempo e em condições isotérmicas, características comuns em ensaios em túnel de vento ou análises fluidodinâmicas estacionárias, porém bastante diferentes do que se verifica na realidade.

Uma das formas de avaliar o efeito da ventilação sobre o conforto térmico passa pela análise do comportamento dos fluxos no interior das edificações. O objetivo deve ser medir, o mais precisamente possível, o campo de velocidades do ar para determinar o potencial de resfriamento que pode ser proporcionado pela ventilação natural.

2.2.5. Índices de conforto térmico e ventilação natural

O corpo humano está constantemente produzindo calor através do metabolismo, que deve ser dissipado ao ambiente para manter em equilíbrio a temperatura interna. Paralelamente, o organismo pode ganhar ou perder

energia desse mesmo ambiente em que se encontra, alterando, em conjunto com a atividade desenvolvida e a resistência imposta pela vestimenta, a proporção em que este calor é dissipado. A manutenção da condição de conforto térmico, ou seja, quando o organismo exerce o mínimo de esforço para manter-se em equilíbrio, depende diretamente das variáveis ambientais e das trocas térmicas proporcionadas por este ambiente.

Índices de conforto térmico têm sido empregados para diversos propósitos, desde a determinação dos limites de exposição humana às condições impostas pelo meio, passando pela definição de conforto térmico em ambientes residenciais e comerciais até a indicação da melhor estratégia para reestabelecimento das condições aceitáveis (AULICIEMS; SZOKOLAY, 2007). Os modelos internacionais, tradicionalmente utilizados para descrever o conforto térmico de ambientes internos, baseiam-se na análise das trocas de calor dos ocupantes com o meio e utilizam resultados de experiências em ambientes termicamente controlados.

De Dear & Brager (1998) explicam que tais índices, que prescrevem condições ideais para o conforto térmico em ambientes internos, utilizam o modelo de balanço térmico. Em modelos desse tipo, o indivíduo é visto como um elemento passivo exposto a estímulos térmicos e assume-se que os efeitos das trocas de calor que resultam na sensação térmica são mediados unicamente pelas trocas físicas entre o corpo e o ambiente.

O mais conhecido dos modelos de balanço térmico é o PMV²⁰ (FANGER, 1970). O índice constitui uma detalhada análise da relação térmica do corpo humano com o ambiente próximo (AULICIEMS; SZOKOLAY, 2007). O PMV relaciona os quatro parâmetros ambientais (temperatura, umidade, velocidade do ar e temperatura radiante) e duas variáveis individuais (roupas e atividade) em um índice que pode ser aplicado para estimar a condição de conforto térmico e, conseqüentemente, o percentual de pessoas insatisfeitas pelo PPD²¹.

As qualidades do modelo de Fanger (1970) o tornaram referência para a Norma Internacional ISO 7730 (1994) e para a ASHRAE Standard 55 (1992). Ao quantificar o impacto absoluto e relativo dos seis fatores responsáveis pela condição de conforto térmico, o modelo pode ser utilizado em ambientes climatizados artificialmente, em quaisquer localidades, com seus respectivos climas, entrevistando pessoas realizando diferentes atividades e usando vestimentas diversas.

Entretanto, o modelo de balanço térmico tem sua aplicabilidade reduzida para situações reais vivenciadas em edificações naturalmente ventiladas. A metodologia, que toma como base investigações em câmaras climatizadas, permite avaliar a interação entre diversas variáveis ambientais de maneira independente, porém reduziu o conforto térmico a um sistema simplista de estímulo e resposta. Normalmente, o intervalo de condições nas quais os usuários se encontram em conforto é muito maior do que o previsto pelo índice (MCINTYRE, 1982; FANGER; TOFTUM, 2002; NICOL; HUMPHREYS, 2002; NICOL, 2004).

Ainda, a abrangência de uma norma internacional desconsidera a variabilidade cultural de cada localidade, seus hábitos alimentares e as vestimentas, que influenciam significativamente as condições de conforto térmico. Nicol (2004) resume que a norma ISO 7730 (1994) superestima a resposta de usuários com base na escala da ASHRAE para altas temperaturas e subestima quanto a baixas temperaturas. É, sobretudo, em edificações

²⁰ Predicted Mean Vote ou Voto Médio Predito.

²¹ *Predicted Percentage of Dissatisfied* ou Percentual previsto de insatisfeitos.

²² HUMPHREYS, M. A. **Building Res.** Practice 6 (2), 1978 apud De Dear & Brager (1998).

naturalmente ventiladas situadas na região tropical quente e úmida, onde as temperaturas comumente situam-se acima dos 30°C e a velocidade do ar é superior a 1 m/s, que os limites do modelo são extrapolados, comprometendo sua abrangência.

Diante de tais restrições tornou-se fundamental revisar os parâmetros envolvidos nos índices até então utilizados, reforçando a necessidade de uma abordagem alternativa para definir as condições ambientais consideradas confortáveis. A mudança na abordagem tradicional do conforto térmico e a inserção de outras variáveis resultaram nos modelos adaptativos.

No cerne da abordagem adaptativa está a tendência natural das pessoas a adaptar-se às mudanças que possivelmente ocorrem no ambiente térmico, sendo menos provável a sensação de desconforto quanto maiores forem as possibilidades de adaptação (DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997; DE DEAR; BRAGER, 1998; 2002 NICOL; HUMPHREYS 2002). Estes modelos são baseados em experiências de campo tomando edifícios reais e analisando a preferência de seus ocupantes. De maneira geral, os modelos relacionam a temperatura de conforto às temperaturas externas médias mensais, considerando a maior possibilidade de adaptação e aclimação dos usuários ao clima local. Para De Dear (2011), a aceitação da abordagem adaptativa, não necessariamente nova, porém fundamentalmente diferente dos modelos utilizados até então, corresponde a mais importante mudança no campo do conforto térmico nos últimos vinte anos.

Os primeiros trabalhos sobre modelos adaptativos foram desenvolvidos pelos pesquisadores Michael Humphreys e Fergus Nicol ainda na década de 1970 no *Building Research Establishment* (BRE). Humphreys (1978)²² observou que o centro da zona de conforto poderia ser determinado a partir da temperatura ambiente mais frequentemente apontada como confortável, determinando, assim, uma temperatura neutra (T_n). Originalmente, o autor parametrizou o clima externo em função da temperatura média mensal (T_m) e analisou os dados separadamente para edifícios condicionados artificialmente e edifícios naturalmente ventilados. O resultado da investigação foi, então, expresso em duas equações distintas. A primeira (Equação 9) é aplicada para edificações sem meios mecânicos para condicionamento.

$$T_n = 0,534 \times T_m + 11,9 \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

T_n é a temperatura de neutralidade

T_m é a temperatura média mensal

Uma segunda (Equação 10) é aplicada para edifícios dotados de sistemas de condicionamento do ar.

$$T_n = 23.9 + 0.295 (T_m - 22) \exp(-((T_m - 22)/(24\sqrt{2}))^2) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

T_n é a temperatura de neutralidade

T_m é a temperatura média mensal

A figura 25 resume o comportamento destas ao longo do ano.

Figura 25 – Variação da temperatura operativa determinada através do modelo de Humphreys (1978) para edificações condicionadas e naturalmente ventiladas considerando o arquivo climático TMY para Fortaleza.

Analisando o comportamento das duas equações para determinar a condição de neutralidade em edifícios, evidenciam-se os limites mais estreitos na aceitação de variações na temperatura interna em edifícios condicionados artificialmente. Mesmo diante das oscilações climáticas, a diferença das temperaturas determinadas pela equação 10 para a temperatura externa situa-se em torno de 1,8 graus, em média. Em contrapartida, a variação das condições do clima ao longo do ano é acompanhada pela temperatura neutra expressa pelos ocupantes de edificações naturalmente ventiladas, em média 0,7 grau mais baixa do que a temperatura externa.

Posteriormente surgiram outros modelos adaptativos (AULICIEMS, 1982²³; DE DEAR; BRAGER, 1998; NICOL; HUMPHREYS, 2002). Em todos estes, no entanto, a temperatura externa do mês é a única variável para determinar a temperatura neutra. Tal parâmetro enfatiza a experiência e aclimação dos ocupantes com o clima típico do lugar, aspectos determinantes para o conforto térmico.

Através dos estudos de campo realizados por De Dear & Brager (1998) também foram apontadas diferenças entre as respostas de ocupantes de edifícios naturalmente ventilados e artificialmente condicionados. O resultado demonstrou a maior tolerância dos usuários de edificações sem condicionamento do ar em relação à variabilidade das condições ambientais. Givoni (1992) explica que o interior de edifícios naturalmente ventilados acompanha as variações do clima devido a uma maior integração com este, o que faz com que a maioria dos usuários aceite oscilações e intervalos maiores de temperatura e velocidade do ar do que tolerariam em edificações condicionadas artificialmente. Ocupantes de edifícios que utilizam condicionamento artificial estão esperando um ambiente térmico mais frio e sentem desconforto mesmo quando a temperatura sofre pequenas alterações. Tais expectativas diferenciadas levam a adaptações prévias no comportamento individual (FANGER; TOFTUM, 2002; YARKE, 2005).

Entretanto, Aynsley (1999a) pondera sobre a limitação de muitos dos índices de conforto térmico desenvolvidos para edifícios naturalmente

²³ AULICIEMS, A. **Psychophysiological criteria for global thermal zones of building design.** In: Proceedings of International Biometeorology Congress in Journal of Biometeorology, supplement to vol. 26, 1982 apud Bittencourt & Cândido (2006).

ventilados, que definem a zona de conforto térmico somente tomando como base a temperatura de bulbo seco, sem considerar a influência do movimento do ar ou umidade.

As normas ASHRAE 55 (1992) e ISO (1994) adotavam limites estreitos para as condições térmicas no interior de edifícios em que eram utilizados meios mecânicos para condicionamento ambiental. Nessas condições, os códigos recomendavam que a velocidade do ar não deveria exceder 0,2 m/s sob o risco de comprometer as condições de conforto térmico. Entretanto, pesquisas posteriores contestaram tais limites e apontaram que, no caso de edificações naturalmente ventiladas, os ocupantes preferem velocidades do ar mais elevadas em virtude da maior tolerância às temperaturas mais altas ali verificadas (NICOL, 2003; 2004).

Considerando tais deficiências, a norma ASHRAE 55 (2004) adotou um método específico para tratamento de edifícios naturalmente ventilados baseado no índice adaptativo de De Dear & Brager (1998). O modelo foi desenvolvido a partir de um banco de dados internacional contendo cerca de 21.000 questionários aplicados simultaneamente à medição dos seis parâmetros de conforto definidos por Fanger (temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa, movimento do ar, tipo de vestimenta e atividade desenvolvida). Do universo total da pesquisa, reunido no relatório ASHRAE RP-884, mais especificamente 9.000 questionários foram aplicados em edifícios naturalmente ventilados (DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997).

A publicação da primeira norma de conforto adaptativo tinha como objetivo incorporar a ventilação natural como forma de projetar edifícios mais sustentáveis, energeticamente eficientes e confortáveis aos ocupantes (DE DEAR, 2011). A equação resultante é aplicável a edifícios naturalmente ventilados em regiões com temperaturas entre 10 °C e 33,5 °C, nos quais os usuários desenvolvem atividades sedentárias (<1,3 met) e podem operar diretamente as aberturas, aumentando ou diminuindo o movimento do ar e dispensando a necessidade de especificar o tipo de vestimenta (clo).

Figura 26 – Limites de temperatura operativa para edificações naturalmente ventiladas a partir da temperatura média mensal e o percentual de aceitação pelos ocupantes
Fonte: ASHRAE (2004)

A norma ASHRAE 55 (2004) também considera a possibilidade de expandir os limites da zona de conforto através do aumento na velocidade do

ar. A equação 11 é utilizada para calcular o efeito psicológico de resfriamento através da ventilação natural, compensando um aumento na temperatura do ar.

$$dT = a + b * x_1 + c * x_2 + d * x_1^2 + e * x_2^2 + f * x_1 * x_2 + g * x_1^3 + h * x_2^3 + i * x_1 * x_2^2 + j * x_1^2 * x_2 \text{ (Equação 11)}$$

Onde:

a = 8,95 E-03	f = 0,14
b = 9,03 E-03	g = 1,33 E-04
c = 1,67	h = 3,58
d = 2,18 E-04	i = -1,61 E-02
e = 4,86	j = 2,48 E-03

x_1 é a diferença entre temperatura radiante e temperatura do ar (°C)

x_2 é a velocidade do ar (m/s)

Seja através da ventilação natural, acionamento de ventiladores ou quaisquer outros sistemas mecânicos, a expansão dos limites de conforto a partir do movimento do ar constitui uma das principais estratégias utilizadas para evitar condições desfavoráveis no interior de edifícios. Em virtude desse efeito, Aynsley (1999a) assegura que pessoas que vivem em edificações naturalmente ventiladas tendem a se sentir confortáveis em temperaturas até 3°C acima do limite da zona de conforto, mesmo valor apontado por Nicol (2004).

Em determinados tipos de clima, é evidente o efeito de resfriamento provocado pelo maior fluxo de ar junto ao corpo. Esse efeito depende da velocidade do ar, sendo imperceptível abaixo de 0,25 m/s, considerado agradável até 0,5 m/s e, entre 1,0 m/s a 1,5 m/s, pode resultar desconfortável, sendo indesejável quando excede 1,5 m/s. No entanto, tais reações dependem da temperatura do ar. Em climas quentes, velocidades acima de 1,0 m/s são consideradas agradáveis, ao passo que em condições frias, a intensidade não deve superar 0,25 m/s. O coeficiente de perda de calor do corpo por convecção (h_c) é função da velocidade do ar, como também o coeficiente de perda de calor por evaporação (h_e) é alterado pelos fluxos próximos à pele (AULICIEMS; SZOKOLAY, 2007).

Auliciems & Szokolay (2007) advertem, entretanto, que a dissipação do calor da superfície do corpo é um fenômeno complexo. Além da velocidade do ar e da evaporação, o efeito depende da vestimenta (clo) e atividade desenvolvida (met), assim como da diferença entre a temperatura da pele e do ar, a quantidade de suor e a pressão de vapor. Considere-se, ainda, que nas condições em que não há movimento do ar, uma camada de ar saturado forma-se sobre a superfície da pele, reduzindo a possibilidade de evaporação.

Uma série de modelos permite estimar o efeito de resfriamento promovido pelo fluxo de ar próximo ao corpo, tornando possível a expansão da temperatura considerada como limite para o conforto térmico. De maneira simplificada, Aynsley (1999b) explica que é possível atingir um efeito de resfriamento 3,7 K para cada metro por segundo de elevação na velocidade do ar. A ASHRAE (1985) já admitia uma extensão nos limites de conforto de 1

²⁴ O adendo à norma ASHRAE 55 (2010) não apresenta uma equação para estimar os valores aceitáveis de temperatura operativa em função do movimento do ar. Tomando como base o intervalo de valores expressos pelo documento, estimou-se a equação para o efeito de resfriamento provocado pela velocidade do ar.

K a cada elevação em 0,275 m/s na velocidade do ar, considerando o intervalo entre 0,2 m/s até 0,8 m/s, o que resulta num máximo de 2 K.

Mais recentemente, no entanto, a ASHRAE publicou uma atualização em relação aos limites aceitáveis de Temperatura Operativa em função do movimento do ar. Tomando como base pesquisas desenvolvidas sobre o tema nos últimos anos, a publicação reconhece o potencial de velocidades mais elevadas. Um adendo à norma ASHRAE 55 (2010) atesta que quando o movimento do ar situa-se em torno de 1,2 m/s o efeito de resfriamento é de até 2,8 K, o que pode proporcionar uma extensão de até 2,2 °C na zona de conforto (ASHRAE, 2012). O gráfico²⁴ a seguir prevê a ampliação na temperatura operativa aceitável a partir da velocidade do ar (figura 27).

Figura 27 – Elevação nos limites de temperatura operativa com base na velocidade do ar
Fonte: Elaborado a partir de ASHRAE (2012).

Para o caso de climas quentes, Givoni (1994) indica valores além do intervalo previsto pelas publicações da ASHRAE (1985; 2012). Em suas pesquisas, o autor acrescenta que o valor de 2,0 m/s na velocidade do ar torna possível reduzir a sensação térmica em até 6 K.

Como explica Szokolay (1999), para velocidades do ar acima de 0,2 m/s, o fluxo de ar em contato com a pele transfere o calor do corpo para o ar quando este apresenta menor temperatura. A equação 12 sugere o efeito psicológico do resfriamento através do movimento do ar, promovendo a extensão na temperatura de conforto (dT).

$$dT = 5,2 \times (v - 0,2) - (v - 0,2)^2 \quad (\text{Equação 12})$$

Onde v é a velocidade do ar sobre a superfície do corpo.

Figura 28 - Efeito psicológico do resfriamento com o aumento da velocidade do ar
Fonte: Adaptado de Szokolay (1999)

Szokolay (1999) adverte que a equação é válida para valores de velocidade do ar até 3 m/s. Contudo, ressalta que o limite aceitável é de 1,5 m/s, valor que permite diminuir a sensação térmica em até 5 K.

Analogamente ao efeito apontado por Szokolay (1999), Nicol (2004) definiu uma equação que permite a elevação da temperatura de conforto devido ao incremento no movimento do ar, como descrito pela equação 13.

$$dT = 7 - \left(\frac{50}{4 + 10 \sqrt{v}} \right) \quad (\text{Equação 13})$$

Figura 29 – Incremento da temperatura de conforto com a ventilação
Fonte: Nicol (2004)

Auliciems & Szokolay (2007) apresentam três diferentes expressões para estimar o efeito de resfriamento. O princípio, contudo, é o mesmo, existindo pouca variação entre as expressões, que são válidas para o intervalo de velocidades do ar entre 0,2 m/s e 1,5 m/s.

$$dT = -1,2844 v^2 + 5,9331 v - 1,0136 \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

v é a velocidade do ar próxima ao corpo

A equação 15 apresenta comportamento semelhante à equação 14, sobretudo em relação às velocidades mais baixas, e vai aumentando a diferença quando o movimento do ar é mais elevado. A velocidade efetiva (v_e) é calculada como sendo a velocidade do ar (v) medida no ambiente diminuída de 0,2 m/s.

$$dT = 6 v_e - 1,6 v_e^2 \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

v_e é a velocidade do ar próxima ao corpo

Ressalta-se a linearidade da equação 16, que resulta da adoção de um valor fixo para multiplicar a velocidade do ar na região próxima ao corpo. A limitação desta equação está justamente em prever que o efeito do movimento do ar será sempre positivo, o que não corresponde à realidade. A partir de um determinado nível de intensidade, o fluxo de ar junto ao corpo pode causar desconforto por frio.

$$dT = 3,2 v \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

v é a velocidade do ar próxima ao corpo

A seguir, o comportamento gráfico do conjunto de equações presentes em Auliciems & Szokolay (2007) reforça a relação do potencial de resfriamento devido ao movimento de ar.

Figura 30 – Comparação de diferentes equações para determinar a influência do movimento do ar na expansão da temperatura de conforto térmico
Fonte: Adaptado de Auliciems & Szokolay (2007).

Reconhecendo a possibilidade de aceitação de temperaturas mais elevadas em ambientes internos quando são verificadas maiores taxas de ventilação natural, HKPD (2005) apresenta um conjunto de recomendações sobre o movimento do ar. O documento reforça aspectos simples, como a necessidade dos fluxos cruzarem os ambientes através de janelas em posição que permita a passagem do ar próximo aos ocupantes, e chega a determinar valores para a velocidade interna, preferencialmente acima de 1,0 m/s. Para atingir tais níveis, descreve que o ar externo deve apresentar condições adequadas, livre de poluentes ou contaminantes, e velocidade entre 3 e 5 m/s, intensidade possível com a adoção de medidas de planejamento urbano que potencializem os fluxos.

O que se destaca é a recomendação de velocidades até 3,0 m/s para os meses quentes e úmidos de Hong Kong, consideradas adequadas para expandir os limites de aceitação dos ocupantes de edificações naturalmente ventiladas, como demonstra a figura 31 (HKPD, 2005).

Figura 31 – Temperatura de conforto para edifícios naturalmente ventilados em Hong Kong e a possibilidade de expansão dos limites da zona de conforto térmico com o movimento do ar.

Fonte: HKPD, 2005.

Apesar de reconhecer a possibilidade de expansão dos limites da zona de conforto através do maior movimento do ar, a maioria dos índices impõe restrições à sua velocidade junto ao corpo. Por um lado, tal limitação tem como objetivo evitar o efeito indesejável causado pelas correntes de ar a determinadas temperaturas e em função da área do corpo exposta aos fluxos (MCINTYRE, 1978)²⁵. Tal aspecto foi aprofundado por Fanger et al (1988) em experimentos realizados em câmaras climatizadas, quantificando o percentual de insatisfeitos.

Ressalta-se, entretanto, que tal limitação é cabível apenas em condições climáticas temperadas ou frias e pode não encontrar aplicação em localidades de clima quente e úmido, onde é comum a preferência dos ocupantes de edificações por valores maiores do que os propostos pelos índices e possivelmente acima de 2 m/s, como afirma Aynsley (1999b). As conclusões das diversas pesquisas apresentadas anteriormente (SZOKOLAY, 1999; AYNsLEY, 1999a; 1999b; NICOL; 2004) encontram respaldo nos resultados evidenciados por Araújo (1996). Analisando as respostas de estudantes em atividade sedentária quanto às variáveis de conforto térmico medidas, a autora observou uma grande incidência de desconforto por calor, o que divergia significativamente da curva apresentada por Fanger, inviabilizando a utilização dos parâmetros para a região de estudo. No âmbito do nordeste brasileiro, em grande parte contido na faixa tropical úmida, a investigação demonstrou que mesmo com temperatura radiante elevada, aspecto comum em edificações naturalmente ventiladas, o aumento na velocidade do ar tende a expandir os limites da zona de conforto térmico dos usuários.

Questionando o efeito negativo (*draft risk* – DR) que as correntes de ar poderiam provocar nos ocupantes de edificações situadas em clima quente e úmido, Cândido (2010) investigou a aceitabilidade de valores mais elevados na velocidade do ar. Através de medições de campo, a autora alerta quanto aos efeitos da limitação deste parâmetro. Durante as entrevistas, os usuários reportaram aceitabilidade ao ambiente térmico, com votos dentro dos limites

²⁵ MCINTYRE, D.A. **Preferred air speed for comfort in warm conditions.** ASHRAE Trans 84 (2): 263 – 277. 1978 apud Cândido (2010).

de conforto determinados pela ASHRAE 55 (2004). Contudo, havia preferência por níveis mais altos de velocidade do ar. Foi demonstrado que a menor velocidade do ar para estabelecer a condição de conforto era de 0,4 m/s quando a temperatura era de 26 °C, passando a 0,9 m/s ou mesmo valores acima deste quando as temperaturas operativas eram superiores a 30 °C.

Mais tarde, tomando como base nos resultados obtidos no desenvolvimento da pesquisa de Cândido (2010), Cândido; De Dear; Lamberts (2011) propuseram níveis mínimos de velocidade do ar para três intervalos de temperatura operativa. Entre 24 °C e 27 °C o movimento do ar deve situar-se em torno de 0,4 m/s. Para temperaturas entre 27 °C e 29 °C, a velocidade do ar deve estar entre 0,41 m/s a 0,8 m/s como forma de reestabelecer a condição de conforto. Valores de velocidade do ar acima de 0,8m/s são necessários para o intervalo entre 29 °C e 31 °C. Paralelamente, os autores concluíram que, no nordeste brasileiro, a temperatura de neutralidade é muito próxima da temperatura média do dia. Tal relação possui gradiente mais elevado do que o especificado até mesmo na revisão da norma publicada em ASHRAE (2010).

É possível concluir, portanto, que um índice de conforto aplicável a edifícios naturalmente ventilados deve considerar a adaptação dos ocupantes em relação a diferentes velocidades do ar. Ademais, reforça-se que, para a condição quente e úmida, o intervalo em que as correntes de ar configuram sensação de desconforto por frio (DR) está bem acima dos valores previstos em literatura, o que garante maiores possibilidades de atingir o conforto térmico com a adoção desta estratégia.

2.2.6. Calculando a ventilação natural

O conhecimento das características específicas do escoamento de ar num determinado espaço, assim como prever as taxas de vazão de ar em edifícios, torna-se necessário por razões de conforto térmico e economia de energia (ALLARD, 1998).

Existem diversas formas de analisar a ventilação natural e prever as taxas de renovação do ar em ambientes internos. Os métodos variam desde algoritmos simplificados até ensaios com modelos físicos, passando pelos modelos zonais embutidos em programas de desempenho térmico, até a complexidade dos códigos CFD, que reúnem as equações de conservação de massa, momento e energia baseadas na solução da equação de transporte, permitindo descrever o comportamento dos fluxos de ar em diferentes escalas.

No entanto, a despeito da maior complexidade de um método em relação a outro, invariavelmente são necessários dados de entrada para os cálculos envolvendo a ventilação natural. A área de abertura e o coeficiente de descarga, o nível de obstrução do entorno e a rugosidade do meio, a velocidade do ar e a pressão sobre as aberturas são algumas das informações comumente solicitadas. Considerando que a área de abertura e o coeficiente de descarga são definidos por meio de decisões arquitetônicas baseadas em fatores como custos, tecnologias construtivas, plástica do edifício, e que o entorno tem pouca ou nenhuma interferência do projetista de edificações, conclui-se que a maior dificuldade consiste em definir o campo de pressões devido ao vento incidente sobre as fachadas da edificação e a velocidade dos fluxos, uma vez que estas sofrem alterações mais significativas em função da forma urbana.

2.2.6.1. A pressão devido ao vento

O vento, ao passar por uma edificação, gera uma distribuição de pressão ao seu redor. A força com que o ar incide sobre as superfícies do edifício constitui um dos parâmetros de maior importância para o processo de ventilação natural.

A relação, para o fluxo livre, entre velocidade e a pressão relativa em diferentes pontos do escoamento pode ser obtida pela equação de Bernoulli²⁶, que descreve que a pressão média do vento que incide sobre uma superfície é proporcional à pressão de velocidade de vento $P_{din(z)}$, e pode ser calculada através da expressão simplificada a seguir (equação 17):

$$P_{din(z)} = \frac{1}{2} \rho v_z^2 \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

ρ é a massa específica do ar em função da pressão atmosférica, temperatura e umidade (kg/m^3);

v_z é a velocidade do vento na altura do obstáculo (m/s);

Assim, a pressão devido ao vento que incide sobre uma superfície da edificação pode ser calculada como o produto do coeficiente de pressão pela pressão dinâmica na altura da superfície, como descrito na equação 18.

$$P_v = C_p \times P_{din(z)} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

P_v é a pressão devido ao vento (Pa)

C_p é o coeficiente de pressão

$P_{din(z)}$ Pressão dinâmica do vento na altura da superfície (Pa).

Comumente a pressão é positiva a barlavento e negativa a sotavento. Ao criar zonas de alta e baixa pressão nas diferentes faces do edifício, o vento induz o movimento do ar em seu interior e esses fluxos dependem essencialmente dos coeficientes de pressão nas fachadas. A presença de aberturas nas fachadas pode alterar estruturalmente esse comportamento.

O coeficiente de pressão (C_p) é um parâmetro empírico e adimensional que caracteriza o comportamento desse fluxo de ar. Este representa as alterações na pressão induzidas pelo movimento do ar e que são causadas por influência das características do entorno sobre o vento local (LIDDAMENT, 1986; ALLARD, 1998). Os valores de C_p modificam-se de acordo com a direção e intensidade do vento, a forma, as dimensões e a orientação da superfície, os obstáculos do entorno, a topografia e a rugosidade do meio. Assim, cada ponto da fachada que sofre pressão do vento apresenta valores específicos de C_p de acordo para cada direção de vento (TOLEDO, 1999).

Walker (1992) define o coeficiente de pressão sobre as superfícies externas como a diferença entre a pressão medida sobre a superfície (P_{sup}) e a pressão atmosférica (P_{ref}), utilizada como referência, dividida pela pressão exercida pela velocidade do vento adotado na simulação (P_{vent}), como descrito através da equação 19.

²⁶ A equação atribuída a Daniel Bernoulli (1700-1782) é a formulação matemática que descreve o comportamento de um fluido que se move ao longo da linha corrente. Foi obtida a partir da integração da equação do movimento ao longo da linha corrente (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 1997).

²⁷ COOK, N. J. **The Designer's guide to wind loading of building structures**. Building Research Establishment, 1985 apud SAWACHI et al (2006).

²⁸ IRMINGER, J. O. V.; NØKKENTVED, C. **Wind pressure on buildings: experimental researches**. (Second series) – københavn, Ingeniørvidenskabelige Skrifter, 1936 apud Toledo (1999).

²⁹ <http://cpgen.bouw.tno.nl/cp/>

³⁰ <http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>

$$C_p = \frac{P_{sup} - P_{ref}}{P_{vent}} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho U^2 \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:

ρ é a massa específica do ar em função da pressão atmosférica, temperatura e umidade (kg/m^3);

U é a velocidade do vento na altura do obstáculo (m/s);

O coeficiente de pressão também pode ser determinado como o quociente adimensional entre a pressão medida em um determinado ponto na fachada (P_x) e a pressão dinâmica (P_d) do vento não alterado antes de encontrar o obstáculo, como descrito pela equação 21 (SWAMI; CHANDRA, 1987; CÓSTOLA, 2006; AWBI, 1991).

$$C_p = \frac{P_x}{P_d} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

$$P_d = \frac{\rho V_{ref}^2}{2} \quad (\text{Equação 22})$$

Como descrevem Sawachi et al (2006), coeficientes de pressão constituem parâmetros essenciais na análise da engenharia estrutural de edifícios. Cook (1985)²⁷ explica que dados de C_p e as características dinâmicas do vento têm sido extensivamente medidos através de experimentos em túneis de vento, cujas técnicas tem se desenvolvido desde os anos 1950.

Atualmente, valores de C_p podem ser obtidos através de diferentes métodos. Em literatura, diversos bancos de dados de C_p estão disponíveis (AIVC, 1984; LIDDAMENT, 1986; SWAMI; CHANDRA, 1988), alguns deles com representação através de isóbaras (IRMINGER E NØKKENTVED²⁸; ASHRAE, 2003), além de modelos paramétricos (GROSSO, 1992; SHARAG-ELDIN, 2007) ou programas simplificados para o cálculo dos valores médios de C_p sobre as faces de edifícios submetidos à ação do vento, como em Knoll; Phaff; Gids (1995), TNO²⁹ e TOKYO POLYTECHNIC UNIVERSITY³⁰.

Dada a importância do C_p para a ventilação natural, diversos programas de cálculo do desempenho termoenergético de edifícios solicitam o seu valor como dado de entrada das simulações (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Alguns dos programas possuem bibliotecas contendo dados de C_p . É permitido ao usuário alterar ou determinar esses valores a partir de arquivo de texto ou inseri-los numericamente. O programa TAS (EDSL, 2008), por exemplo, dispõe de algoritmo embutido para determinar o valor de C_p sobre as fachadas. O *DesignBuilder* possui bibliotecas para diferentes níveis de exposição da edificação, que podem ser combinados aos ângulos de incidência do vento. A inserção de dados de C_p ou a adoção de valores predeterminados deve ser realizada de forma crítica, uma vez que a utilização

de valores inadequados pode levar a erros significativos nas taxas de ventilação e, conseqüentemente, nos resultados de simulações térmicas.

Akins; Peterka; Cermak (1979)³¹ formularam uma equação com o objetivo de determinar valores médios de C_p para edificações altas. A equação é utilizada até hoje por estar embutida num dos mais conhecidos programas de cálculo de desempenho térmico, o *EnergyPlus*. Para o caso de edifícios baixos, a equação de Swami & Chandra (1988) é utilizada, e, quando são inseridos edifícios altos, nos quais a altura é maior que três vezes o menor lado de sua base, a equação desenvolvida por Akins; Peterka; Cermak (1979) é aplicada aos cálculos de infiltração de ar e ventilação natural.

AIVC (1984) consiste numa base de dados de C_p utilizada como referência nos estudos de ventilação natural. A publicação reúne uma série de tabelas de coeficientes de pressão para edifícios baixos (até três pavimentos) e perfis verticais de C_p para edifícios altos. A influência da obstrução para o caso de edifícios baixos foi considerada em três níveis: condição exposta, semi-obstruída e obstruída, sendo que, nessa última, os obstáculos possuem, no máximo, a mesma altura do edifício.

Para o caso de edifícios altos, AIVC (1984) apresenta somente perfis verticais de C_p em quatro níveis de obstrução. A adoção de um perfil vertical pode levar a interpretações equivocadas da distribuição dos coeficientes de pressão sobre uma superfície, pois pode omitir variações muitas vezes significativas (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009).

Liddament (1986) também apresenta tabelas de dados de C_p para edificações baixas (até três pavimentos) e mais relações de comprimento e largura do que em AIVC (1984). No estudo, também são apresentados dados para o telhado, com variações na inclinação previstas e entorno variável.

Swami & Chandra (1988) investigaram as alterações nos coeficientes de pressão de superfícies de acordo com a mudança na direção do vento. As investigações foram realizadas utilizando oito prédios baixos e um prédio alto. Assim, foi desenvolvida uma relação entre o ângulo do vento incidente, as proporções geométricas dos modelos utilizados e o valor médio do coeficiente de pressão sobre as superfícies, fornecendo uma equação simples para edifícios baixos e outra para edifícios altos.

A equação 23 é aplicada para edifícios baixos e fornece um valor médio para a fachada.

$$C_{p,n} = \ln \left[\begin{array}{l} 1,248 - 0,703 \sin \left(\frac{a}{2} \right) - 1,175 \sin^2(a) \\ + 0,131 \sin^3(2aG) + 0,769 \cos \left(\frac{a}{2} \right) \\ + 0,07 G^2 \sin^2 \left(\frac{a}{2} \right) + 0,717 \cos^2 \left(\frac{a}{2} \right) \end{array} \right] \quad (\text{Equação 23})$$

Onde:

$C_{p,n}$ é o C_p normalizado;

a é o ângulo entre a direção do vento e a normal da parede analisada, em graus;

G é o logaritmo natural da razão entre a largura da parede considerada e a largura da parede adjacente.

³¹ AKINS, R.E; PETERKA, J.A; CERMAK, J.E. **Averaged pressure coefficients for rectangular buildings**. In: Fifth International Conference of Wind Engineering. Fort Collins, CO. Proceedings... Pergamon Press, NY. 1979 apud ASHRAE (2003).

Vale ressaltar que a equação de Swami e Chandra (1988) considera o efeito da direção do vento sobre o coeficiente de pressão das superfícies utilizando ensaios com modelos fechados e em ambientes desobstruídos. Sawachi et al (2006) acrescentam que o efeito da rugosidade pode ser considerado quando é calculada a velocidade do ar de referência a partir dos dados meteorológicos da localidade. Ainda, o efeito da presença de obstáculos pode ser incluído sob a forma de um fator de correção.

Bauman; Ernest; Ahrens (1992) realizaram mais de 200 testes em túnel de vento de camada limite para avaliar como os dados de pressão sobre as superfícies externas de modelos selados podem ser utilizados para calcular a velocidade do ar no interior de edifícios dotados de aberturas.

Para o estudo foram desenvolvidos dois grupos de ensaios com modelos em escala e foi aplicada uma rugosidade baixa ($Z_0 = 0,077$). O modelo 1 continha dois compartimentos com a possibilidade de abertura através de janelas de 50 mm de altura e 83.3 mm de largura, correspondendo a uma porosidade de 16,7%, enquanto que o modelo 2 era completamente selado. No primeiro conjunto de testes a velocidade no interior dos modelos e a intensidade de turbulência adotada foi medida nos modelos com aberturas e segundo diversas direções do vento. No segundo grupo de ensaios a pressão externa foi medida em modelos fechados para as mesmas configurações de edifícios. Como resultado, foi desenvolvida uma correlação empírica entre o movimento do ar no interior dos modelos e a distribuição de pressões nas fachadas, permitindo a previsão da velocidade do ar no interior em função da direção do vento e da distribuição da pressão externa medida nos modelos selados (BAUMAN, ERNEST, AHRENS, 1992).

A equação 24 apresenta um R^2 de 0,947 e pode prever com certa precisão a velocidade do ar no interior de modelos porosos em função da direção do vento e a distribuição das pressões externas em modelos selados.

$$C_v^2(\theta, C_{p,i}, C_{p,o}) = 0,0203 \Delta C_p + 0,0296 C_{p,i} \cos \theta + (-0,0651 C_{p,o} \cos \theta) + (-0,0178 \cos \theta) + 0,0054$$

(Equação 24)

Onde:

C_v é coeficiente de velocidade média

θ é o ângulo de direção do vento entre 0° e 90°

$C_{p,i}$ coeficiente de pressão médio para a área de abertura a barlavento

$C_{p,o}$ coeficiente de pressão médio para a área de abertura a sotavento

ΔC_p é o módulo da diferença entre $C_{p,i}$ e $C_{p,o}$

O efeito de obstáculos próximos, tais como edifícios adjacentes, constitui um dos principais desafios para a estimativa dos coeficientes de pressão. Alguns trabalhos consideram tal efeito sob a forma de correções nos coeficientes de pressão calculados tomando como base um edifício isolado (SAWACHI et al, 2006). Considerando a condição adensada dos atuais centros urbanos, a incorporação da influência dos obstáculos nos valores de C_p sobre as superfícies de edificações torna-se necessária para avaliar, mais precisamente, o seu efeito no desempenho da ventilação natural.

Sawachi et al (2006) acrescentam que a estimativa de C_p para um elemento isolado é mais simples quando comparada às simulações ou ensaios de um edifício acompanhado por um ou mais obstáculos adjacentes.

O efeito de múltiplos obstáculos deve ser avaliado após a compreensão da influência de um único edifício adjacente.

Knoll; Phaff; Gids (1995) desenvolveram um programa computacional baseado em ensaios em túnel de vento. O aplicativo permite calcular valores de C_p para edifícios de formato simples e expostos a diferentes níveis de rugosidade, com ou sem a influência de obstáculos. O valor de C_p para um edifício em meio obstruído é corrigido de acordo com a distância e o ângulo de obstrução gerado pelos obstáculos.

Buscando evidenciar a alteração do campo de pressões sobre as fachadas devido à existência de entornos obstruídos, Sharag-Eldin (2007) desenvolveu um estudo paramétrico que resultou em um modelo para calcular o valor do C_p médio sobre as fachadas de um edifício de planta retangular com entorno obstruído. Para Cóstola (2006), a principal vantagem do modelo de Sharag-Eldin está na flexibilidade do tratamento do entorno, uma vez que a influência de cada obstáculo que circunda o modelo de interesse pode ser analisado individualmente.

No entanto, quando se trata da geometria complexa verificada nas cidades brasileiras ou mesmo quando edifícios de formato mais variado são estudados, a aplicabilidade dos dados de C_p disponíveis é limitada (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009). Nesse sentido, a utilização de dados de coeficientes de pressão para outras geometrias de edifícios, outros pontos de interesse na fachada ou condições de exposição diferentes (ângulo de incidência, nível de obstrução e obstáculos na vizinhança) pode conduzir a erros significativos nos cálculos de ventilação natural.

Como evidenciado pelas pesquisas descritas anteriormente, valores de C_p são comumente obtidos através de pesquisas em túnel de vento utilizando modelos sólidos e de baixa porosidade. Cóstola & Alucci (2011) adiantam, no entanto, que a obtenção de dados de C_p segundo esse método nem sempre é possível em função dos elevados custos, equipamentos e conhecimentos técnicos envolvidos.

Alternativamente, quando não for possível determinar valores de coeficiente de pressão através da técnica de túnel de vento, é possível defini-los através de modelos de dinâmica dos fluidos computadorizada (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009). Costóla & Alucci (2009) asseguram que dentro de condições apropriadas de refinamento e parametrização da malha, adoção de um modelo de turbulência adequado e sistematização das etapas da simulação, é possível determinar valores de C_p confiáveis para estudos de conforto térmico, como atestado em diversos estudos (NISHIZAWA et al, 2003; BURNETT; BOJIC; YIK, 2005; HIRANO et al, 2006; LAM; LEUNG; ZHAO, 2008; CHENG; LAM; DEMIRBILEK, 2008; SHEN et al, 2012).

2.2.6.2. A vazão de ar em edifícios

A previsão do potencial de economia de energia e da possibilidade de obter conforto térmico através da ventilação natural tornam necessário o cálculo dos fluxos de ar que atravessam as aberturas de uma edificação em um determinado período (SWAMI; CHANDRA, 1987).

Diversos meios podem ser utilizados para medir a vazão de ar em edificações, entre métodos empíricos (AYNSLEY; MELBOURNE; VICKERY, 1977; SWAMI; CHANDRA, 1987; BS 5925, 1991; ASHRAE, 2001) e alguns teóricos presentes em Liddament (1986), passando pelos modelos zonais embutidos

em programas de cálculo do desempenho térmico e a qualidade das avançadas simulações CFD, até medições precisas que utilizam a injeção de gás traçador em modelos físicos em escala. De acordo com a técnica utilizada aumentam a complexidade dos procedimentos envolvidos e a precisão dos resultados, elevando, em consequência, os custos para sua execução (ETHERIDGE, SANDBERG, 1996; CÓSTOLA, 2006; MATOS, 2007).

O fluxo de ar que atravessa um espaço pode ser provocado pela diferença de temperatura entre o ambiente interno e o externo (efeito chaminé), pela pressão devido ao vento incidente sobre as superfícies do edifício e suas aberturas ou pelo efeito combinado de ambos (FROTA; SCHIFFER, 2003; YARKE, 2005). A influência da temperatura sobre o potencial do efeito chaminé é variável significativa, sendo associada às características de dimensão e posição das aberturas. Entretanto, na região quente e úmida, e, sobretudo em edificações residenciais, onde há pouca produção interna de calor e cujas características construtivas comumente determinam pequenas diferenças entre a temperatura do ar externo e interno, a possibilidade de manutenção de condições térmicas satisfatórias através do efeito chaminé é reduzida.

Em relação à ventilação natural devido à ação do vento, a troca do volume de ar de um ambiente ao longo do tempo depende de uma série de fatores, sendo mais complexa a sua determinação se comparada à ventilação mecânica. Além das características determinadas pelo entorno como nível de rugosidade e intensidade de turbulência, a quantidade de aberturas para o fluxo de ar, suas dimensões, características, orientação em relação ao vento incidente e a posição que ocupam nas fachadas exercem influência significativa nas taxas de vazão de ar.

Um dos métodos mais simples é apresentado em ASHRAE (2001). A equação 25 determina a taxa de vazão de ar como o produto entre a área livre de abertura para entrada de ar (A), a velocidade do vento (V) e um coeficiente em função do ângulo de incidência do vento (C_v).

$$Q = C_v \times A \times V \quad (\text{Equação 25})$$

O valor de C_v varia entre 0,5 e 0,6 para incidências perpendiculares e de 0,25 a 0,35 para incidências inclinadas em relação à superfície da edificação.

O modelo proposto pela British Standard 5925 (1991) para determinar a vazão de ar é um dos mais difundidos. O método, descrito na equação 26, é aplicado em diversos estudos para determinar a quantidade de trocas de ar para ventilação cruzada durante um intervalo de tempo.

$$\phi = C_d \times A_0 \times V \times \sqrt{C_{p_e} - C_{p_s}} \quad (\text{Equação 26})$$

Onde:

C_d é o coeficiente de perda de carga devido à resistência imposta pelas aberturas.

A_0 é a área equivalente de abertura para ventilação

V é a velocidade do ar, a ser corrigida em função da direção de incidência do vento

C_{p_e} é o valor do coeficiente de pressão na entrada de ar

C_{p_s} é o valor do coeficiente de pressão na saída de ar

O valor do coeficiente de perda de carga (C_d) depende da dissipação da energia devido à pressão exercida pelo vento. Seu valor varia em função de características da abertura tais como geometria e a forma como esta interage com o fluxo de ar. O coeficiente traduz o potencial de energia efetivamente convertido em ventilação natural pela abertura, variando de 0, onde toda a energia é perdida, até 1, correspondendo ao total de seu aproveitamento. O valor determinado como perda de carga afeta linearmente a quantidade de energia disponível na abertura e seu valor possui mesma importância que o da área da abertura (CÓSTOLA; ALUCCI; ETHERIDGE, 2009). O valor do coeficiente de perda de carga pode ser dado pela equação 27:

$$C_d = \frac{q}{A} \sqrt{\frac{\rho}{2 \Delta P}} \quad (\text{Equação 27})$$

Onde:

q é a vazão de ar que atravessa a abertura

A é a área da abertura

ρ é a densidade ou massa específica do ar

ΔP é a diferença de pressão entre a face interna e externa da abertura

Frota & Schiffer (2003) sugerem o valor de 0,6 para C_d , correspondendo às características de aberturas comumente encontradas. Quanto ao valor da área de abertura equivalente (A_0), este é calculado a partir da equação 28. Diferentemente da soma aritmética realizada na presença de aberturas em paralelo, para os casos onde existam aberturas em série é necessária a adoção do inverso dos quadrados.

$$\frac{1}{A_0^2} = \frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2} \quad (\text{Equação 28})$$

Onde:

A_e é a área de abertura para entrada do ar

A_s é a área de abertura para saída da ar

O valor da velocidade do ar (v) é obtido a partir da relação entre a velocidade do ar externo medido em estação meteorológica (v_0) devendo ser corrigido em função da altura da abertura e devido à influência do entorno. Algumas equações para o perfil de vento podem ser utilizadas, como a equação 6 (BRE, 1978) apresentada no item 2.2.3.2. Para o caso de incidências de vento oblíquas em relação à abertura, a velocidade do ar para a altura desejada (V_0) deve ser ainda multiplicada pelo cosseno do ângulo formado entre a direção do fluxo e a normal à fachada, como indica a equação 29.

$$v = v_0 \times \cos \theta \quad (\text{Equação 29})$$

O algoritmo proposto por Aynsley; Melbourne; Vickery (1977), apresentado na equação 30, é classificado por Bittencourt & Cândido (2005) como “um balanço entre precisão e simplicidade”. A aplicação deste é recomendada às situações que envolvam aberturas em série.

$$\phi = \sqrt{\frac{(Cp_1 - Cp_{n+1})V_z^2}{\frac{1}{Cd_1^2 A_1^2} + \frac{1}{Cd_2^2 A_2^2} + \dots + \frac{1}{Cd_n^2 A_n^2}}} \quad (\text{Equação 30})$$

Onde:

Cp_1 é o coeficiente de pressão na abertura de entrada

Cp_{n+1} é o coeficiente de pressão na abertura de entrada

V_z é a velocidade do ar na altura da cobertura da edificação

Cd_1 é o coeficiente de perda de carga da abertura de entrada

Cd_2 é o coeficiente de perda de carga para aberturas internas

Cd_n é o coeficiente de perda de carga da abertura de saída

A_1 é a área de abertura da entrada de ar

A_2 é a área de abertura interna

A_n é a área de abertura da saída de ar

Outro método é proposto por Silva & Saraiva (2005) para estimar as taxas de vazão de ar edificações. O modelo assume que o percurso do ar através dos ambientes pode ser determinado e compara os ambientes internos a dutos interconectados segundo configurações em série ou em paralelo. Partindo dessas premissas, os autores examinam o fluxo de ar através de cinco aberturas de um edifício residencial, determinando a vazão de ar devido à diferença de pressão sobre as fachadas.

Parte do método empreendido por Silva & Saraiva (2005) é encontrada em Saraiva; Silva; Santos (1999), onde foi aplicado para o caso de um apartamento com geometria mais complexa.

2.2.6.3. **Ventilação natural e CFD**

A Dinâmica de Fluidos Computacional, mais conhecida pela sigla CFD (*Computational Fluid Dynamics*), permite estudar o escoamento de fluidos com transmissão de calor ou transporte de massa, mudanças de fase, reações químicas, movimentos mecânicos e tensões entre outros fenômenos.

Programas CFD podem ser aplicados a diferentes campos do conhecimento. As possibilidades permitidas são diversas e em teoria somente podem ser limitadas pela capacidade computacional disponível.

Shaviv; Yezioro; Capeluto (2001) consideram que modelos CFD são muito poderosos e requerem cálculos intensos, mas apresentam resultados detalhados que permitem avaliar os defeitos em projetos sugeridos. Novas propostas alternativas de projeto podem, então, ser pensadas e reavaliadas até alcançar produtos satisfatórios. A ferramenta produz resultados rápidos se comparada a experimentos realizados no ambiente real, uma vez que a evolução na capacidade de processamento dos computadores tornou a análise dos resultados mais simples, diminuindo o tempo para realização das simulações e o seu custo (CELINSKI; SANTOS; MENDES, 2003).

A dinâmica dos fluidos computacional ou engenharia de vento computacional permite a análise de diversos processos físicos associados ao comportamento do vento desde as pequenas escalas até a ventilação natural na camada intra-urbana (Murakami et al, 1999). No que se refere à sua aplicação no âmbito da arquitetura e planejamento urbano, as simulações CFD proporcionam análises qualitativas e quantitativas do desempenho da ventilação natural em várias fases do projeto. No caso da aplicação de prescrições urbanísticas em relação a um conjunto de edifícios, permite

verificar alterações ocasionadas na área de estudo em cenários futuros e seus impactos sobre a cidade (TOLEDO; PEREIRA, 2004; PRATA, 2005).

Mais recentemente, modelos CFD foram empregados em diversos estudos para analisar o comportamento do vento na escala urbana (ZHANG et al, 2005; YIM et al, 2009; ASFOUR, 2010; CHENG et al, 2011; NG et al, 2011; YANG; LI, 2011; TURKBEYLER et al, 2012; YUAN; NG, 2012; HANG; LI, 2012).

A versatilidade da ferramenta permite comparar os resultados de diferentes propostas de ocupação do solo, a maior permeabilidade de um arranjo espacial urbano em relação a outro ou a influência específica de um edifício ou conjunto de obstáculos sobre o escoamento do ar em uma região da cidade, como demonstra a figura 32. Portanto, o método pode ser diretamente associado ao processo de planejamento urbano.

Figura 32 – Comparação da ventilação natural entre duas opções de ocupação do solo para uma mesma área de Hong Kong

Fonte: Ng et al (2011).

Explorando as diversas capacidades da ferramenta, em algumas investigações são analisados os fluxos de ar desde o ambiente exterior até seus reflexos no ambiente interno (MOCHIDA et al, 2005; LIU et al, 2014). Internamente, o comportamento das correntes de ar pode ser detalhado em qualquer ponto, permitindo avaliar precisamente a relação entre o movimento do ar e a temperatura interna, parâmetros determinantes para o conforto térmico dos ocupantes, como indicado na figura 33 (MURAKAMI et al, 1999; CARRILHO DA GRAÇA et al, 2002; ZUKOWSKI, 2007; WANG; WONG, 2009; CHEUNG; LIU, 2011; CHAFI; HALLÉ, 2011; RAMPONI; BLOCKEN, 2012; PRAJONGSAN; SHARPLES, 2012; LIU et al, 2014).

Figura 33 – Contorno de velocidades e os vetores sobre o corpo humano

Fonte: Murakami et al (1999)

2.3. Conclusões do capítulo

A economia de energia em edificações constitui um dos principais desafios para a arquitetura e urbanismo contemporâneos e quaisquer medidas para redução do consumo terão, certamente, impacto significativo na demanda energética global.

Paralelamente, o recente acesso a meios ativos de condicionamento térmico tem contribuído para elevação na demanda energética, o que não se justifica em edificações residenciais, em que são maiores as possibilidades de redução do consumo energético através de estratégias passivas.

Entretanto, como evidenciado pela revisão da literatura, o meio urbano pode comprometer o potencial da ventilação natural em função das alterações estruturais no comportamento do vento e devido ao maior acúmulo de energia que ocorre, sobretudo, em trechos mais adensados da cidade.

Por outro lado, a radiação solar sobre as superfícies da edificação constitui a principal fonte de ganhos de calor em edifícios residenciais. Em condições tropicais, o potencial da obstrução de parte da incidência solar sobre o ambiente construído permanece, entretanto, pouco explorado. A escassa literatura que aborda a questão a trata sob o ponto de vista urbano. Na presente pesquisa, porém, busca-se evidenciar os aspectos positivos do sombreamento provocado pela própria forma urbana sobre a qualidade térmica de ambientes internos, devendo os meios utilizados apresentarem sensibilidade para medir este parâmetro.

Neste capítulo, enfatizou-se a teoria e os fenômenos envolvidos na ventilação natural por ação do vento em meio urbano e no interior de edificações, com foco no cálculo de C_p e na vazão de ar através de ambientes. O movimento do ar, e principalmente o seu papel para a sensação de resfriamento e arrefecimento passivo da envoltória de edifícios, ganha complexidade quando analisado em relação à expansão dos limites da zona de conforto térmico. Diversas equações estão disponíveis em literatura como forma de mensurar o efeito de resfriamento fisiológico que o movimento do ar produz. Estas deverão ser aplicadas aos resultados das simulações. A partir de investigações recentes, é sabido que para a condição tropical quente e úmida, o risco de desconforto causado por velocidades do ar mais elevadas (DR) deve ser reavaliado quanto ao seu efeito negativo.

Códigos CFD são ferramentas poderosas para a análise dos fenômenos que envolvem a dinâmica dos fluidos e, entre estes, a ventilação natural. A técnica permite realizar um maior número de análises em comparação a outros métodos, como ensaios em túnel de vento. Facilmente, pode-se variar-se a geometria e as condições de contorno sem grandes investimentos materiais ou em função do tempo, aspectos fundamentais a presente pesquisa.

O conjunto dos trabalhos revisados, em um primeiro momento, serviu para indicar quais variáveis envolvidas no processo de ventilação natural em edifícios devem ser quantificadas como forma de avaliar, de forma objetiva, os impactos do adensamento através da verticalização: os coeficientes de pressão sobre as fachadas, as taxas de renovação do ar e a velocidade do ar. Além de ajustes no método empreendido, o levantamento do estado da arte serve, também, para definir as bases de seleção e modelagem dos cenários urbanos utilizados como estudos de caso.

3. Contextualização

A cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, localiza-se na zona litorânea do nordeste brasileiro. O município situa-se à porção norte do território cearense, coordenadas de latitude sul: 3° 4' S e longitude oeste 38° 3' W.

A metrópole possui uma área aproximada de 314,93 Km² e concentra a maior população do estado, com 2.571.896 habitantes distribuídos numa densidade demográfica de 7.786,44 hab/km², segundo dados do IBGE (2014).

Este capítulo aborda o clima da localidade utilizada como estudo de caso por compreender que este constitui um dos elementos fundamentais a ser considerado na agenda do planejamento urbano. Tendo como objetivo o conforto térmico e a redução do consumo de energia em edificações, o projetista deve conhecer quais soluções construtivas e urbanísticas são mais adequadas ao contexto climático da região em que se inserem, uma vez que tais aspectos têm implicações diretas sobre a qualidade de vida dos cidadãos.

Uma investigação sobre o adensamento construtivo torna ainda mais necessário considerar as características climáticas locais como base para verificar, de maneira mais precisa, a forma como o desempenho termoenergético de edificações naturalmente ventiladas e, portanto, o conforto térmico dos ocupantes são afetados pela formas urbanas avaliadas.

A seguir, apresenta-se o diagnóstico climático da cidade de Fortaleza, com ênfase no comportamento do vento.

3.1. Diagnóstico climático de Fortaleza

O clima da capital cearense é do tipo AW' da classificação de Köppen (1918), correspondendo ao macroclima da faixa costeira, tropical chuvoso, quente e úmido, com temperatura média de 26,6 °C. Caracteriza-se por um alto índice de umidade relativa devido à influência marítima e elevada taxa de evaporação, segundo a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Os meses de junho, julho e agosto apresentam menores médias de temperatura com 25,9 °C, 25,7 °C e 26,1 °C, respectivamente. Novembro, dezembro e janeiro contrapõem-se à estação invernal, com médias mais elevadas: 27,2 °C, 27,3 °C e 27,4 °C, respectivamente.

A intensa radiação solar e consequente elevação das temperaturas no município durante o segundo semestre, associadas às baixas precipitações a partir de junho, intensificam as taxas de evaporação nesta época do ano. É durante a máxima atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que ocorre o período chuvoso, entre os meses de março e maio, quando são verificados os mais baixos índices de evaporação.

A caracterização do clima local é realizada através de um diagnóstico climático obtido por meio das normais climatológicas, que correspondem às médias dos dados medidos durante 30 anos em estações meteorológicas controladas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A série de registros utilizada compreende o período entre 1961 e 1990 e foi obtida a partir do *software* Climaticus, desenvolvido por Alucci (2005) (tabela 4).

Cidade: Fortaleza	Latitude: 3.46 (S)				Longitude: 38, 4 (W. Grw.)					Altura: 26,5 m			
Registro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Pressão Atmos (hPa)	1007	1008	1008	1008	1009	1010	1011	1010	1010	1009	1008	1008	1008,7
Temp. Média (°C)	27,3	26,7	26,3	26,5	26,3	25,9	25,7	26,1	26,6	27	27,2	27,3	26,6
Temp. Máxima (°C)	30,5	30,1	29,7	29,7	29,1	29,6	29,5	29,1	29,2	30,5	30,7	30,8	29,9
Temp. Mínima (°C)	24,7	23,2	23,8	23,4	23,4	22,1	21,8	22,6	23,4	24,5	24,4	24,6	23,5
Temp Máx Absoluta (°C)	33	33,3	32,8	32,6	32,8	32	33	34,4	33,4	33,4	33	33,2	34,4
Temp Mín Absoluta (°C)	20,1	21,2	20,6	20	21	20,3	19,3	19,5	20,1	20,9	20,6	21	19,3
Precipitação Total (mm)	130	216	339	348	226	160	91,4	31,2	22,8	15,6	13,4	49,8	1642,3
Precip-Máx em 24h (mm)	81,2	211	128	196	131	142	149	131	38,1	36	19,1	74,4	211,4
Evaporação Total (mm)	120	95,5	72,4	68,1	84,6	94,7	118	152	168	174	168	154	1469,2
Umidade Relativa (%)	78	79	84	85	82	80	80	75	74	73	74	76	78,3
Insolação Total (horas)	216	176	149	153	209	240	263	169	283	296	283	257	2694,3
Nebulosidade (0-10)	6	6	7	7	6	5	4	4	4	4	5	5	5,3

Tabela 4 – Normais climatológicas para Fortaleza.

Fonte: Alucci (2005).

O Climaticus (Alucci, 2005) oferece ao usuário um banco de dados climáticos de 58 cidades brasileiras e disponibiliza ferramentas para o diagnóstico climático, tais como a Carta Bioclimática de Givoni, a classificação do clima segundo Mahoney e diagramas de geometria. Fornece, também,

gráficos de temperatura e umidade do ar, radiação solar e insolação, ventos, precipitação e nebulosidade. O programa permite, ainda, estimar o consumo e o custo da energia elétrica de um ambiente.

Analisando-se a figura 34, nota-se que praticamente durante todo o ano, a partir do início da tarde até o começo da noite, a temperatura do ar atinge níveis mais elevados, situando-se em torno de 30 e 32 °C, período destacado pela cor magenta no gráfico.

Figura 34 – Variação da temperatura do ar de Fortaleza ao longo do dia e durante o ano
Fonte: Alucci (2005).

Como é possível perceber na figura 35, a temperatura do ar atinge valores mais altos, próximos de 31 °C, durante os meses de outubro e dezembro, o que concorre para o aumento nas taxas de evaporação. A umidade relativa do ar tem sua curva alterada no ciclo anual, com pico em abril e depressão de agosto a dezembro, justamente no período em que as temperaturas do ar estão mais elevadas. Contudo, destaca-se os valores situam-se entre 70% e 85% durante todo o ano. Tais níveis de umidade do ar combinados às altas temperaturas e elevadas parcelas de radiação solar concorrem à situação de desconforto térmico na capital cearense.

Figura 35 – Variação da temperatura e umidade do ar ao longo do ano
Fonte: Adaptado de Alucci (2005).

O período compreendido pelos meses de janeiro a junho, corresponde à época de maior nível de precipitações, quadro oposto ao

período de maior evaporação, que ocorre entre agosto e dezembro, como indicado na figura 36.

Figura 36 – Evaporação total e precipitação ao longo do ano
Fonte: Adaptado de Alucci (2005)

Em relação às horas de sol, os meses de setembro, outubro e novembro apresentam as maiores quantidades totais, todos acima de 250 horas de sol, como demonstrado pela figura 37. Durante os meses de fevereiro, março e abril, há aumento na nebulosidade e, consequentemente, diminuição nas horas de insolação.

Figura 37 – Distribuição das horas de sol em Fortaleza ao longo do ano.
Fonte: Adaptado de Alucci (2005).

Por situar-se em latitude próxima ao equador, a distribuição da radiação solar em Fortaleza (3° S) apresenta incidência considerável em praticamente todas as orientações. As orientações leste e oeste tem variação similar durante o ano, sempre com elevados níveis de radiação solar.

Durante os meses mais quentes a orientação sul recebe maior incidência solar, ao passo que nos meses mais frios a orientação norte recebe maior quantidade de energia, como resume a figura 38.

³²http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm

Figura 38 – Distribuição da radiação solar em Fortaleza no mês mais quente e no mês mais frio

3.1.1. Dados de vento

A utilização da ventilação natural para resfriamento da edificação e conforto térmico dos usuários depende, fundamentalmente, das condições de vento no local. Bittencourt & Cândido (2005) ressaltam que, para uma avaliação adequada da possibilidade de aplicação dessa estratégia deve-se considerar a sua frequência e intensidade, analisando, também, os períodos de calmaria. A eventual verificação de longos períodos dessa natureza e de baixa velocidade dos ventos, sobretudo durante épocas mais quentes, inviabiliza a adoção dessa estratégia. Para locais com vento estável e intensidade superior a 3 m/s, os autores asseguram que a ventilação é a estratégia de refrigeração mais simples e eficiente.

Aynsley (2006) explica que, sendo o vento um fenômeno natural altamente variável, longos prazos de registros podem indicar as direções predominantes e velocidades médias somente para os pontos onde os dados são coletados. A previsão das características de vento para um determinado momento com um grau aceitável de precisão para além das 24 horas ainda não é possível. Do ponto de vista dos projetistas de edificações, o melhor que se pode fazer é utilizar as longas séries de registros de vento para estimar a probabilidade ou percentual do tempo em que um comportamento específico do vento ocorre.

Uma vez que o foco desta pesquisa inclui a análise das condições de ventilação natural em meio urbano, faz-se fundamental a caracterização do regime de ventos como dado de entrada nas simulações de ventilação natural na escala urbana.

As informações climáticas utilizadas para analisar o regime de ventos na cidade de Fortaleza foram obtidos a partir do site do DoE³² (*Department of Energy*). O órgão americano disponibiliza a série de dados horários contendo temperatura do ar, ponto de orvalho, direção do vento e velocidade do ar para cada hora, além de outras informações coletadas pela estação meteorológica presente no Aeroporto Internacional Pinto Martins.

A sistematização dos dados para determinação das principais predominâncias do vento em Fortaleza foi feita com base em Leite (2010), que identificou o aumento da velocidade em função da elevação do

gradiente de temperatura ao longo do dia, além de sua alteração em função da sazonalidade, cuja maior intensidade ocorre no segundo semestre em virtude da redução na umidade relativa e no regime de precipitações. Tomando a mesma metodologia de análise, expandiu-se a série de dados para abranger as informações mais recentemente disponibilizadas. O período total compreende o intervalo entre o dia 12 de fevereiro de 2002 até o dia 29 de dezembro de 2011, que corresponde a 86.544 horas.

Desse total, 76.595 horas foram registradas como dados, ou seja, em aproximadamente 89% desse período o sensor da estação meteorológica captou a série ou parte das informações climáticas. Entretanto, como forma de realizar uma sistematização mais precisa, as informações disponíveis foram filtradas. Assim, as horas em que a velocidade do ar e a direção apresentavam valores 0 (zero) foram descartadas por não representarem momentos de calmaria (0,0 m/s) ou ventos incidindo do norte 0°, mas compreendidos como falhas do sensor, cujas informações foram anuladas.

Dessa filtragem resultaram 68.899 dados considerados válidos para análise, correspondendo a 90% das informações coletadas e 80% do total de horas do período disponibilizado. Posteriormente, isolando-se os dados válidos, procedeu-se uma análise visando avaliar a ausência de dados. Os registros foram organizados segundo quatro categorias: horária, períodos do dia (madrugada, manhã, tarde e noite), mensal e anual. Os resultados evidenciam a uniformidade destes em suas respectivas categorias, sem lacunas que comprometeriam a qualidade das informações.

Confirmada a possibilidade de utilização dos dados disponíveis, estes foram organizados para, então, caracterizar as condições de vento sobre a cidade de Fortaleza.

A figura 39 resume a distribuição dos dados válidos segundo a direção de vento. O resultado indica a predominância das direções leste e sudeste que, somadas, correspondem a cerca de 78% do total. A direção sul apresenta ainda uma frequência de ocorrência considerável, com mais de 16% do total, ao passo que as demais orientações apresentam valores baixos e, somadas, correspondem a pouco mais de 5% do total.

Figura 39 – Tabulação dos dados de vento e determinação das principais direções segundo a frequência de ocorrência

Como forma de determinar os valores médios de velocidade do ar e direções de vento mais frequentes, organizou-se os registros através de rosas dos ventos, aplicando a estratificação em 8 direções principais. A distribuição das frequências de velocidades foi detalhada em 9 classes ou intervalos. A

rosa dos ventos apresentada na figura 40 reforça a direção leste como a primeira predominância para o conjunto de dados entre 2002 e 2011. O vento nessa direção representa 44% das frequências registradas. A segunda predominância observada é sudeste, correspondendo a cerca de 34% do total de dados. A frequência sul ainda apresenta certa ocorrência, com 17% do total, aproximadamente.

Figura 40 – Rosa dos ventos de Fortaleza para o período entre 2002 e 2011

Fonte: Adaptado de WindRosePRO 3.1.0

Em relação à velocidade do ar, os valores indicados no gráfico (figura 41) apontam que, de maneira geral, o vento em Fortaleza apresenta intensidade moderada, com velocidade média de 4,43 m/s. Em mais de 53% do período analisado os valores situam-se acima de 3 m/s. A estratificação por classes de velocidade permite inferir que a maior parte dos dados está distribuída em intervalos de 3 a 4 m/s (19,1%), entre 4 e 5 m/s (17,2%) e entre 5 e 6 m/s (16,8%), reforçando a viabilidade da estratégia para o conforto térmico e melhoria do desempenho de edificações situadas nessa região.

Figura 41 – Distribuição das frequências de velocidade dos dados entre 2002 e 2011

Em avaliações da adequabilidade de projetos em relação à ventilação natural é comum a utilização da primeira e segunda predominância de vento apenas, desprezando-se incidências menos frequentes. Analisando especificamente os dados de vento para a direção leste (primeira predominância), durante o período entre 2002 e 2011, observa-se que os registros indicam maiores intensidades concentradas nos intervalos de 3 a 4 m/s (22%), 4 a 5 m/s (19,7%) e 5 a 6 m/s (19,8%), como resume a figura 42. A velocidade média para a direção leste foi calculada em 4,54 m/s. No caso do vento a sudeste, a segunda predominância, verifica-se que este apresenta intensidade mais elevada, com maior quantidade de incidências entre 5 e 6 m/s (18,2%), entre 4 e 5 m/s (17,7%) e, principalmente, acima dos 8 m/s, que totaliza mais de 10%. Como resultado, a velocidade média correspondente a essa maior intensidade na direção sudeste isoladamente foi calculada em 5,11 m/s, valor 12% maior do que o verificado na principal predominância.

Figura 42 – Distribuição das frequências de velocidades para as incidências leste e sudeste entre 2002 e 2011

Da análise dos dados de vento entre 2002 e 2011 é possível concluir que ocorre uma tendência na distribuição das velocidades em classes mais elevadas entre o final da manhã e início da noite, com picos ocorrendo durante a tarde. Assim, buscou-se avaliar uma possível relação entre temperatura e velocidade do ar. Apesar de um R^2 baixo (0,26) em função da ocorrência de velocidades elevadas também quando as temperaturas estão mais baixas (até 28 °C), o que é importante ressaltar é a tendência de aumento na velocidade do ar durante os períodos mais quentes do dia.

Figura 43 – Correlação entre temperatura e velocidade do ar para dados de vento entre 2002 e 2011

A partir da série de informações climáticas fornecida, o programa *WindRosePRO 3.1.0* define um dia típico de acordo com a média de velocidades e direção para cada hora do dia em conjunto com o número de ocorrências e o desvio padrão.

Analisando a relação entre temperatura e velocidade do ar, verifica-se que a elevação no valor da primeira variável, que normalmente ocorre durante a tarde, é acompanhada pelo aumento na intensidade do vento. A direção predominante, contudo, sofre pequena variação durante o dia, não superior a 40°, situando-se sempre entre os quadrantes leste e sudeste. A velocidade do ar, por sua vez, eleva-se de 3,5 m/s para valores acima de 6 m/s entre as 13:00 e 17:00, como resumido na figura 44.

Figura 44 – Comportamento do vento em dia típico
Fonte: WindRosePRO 3.1.0

A expansão desta relação para períodos maiores (meses ou anos) reitera a ocorrência do efeito sobre a velocidade do ar, como já descrito em Leite (2010). Tal aspecto reforça a aplicação da ventilação natural como estratégia passiva para amenizar justamente os horários em que as altas temperaturas podem gerar condições desfavoráveis ao conforto térmico.

3.2. A definição do edifício e apartamento modelo

A definição de um modelo de edifício residencial multifamiliar e seu apartamento constitui parte fundamental para o estudo das relações investigadas na presente pesquisa.

A adoção de um edifício como referência ou a formulação de um modelo hipotético a partir de exemplares existentes foi realizada em diversas pesquisas semelhantes (CARRILHO DA GRAÇA et al, 2002; MOESEKE et al 2005; CHEUNG; FULLER; LUTHER, 2005; BURNETT; BOJIC; YIK, 2005;

³³ A professora Adelita Carleial, em matéria do jornal Diário do Nordeste de 16/11/2009 intitulada **Cidade cercada por um cinturão de concreto**, reforça que o fenômeno da verticalização se espalha indistintamente por Fortaleza, não se configurando uma cidade verticalizada apenas a Leste. O que se percebe no processo de expansão urbana da capital cearense, segundo a pesquisadora, são grandes vias funcionando como corredores que conduzem a verticalização também para oeste, sudeste e sudoeste, em diversos bairros.

³⁴ Segundo dados do Sindicato de Comércio e Serviços do Ceará (SECOVI-CE), em 2011 os empreendimentos de dois dormitórios absorveram a maioria dos compradores, com procura que chegou a 41,29%, seguidos pelos apartamentos de três dormitórios, com 34,22% do total. Entretanto, o enfoque dado à pesquisa na opção por apartamentos de três quartos deve-se à indicação presente no portal do sindicato e exposta entrevista informal com a gerente do Instituto de Pesquisa e Estatísticas (INPES) apontando que, apesar do crescimento na procura de apartamentos de um e dois quartos e decréscimo nas vendas de apartamentos maiores, o principal produto imobiliário neste setor ainda é o apartamento de três dormitórios.

FIGUEIREDO, 2007; MARCONDES, 2010; PRAJONGSAN; SHARPLES, 2012; LOURA; ASSIS; BASTOS, 2012; LIU et al, 2014).

É possível adotar um exemplar existente ou mesmo formular um modelo a partir de referências da produção local. Com a medida, determina-se uma base mais concreta e objetiva para as simulações CFD e de desempenho térmico a serem realizadas. Ao tomar um modelo, mantendo-se suas dimensões, orientação, características construtivas de fechamentos e aberturas, aproxima-se as avaliações da pesquisa à realidade. A utilização de um edifício e apartamento únicos, isolando suas características, permite, por outro lado, avaliar a influência das características do entorno sobre o desempenho térmico do apartamento e o conforto de seus ocupantes. Então, a variação das condições de contorno, compreendidas pela pressão incidente sobre as fachadas, a velocidade dos fluxos e a quantidade de radiação solar, características impostas pelas formas dos cenários urbanos analisados, permite quantificar o peso destas sobre as condições ambientais internas.

Nesta pesquisa, optou-se pela adoção de um exemplar existente. O edifício escolhido deveria, portanto, apresentar as características formais, os materiais construtivos e a orientação das fachadas entendidos como convencionais, correspondendo às regras ou a um padrão para esta tipologia de edifícios construídos na cidade de Fortaleza. Paralelamente, seu apartamento também deveria possuir os ambientes do programa de necessidades mais recorrentes no conjunto analisado, também permitindo identificá-lo como uma amostra de referência.

Visando a delimitação de um universo a ser pesquisado, estabeleceram-se recortes espacial e temporal. A seleção dos empreendimentos imobiliários do tipo residencial multifamiliar verticalizado tomou como recorte espacial partes específicas da atual dinâmica urbana³³ da cidade, na qual sete bairros apresentam processo de verticalização mais intenso nos últimos anos, que se desenvolve ao longo de importantes eixos de circulação. O recorte temporal, por sua vez, foi determinado visando caracterizar o quadro recente de produção desta tipologia, mais especificamente a partir de 2010, e sua possível projeção para os próximos anos. Some-se a este aspecto, a maior facilidade em obter informações sobre os empreendimentos há pouco finalizados, ainda em obra ou em fase de lançamento, disponíveis em *stands* de vendas, *folders* impressos e digitais, propagandas na internet ou em corretoras de imóveis entre outras formas de aquisição de dados, facilitando o levantamento a ser realizado.

Estabelecidos tais recortes, levantou-se o maior número possível de edifícios lançados recentemente nos trechos urbanos selecionados. A maioria dos empreendimentos residenciais multifamiliares recentes se concentra nos bairros Aldeota, Cocó e Meireles. Estas três áreas reúnem mais de 80% dos lançamentos no período analisado. Em seguida, o total de informações sobre empreendimentos residenciais foi filtrado com base na indicação do SECOVI-CE sobre o principal produto imobiliário comercializado³⁴. Como resultado, do total de unidades, 28 empreendimentos imobiliários com apartamentos de três dormitórios foram selecionados.

A adoção daquele que constituiria o edifício modelo partiu da determinação do que seria um apartamento padrão de três dormitórios em Fortaleza. Para defini-lo, procedeu-se uma análise de todas as plantas baixas obtidas dentro do universo selecionado para definir um programa de necessidades mínimo. Ao analisar o dimensionamento dos apartamentos-tipo dos edifícios levantados, observou-se que a presença de três dormitórios

permite grande variação na quantidade dos outros ambientes que compõem o restante do programa de necessidades. Assim, podem ser observados tanto apartamentos com área abaixo de 60 m² e que dispõem de três dormitórios como também unidades com área próxima dos 160 m² que também possuem a mesma quantidade de quartos. Tal variação decorre do aumento na área dos ambientes somada à presença de outros espaços que não figuram entre os compartimentos de apartamentos menores.

Deste modo, todos os ambientes dos apartamentos-tipo de cada um dos 28 edifícios levantados foram tabulados para verificar a sua recorrência, estabelecendo-se os ambientes imprescindíveis e que, portanto, deveriam compor a configuração mínima de apartamentos de três dormitórios. Ao final, três edifícios apresentaram os melhores resultados, ou seja, apresentavam todos os ambientes considerados necessários. Por fim, escolheu-se aquele cujos desenhos técnico-construtivos e demais informações foram obtidos em completude junto ao escritório responsável pelo projeto arquitetônico.

O apartamento adotado como modelo apresenta 67,71 m² de área útil e cerca de 72 m² de área construída. O pavimento-tipo, apresentado na figura 45, reúne quatro unidades e totaliza cerca de 330 m². A opção em utilizar o apartamento da extremidade orientada para sul deve-se às temperaturas mais elevadas que ocorrem no verão, período em que planos voltados para este quadrante recebem níveis de radiação solar mais elevados, como indicado no item 3.1. A simulação do desempenho térmico de ambientes de permanência prolongada deve abordar justamente essa orientação por configurar uma condição agravada.

Figura 45 – Planta baixa do pavimento tipo e a opção pelo apartamento voltado para o quadrante leste-sul

Nas simulações são analisados três apartamentos nesta mesma posição no edifício, porém em alturas diferentes: no primeiro, décimo primeiro e vigésimo terceiro pavimentos, o que permite comparar o comportamento dos fluxos em situações distintas.

O apartamento no primeiro pavimento acima do térreo, a 3 m do solo, foi escolhido para evidenciar uma condição possivelmente menos favorecida em relação à ventilação natural devido à maior obstrução pelo entorno. O afastamento em relação ao piso evita, ainda, as trocas de calor por condução (temperatura do solo).

Outra unidade escolhida situa-se no décimo primeiro pavimento, a 33 m de altura e próximo da metade da altura do edifício. Nesse nível é possível

³⁵ Através de levantamento fotográfico com cerca de 120 exemplos de empreendimentos residenciais multifamiliares localizados nos principais eixos de avenidas e bairros onde o processo de verticalização apresenta-se de maneira mais evidente, Lins (2010) conclui, entre outros aspectos discutidos, acerca da preferência pela orientação leste, praticamente configurando uma regra na implantação de empreendimentos residenciais, e a recorrente adoção de revestimento cerâmico das fachadas na produção imobiliária atual, contrapondo-se a materiais menos nobres que revestem as fachadas voltadas para oeste.

avaliar a influência de uma região próxima ao ponto de estagnação do ar, trecho localizado ao centro da fachada a barlavento que pode ocorrer em modelos de baixa porosidade (SARAIVA, 1983) e que é responsável pela redução significativa da pressão incidente.

O último apartamento analisado situa-se no vigésimo terceiro (66 m do solo). Próximo do limite de altura máxima permitida pela legislação urbana, neste nível é possível analisar o comportamento do vento afastado da influência da rugosidade. Ao mesmo tempo, a opção pelo penúltimo pavimento visa evitar que os ganhos de calor excessivos pela cobertura influenciem os resultados das simulações, uma vez que em baixas latitudes, a radiação solar nos planos horizontais é significativa em diversos momentos do dia.

Após a definição do apartamento modelo, avaliou-se a possibilidade de utilizar também o edifício que o contém. Nesse sentido, foram listadas as características típicas comuns aos edifícios multifamiliares de Fortaleza baseadas na análise visual, experiência profissional e pesquisa³⁵ relacionada ao tema, corroborando o seu enquadramento.

As principais características ou padrões apontados são a orientação preferencial leste-oeste, com a disposição dos cômodos de permanência prolongada voltados para nascente em contraposição aos setores de serviço e a circulação vertical, que são voltados para a fachada o poente. Essa configuração visa aproveitar a insolação das primeiras horas do dia e a ventilação natural predominante, que sopra a partir do quadrante leste-sudeste. O resultado é uma configuração mais alongada e com maiores planos de fachadas voltadas para essas orientações. Além disso, há uma nítida valorização da fachada voltada para leste com a presença de materiais construtivos mais nobres e jogo plástico-formal mais elaborado em oposição à fachada poente.

Sobre essa relação, Givoni (1994) destaca que, em regiões de clima quente e úmido, a orientação do edifício é ditada pela necessidade de obter ventilação cruzada em conformidade com a principal incidência do vento. A importância da ventilação natural é crucial no processo de projeto, o que determina a localização dos ambientes de permanência prolongada, compreendidos como os ambientes de estar e dormir, voltados para os quadrantes leste e sudeste, que abrangem os ventos predominantes na capital cearense, como determinado pelo item 3.1.1.

De maneira geral, os edifícios residenciais multifamiliares levantados obedecem a esta implantação típica. Mais importante, o edifício que abriga o apartamento adotado como modelo segue este padrão, e ainda que esta opção configure uma implantação com desempenho térmico comprometido, a característica é mantida visando a maior representatividade da amostra.

Também o edifício que contém o apartamento modelo possui o conjunto das características descritas acima, permitindo a sua utilização como na presente pesquisa. Em relação à sua orientação, segue a configuração retangular e mais alongada, na qual os maiores planos estão voltados para leste e oeste. A disposição interna privilegia as áreas de permanência prolongada, voltadas para nascente. Suas fachadas são em alvenaria de tijolos cerâmicos, emboçadas em argamassa de cimento e recebem revestimento cerâmico. O detalhamento dos materiais que compõem o apartamento modelo consta no item 4.2.2, que trata especificamente das diretrizes adotadas nas simulações do desempenho térmico.

Figura 46 – Visualização tridimensional do apartamento modelo utilizado

Muito embora a varanda esteja presente em grande parte dos edifícios residenciais multifamiliares, esta assume diferentes formas no projeto arquitetônico desenvolvido para cada empreendimento. A variabilidade de formas, dimensões e até mesmo a inexistência em muitos dos casos observados impede a determinação de um padrão de varanda. Há que se considerar ainda, e principalmente, a alteração imposta ao fluxo em contato com tais elementos de fachada e o impacto destes nas aberturas para entrada do ar. Uma vez que a forma da edificação influencia o valor da pressão incidente, simplificou-se a geometria do edifício modelo ao estabelecer-se uma fachada voltada para leste completamente plana, como demonstra a figura 47. Com a decisão pela simplificação da geometria, o vento passa a incidir diretamente sobre as janelas, facilitando cálculos e simulações (C_p , vazão de ar, etc.).

Figura 47 – Simplificação da geometria do edifício modelo com a retirada da varanda

3.3. A seleção dos cenários urbanos

A análise da influência da forma urbana sobre o comportamento do vento e seus reflexos sobre o desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas é realizada com base em arranjos espaciais existentes na cidade de Fortaleza.

A opção por avaliar configurações de morfologia urbana verificadas na cidade visa controlar o número de variações possíveis. Em cenários hipotéticos, a combinação entre os diversos índices urbanísticos (dimensões do lote, recuos, índice de aproveitamento, taxa de ocupação e altura de edificações) e os valores permitidos a esses parâmetros nas diferentes zonas previstas na legislação, resultaria numa grande quantidade de configurações. Tendo em vista a realização de simulações computacionais, o mais viável seria escolher algumas amostras de referência entre as propostas formuladas, o que geraria questionamentos semelhantes em relação à abrangência dos resultados obtidos com as formas urbanas selecionadas para análise.

A análise de situações reais, apesar de restringir a variabilidade e o dinamismo que caracterizam morfologia urbana, pode garantir certa abrangência se as formas espaciais de um determinado trecho escolhido possuem certa representatividade, sendo reconhecidas como características comuns, verificadas também em outros trechos da cidade. Muito embora cada trecho urbano apresente configurações morfológicas específicas, é possível evidenciar algumas características urbanas comuns ou recorrentes.

Compreendendo a morfologia urbana enquanto o conjunto de formas, tipologias e relações geométricas dos elementos que compõem a complexidade do espaço urbano, algumas pesquisas analisaram padrões espaciais urbanos na tentativa de caracterizar configurações urbanas típicas. Gupta (1987), por exemplo, o fez de forma bastante simplificada para analisar a relação de obstrução solar causada pelo contexto. Mesmo contando com os avanços computacionais, Yang et al (2012) também definiram o entorno de forma bastante redutiva. Já em Andersen & Sattrup (2011) foi definido um cânion urbano padrão, enquanto que em Zhang et al (2012) quadras urbanas de Cingapura foram comparadas a bairros compreendidos como típicos ou representativos de grandes cidades europeias adensadas. Yuan & Ng (2012) valeram-se de nove contextos urbanos presentes em Hong Kong para simular o impacto da forma urbana sobre o potencial de ventilação natural.

Afastando-se do empirismo envolvido nas pesquisas citadas anteriormente, o trabalho de Martins; Bonhomme; Adolphe (2013), desenvolvido a partir da metodologia empreendida por Adolphe (2001), apresentou um método simplificado de análise e mapeamento da morfologia urbana como forma de auxiliar as investigações de climatologia e dos impactos das formas espalhadas pela cidade sobre o comportamento energético de edifícios. A partir da base metodológica desenvolvida, seis indicadores morfológicos foram identificados e os autores indicaram cinco classes tipológicas segundo a homogeneidade. As cinco classes definidas, horizontal dispersa, vertical baixa, colonial contínua, vertical alta e horizontal densa seriam as mais representativas do tecido urbano de Maceió.

Numa aproximação da metodologia utilizada por Martins; Bonhomme; Adolphe (2013) buscou-se evidenciar traços morfológicos específicos para definir alguns cenários de ocupação típicos da cidade de Fortaleza. Considerando-se os objetivos da pesquisa, que tratam do

adensamento construtivo em sua relação com as condições ambientais em edifícios, foram escolhidos arranjos urbanos que contemplassem, por exemplo, alta verticalização de edificações em um cenário em oposição a predominância de edificações baixas noutro; uma maior taxa de ocupação do solo numa área comparando-a a índices de aproveitamento mais elevados em outro trecho.

Uma vez que a representação de grandes trechos urbanos para simulação computacional torna-se impeditiva em função da capacidade de processamento computacional disponível, todas as quatro áreas escolhidas constituem frações de bairros da cidade de Fortaleza. Para a criação dos cenários caracterizando diferentes níveis de adensamento urbano foram selecionados trechos compostos por doze quadras urbanas em arranjos de 3x4.

A configuração em que mais quadras são dispostas à frente decorre da necessidade em analisar os fluxos de ventilação natural principalmente quanto aos seus impactos a barlavento, conforme discussão apresentada mais adiante, no item 4.1.1.1. Ao centro do conjunto dispôs-se uma quadra em que se aplicou todo o potencial construtivo, elevando-se ao máximo permitido a altura das edificações e utilizando todo o coeficiente de aproveitamento. Como resultado, nesta quadra central é possível implantar quatro edifícios modelo (figura 48). A implantação obedece à orientação leste-oeste em posição paralela às vias lindeiras.

Figura 48 – Esquema geral da escolha das doze quadras que compõem cada um dos cenários urbanos

Ressalta-se que todos os arranjos urbanos escolhidos apresentam a mesma orientação das quadras, inclinadas em relação ao norte devido à organização de praticamente todo o tecido urbano de Fortaleza. Mantem-se, assim, a similaridade para comparar os resultados das simulações.

A escolha do cenário inicial deveu-se, fundamentalmente, à presença de quatro torres residenciais, cada uma com dimensões semelhantes ao edifício adotado como modelo, implantadas no interior de uma mesma quadra. A figura 49 mostra os quatro edifícios existentes, também com 24 pavimentos cada um, situados numa fração de um bairro predominantemente residencial.

Esta forma de ocupação da quadra central foi incorporada e, então, repetida em todos os cenários urbanos avaliados, variando-se somente o seu entorno de acordo com os arranjos espaciais existentes em cada trecho da cidade escolhido como representativo das condições de adensamento e que serão submetidos à série de simulações computacionais.

Figura 49 – Conjunto com quatro edifícios residenciais semelhantes ao edifício modelo e implantados numa mesma quadra urbana no cenário 1

O primeiro cenário, que compreende esta quadra e as adjacentes, contempla uma situação de entorno predominantemente horizontal, onde a maioria das edificações possui um ou dois pavimentos. No zoneamento proposto pelo PDPFor (2009), o trecho está inserido na Zona de Ocupação Preferencial 2 (ZOP 2), onde há *"disponibilidade parcial de infraestrutura e serviços urbanos e áreas com disponibilidade limitada de adensamento; destinando-se à intensificação condicionada da ocupação do solo"*. Os parâmetros urbanísticos são o índice de aproveitamento máximo de 3, taxa de permeabilidade de 30% e taxa de ocupação de 60% que, associadas a altura máxima permitida de 72m, permitem a verticalização de edificações.

A partir da imagem aérea apresentada pela figura 50 é possível perceber a maior horizontalidade do contexto urbano representado pelo cenário 1, reforçada pela visualização tridimensional (figura 51).

Figura 50 – Imagem aérea do cenário 1 e a presença das quatro torres residenciais na quadra central

Fonte: Google Earth

Figura 51 – Volumetria geral do cenário 1

O segundo cenário corresponde a uma área de extrema verticalização de edificações e sua escolha deve-se, especificamente, à necessidade de avaliar o comportamento dos fluxos nessa condição. O adensamento construtivo através da verticalização de trechos periféricos da cidade de Fortaleza e seu impacto sobre a ventilação natural urbana já foi objeto de estudo em Leite (2010). Contudo, nesta região, predominantemente residencial, trata-se de um processo em grande parte consolidado, e num trecho da cidade onde a infraestrutura encontra-se plenamente instalada, como é possível verificar na figura 52.

Figura 52 – Vista geral da verticalização de parte dos bairros que compõem o cenário 2

Fonte: Google Earth

De acordo com o PDPFor (2009), o trecho está inserido na Zona de Ocupação Consolidada (ZOC), que corresponde às áreas que caracterizam-se pela saturação da infraestrutura e nas quais deve ser contido o processo de ocupação intensiva do solo. Como objetivos propostos aos trechos abrangidos pela ZOC estão o controle do “*adensamento construtivo de modo a*

evitar a saturação do sistema viário e da infraestrutura disponível e inadequações relativas à qualidade da paisagem e ao conforto ambiental”.

Apesar da proposta de contenção da ocupação do solo, os índices são praticamente tão permissivos quanto na ZOP 2, com índice de aproveitamento máximo de 2,5, taxa de permeabilidade de 30% e taxa de ocupação de 60% e altura máxima da edificação 72m.

Para modelagem do cenário, a disposição da quadra central foi feita sobre área onde, atualmente, existe um clube desportivo e cuja horizontalidade destaca-se no entorno, permitindo a implantação do conjunto de edifícios modelo. Na figura 53 demonstra-se a posição da quadra central em meio ao entorno verticalizado.

Figura 53 – Imagem aérea do cenário 2 e o trecho destinado a implantação dos quatro edifícios modelo

Fonte: Google Earth

Figura 54 – Volumetria geral cenário 2

Como terceiro cenário foi escolhida uma fração de bairro que experimenta um processo de verticalização que tem se intensificado nos últimos anos. Neste trecho da cidade é possível perceber a recente transformação nos padrões de ocupação do solo, configurando uma situação de adensamento construtivo em que altas estruturas dividem espaço com edificações mais antigas de baixo gabarito. São verificados vazios urbanos em processo de valorização imobiliária, reservados à incorporação por parte de construtoras. O trecho escolhido como cenário 3, à semelhança do cenário 1, também está inserido na ZOP 2, compartilhando dos mesmos índices urbanísticos, o que explica, em parte, a verticalização de edificações.

Para a confecção do cenário, os edifícios modelo foram implantados em uma praça existente, como é possível perceber na figura 55.

Figura 55 – Imagem aérea do cenário 3 e o trecho destinado a implantação dos quatro edifícios modelo

Fonte: Google Earth

Na volumetria geral, apresentada na figura 56, é possível notar um predomínio de edifícios com altura até 30 m na região anterior aos edifícios modelo na quadra central.

Figura 56 – Volumetria geral do cenário 3

O quarto contexto urbano analisado aborda um arranjo espacial de elevadas taxas de ocupação do solo e verticalização pouco expressiva. Com características urbanas mais antigas, o quarto cenário situa-se na região central da capital cearense, onde as edificações são, em sua maioria, de uso comercial e tomam toda a dimensão do lote.

No PDPFor (2009) o cenário 4 está inserido na Zona de Ocupação Preferencial 1 (ZOP 1), que reúne áreas da cidade que caracterizam-se pela *"disponibilidade de infraestrutura e serviços urbanos e pela presença de imóveis não utilizados e subutilizados; destinando-se à intensificação e dinamização do uso e ocupação do solo"*.

Como objetivos da ZOP 1, configuram a intensificação da ocupação do solo e a ampliação dos níveis de adensamento construtivo, condicionadas à disponibilidade de infraestrutura e serviços e à sustentabilidade urbanística e ambiental. Como forma de implementar os instrumentos de indução do uso e ocupação do solo o índice de aproveitamento básico de 3 e máximo também de 3, uma taxa de permeabilidade de 30% e taxa de ocupação de 60%, associadas à uma altura máxima da edificação de 72m.

A permeabilidade aos fluxos deverá ser reduzida nos níveis mais próximos do piso, uma vez que somente as ruas constituem espaços para passagem dos fluxos. Paralelamente, a verticalização é rarefeita, com estruturas de gabaritos mais baixos, em torno de 2 e 3 pavimentos e ocorrência pontual de edifícios mais altos. Esta configuração também incita a investigação de seus impactos para ambientes internos de edifícios.

Diferentemente dos demais cenários, devido à ausência de vazios urbanos, praças ou espaços livres que permitissem inserir os edifícios modelo, escolheu-se uma quadra já ocupada para implantar o conjunto de quatro torres, como demonstra a figura 57.

Figura 57 – Imagem aérea do cenário 4 e o trecho destinado a implantação dos quatro edifícios modelo

Fonte: Google Earth

A volumetria apresentada na figura 58 reforça a maior taxa de ocupação do conjunto urbano reunido no cenário 4.

Figura 58 – Volumetria geral do cenário 4

3.4. Conclusões do capítulo

O diagnóstico climático realizado para a cidade de Fortaleza evidencia níveis elevados de radiação solar, com temperaturas entre 24°C e 32°C associadas a taxas de umidades do ar comumente acima dos 70%. O que se observa, ainda, é a inexistência de diferenças significativas na temperatura do ar ao longo do ano, aspecto evidente pela inexistência de estações claramente definidas, diferenciando-se, apenas, pela maior nebulosidade e pluviosidade nos primeiros meses e um regime de menores umidades relativas a partir do segundo semestre. Tais características podem levar a sensação de desconforto térmico e cabe à ventilação natural o papel de amenizar as condições ambientais na maior parte do ano.

Nesse sentido, a análise dos dados de vento indicou que a ventilação natural mantém-se em direção e intensidade praticamente constantes durante todo o ano, aspectos que corroboram à sua aplicação como principal estratégia passiva para o conforto térmico e economia de energia em edifícios. A predominância de duas direções de vento apenas (leste e oeste) facilita o aproveitamento da ventilação natural no ambiente construído em função da previsibilidade das correntes de ar. Ainda, o total de dados analisados indicou que, na maior parte do tempo (53,1%), o vento tem velocidades entre 3 e 6 m/s, o suficiente para garantir níveis satisfatórios de conforto térmico no interior das edificações a partir do movimento do ar, desde que a forma urbana permita ventilar as fachadas.

A forma de construir a tipologia habitacional multifamiliar foi brevemente analisada com o objetivo de determinar um padrão de edifício e apartamento a serem utilizados nas simulações. Adotou-se um edifício modelo de vinte e quatro pavimentos e setenta e dois metros de altura. Neste, quatro apartamentos dividem um mesmo pavimento, cada um com três dormitórios, sala e cozinha entre outros ambientes. Utiliza-se o

apartamento voltado para o quadrante leste/sul como modelo pelas condições de exposição à radiação solar durante os períodos mais quentes do ano, como evidenciado no diagnóstico climático. Os ambientes da suíte do casal, o dormitório voltado para leste e a sala serão avaliados por constituírem áreas de permanência prolongada.

Finalmente, neste capítulo, foram selecionados os quatro cenários urbanos numa disposição 3 x 4 quadras nos quais serão implantados, em seu centro, os quatro edifícios modelo para verificação dos impactos do adensamento através da verticalização sobre as condições ambientais internas. A sua escolha deveu-se à representatividade em relação à morfologia urbana, desde uma área com baixa verticalização (cenários 1 e 4) até trechos urbanos predominantemente ocupados por edifícios altos (cenário 2) e uma condição intermediária entre altura e taxa de ocupação (cenário 3).

4. Materiais e método

O desempenho térmico, as condições de conforto e o consumo de energia em edifícios são, em grande parte, determinados pelos processos de troca que ocorrem entre a sua envoltória e o entorno imediato. Na maioria dos casos, esse meio externo é representado pelo contexto urbano, com suas formas, dimensões, materiais e tipologias, responsáveis diretos pelas características físicas, térmicas e aerodinâmicas que definirão a qualidade ambiental no interior das edificações.

Programas de simulação do desempenho térmico permitem modelar de forma detalhada a geometria da edificação, incorporar as características termofísicas dos materiais construtivos, definir as rotinas de ocupação, tipos de equipamentos e os sistemas para resfriamento e aquecimento utilizados. No caso da utilização da ventilação natural como estratégia, podem ser determinadas as taxas de infiltração e a vazão de ar ou adotadas informações genéricas que irão atuar sobre modelos de cálculo da ventilação embutidos nestas ferramentas computacionais.

Comumente, no entanto, esses programas adotam condições de contorno que resultam do tratamento estatístico de séries de informações climáticas obtidas em estações meteorológicas afastadas da área de estudo, sob condições bastante diferentes. Tais dados não são readequados em sua interação com o edifício, o que muitas vezes tornam imprecisas as variáveis

climáticas que atuam sobre este por desconsiderar o efeito do entorno. No caso do vento, a presença de obstáculos vizinhos altera a direção predominante dos fluxos e a intensidade com que atingem as fachadas. Em relação à radiação solar incidente, a obstrução provocada pelo entorno modifica as parcelas de energia que atingem as superfícies do edifício, o que pode ser positivo em alguns casos, uma vez que estas são responsáveis diretas pela temperatura interna, incitando a investigação desta variável em paralelo às análises da ventilação natural.

Em relação a este aspecto, Guimarães & Carlo (2012) discutiram alguns dos problemas envolvendo os critérios de modelagem e simulação do desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas. Considerando a realidade climática do território brasileiro, que em grande parte permite obter conforto térmico a partir de vias passivas, o artigo destaca as limitações do programa *EnergyPlus* em relação à entrada de dados, mais especificamente os parâmetros de ventilação natural. Os autores concordam quanto à forma simplificada como este e outros programas de simulação térmica incorporam as informações de pressão devido ao vento, aspectos já evidenciados Cóstola; Blocken; Hensen (2009) e mencionados por Oropeza-Perez; Østergaard; Remmen (2012). Modelos de ventilação embutidos em programas de desempenho térmico podem ser aplicados para calcular a vazão de ar que atravessa os edifícios. Entretanto, estes não apresentam resultados satisfatórios para descrever o comportamento dos fluxos no exterior e interior de edifícios mesmo se comparados a simulações CFD com malhas grosseiras e em condições isotérmicas (ZHANG et al, 2013).

Por outro lado, a análise de trocas térmicas em ambiente CFD torna necessária uma elevada capacidade de processamento em comparação aos modelos de balanço térmico, sobretudo considerando a geometria mais complexa de edificações maiores. Além deste aspecto, a imposição correta dos coeficientes de transmissão de calor e das propriedades físicas a serem computadas e o seu cálculo em regime transiente nem sempre é possível em termos de tempo, conhecimento envolvido e qualidade das informações disponíveis.

Nesse sentido, a integração entre programas CFD e de desempenho térmico representa uma alternativa viável para avançar na avaliação mais precisa dos efeitos da ventilação natural sobre as condições de conforto térmico em edifícios, como indicam Carrilho da Graça et al (2002); Bastide et al (2006); Hirano et al (2006); Wang & Wong (2009); Carrilho da Graça et al (2012); Zhang et al (2013); Liu et al (2014).

A presente investigação utiliza o potencial específico dessas duas ferramentas computacionais em diferentes escalas de abordagem. Através de etapas sucessivas e complementares, compreende-se que cada fase pode fornecer condições de contorno mais precisas para o estágio seguinte, contribuindo para otimizar os processos e as análises envolvidas.

O método aqui empreendido utiliza a qualidade do modelo CFD para descrever detalhadamente o comportamento dos fluxos desde o ambiente exterior do edifício até seus reflexos na ventilação natural interna. Os resultados são aplicados ao programa de desempenho térmico e na avaliação das condições de conforto térmico dos ocupantes.

Metodologicamente, após o levantamento do estado da arte, a pesquisa foi espacialmente contextualizada, definindo-se as características climáticas a serem consideradas, as configurações dos modelos arquitetônico e de ocupações do solo. Em seguida, o edifício modelo escolhido foi implantado em quatro diferentes configurações espaciais urbanas

encontradas na cidade de Fortaleza. Estas representam diferentes níveis de adensamento construtivo através da verticalização e foram selecionadas em virtude da sua representatividade em relação à morfologia urbana.

Numa primeira etapa de análise, cada cenário urbano representativo é submetido a simulações CFD para as duas direções de vento predominantes determinadas na fase de diagnóstico climático (90° e 135°). Em seguida, os dados de pressão incidente sobre as aberturas de apartamentos situados no primeiro, décimo primeiro e vigésimo terceiro pavimentos são inseridos na fase seguinte como condição inicial para prever as taxas de renovação do ar e a velocidade do ar no interior dos ambientes.

Posteriormente, os dados de vazão de ar nos apartamentos foram inseridos nas simulações anuais de desempenho térmico dos apartamentos escolhidos. Os dados de temperatura operativa na suíte, no dormitório e na sala são comparados a um índice adaptativo e aos limites definidos como zona de conforto. Os resultados são analisados em termos da quantidade de horas em conforto térmico, além de outras variáveis específicas. Finalmente, a velocidade do ar é incorporada à análise dos resultados devido ao potencial para resfriamento fisiológico dos ocupantes, capaz de estender os limites aceitáveis na temperatura operativa.

Como forma de ilustrar a sequência metodológica empreendida nesta pesquisa, a figura 59 resume cada etapa de simulação, suas escalas de abordagem e os produtos obtidos em cada fase.

Figura 59 – Esquema das simulações em etapas sequenciais que compõe a metodologia

³⁶ STRAATEN, V. **Thermal performance of buildings**. Elsevier: Amsterdam, 1967 apud Carrilho da Graça et al (2002).

³⁷ AYNLEY, R. M. **A resistance approach to estimating airflow through buildings with large openings due to wind**. ASHRAE Transactions 94: 1661 – 1668, 1988 apud Bittencourt & Cândido (2005).

³⁸ VICKERY, B. J.; KARAKATSANIS, C. **External wind pressure distributions and induced internal ventilation flow in low-rise industrial and domestic structures**. ASHRAE Transactions 93 (2): 2198 – 2213, 1987 apud Seifert et al (2006).

É necessário ressaltar, porém, que a aplicação da metodologia assumida somente é possível a partir de algumas condições. Primeiramente, ação do vento deve dominar o processo de ventilação natural, desprezando-se os efeitos de movimento do ar pelo efeito chaminé. Tal aspecto é comum às edificações situadas no contexto tropical quente e úmido.

Adicionalmente, tomando parte das investigações realizadas por Straaten (1967)³⁶, Carrilho da Graça et al (2002) explicam que a separação da simulação de fluxos internos das análises de ventilação natural na escala urbana somente é possível se a área total de aberturas for menor do que 20% da área de fachada, sob pena de produzir resultados imprecisos. Bittencourt & Cândido (2005) concordam que valores de C_p obtidos com base em ensaios em túnel de vento utilizando modelos selados são confiáveis apenas para edifícios com porosidade até 20%. Tais considerações decorrem do fato de que os fluxos que atravessam edificações altamente porosas tendem a reduzir as pressões nas suas fachadas, diminuindo, consequentemente, os coeficientes de pressão e induzindo a erros no cálculo de fluxos com base nesse parâmetro. Para Aynley (1988)³⁷ a utilização de modelos fechados para determinar valores de C_p sobre o envelope do edifício é possível apenas para casos com taxas de ventilação reduzidas e formas comuns de edifícios com paredes de porosidade inferiores a 25%.

Seifert et al (2006) também alertaram sobre a existência de um valor crítico para a porosidade das fachadas de edifícios, com reflexos sobre a previsão de C_p sobre as superfícies do modelo e a vazão de ar que atravessa os ambientes. Contudo, este valor não seria uma constante, mas altamente dependente do ângulo de incidência do vento. Vickery & Karakatsanis (1987)³⁸ estudaram a relação de fluxos internos e externos às edificações utilizando túnel de vento. Os autores concluíram que se o vento não é fortemente inclinado em relação às fachadas e para porosidades menores do que 23%, as taxas de ventilação interna podem ser calculadas com um erro até 10% em relação aos valores verificados em modelos selados. Contudo, o erro é ampliado à medida que tanto a porosidade do envelope como o ângulo de incidência do vento aumentam.

Nesta pesquisa, as simulações CFD para determinação da pressão incidente sobre as fachadas consideram o edifício adotado como selado devido à sua baixa porosidade. Dotado de janelas de correr, em que somente a metade da área de abertura permite a passagem do fluxo, a porosidade do edifício adotado cai para 11,12%, permitindo considerá-lo como tal.

Além da metodologia aplicada à tese, neste capítulo são apresentados os programas computacionais utilizados, que constituem as ferramentas de avaliação dos parâmetros envolvidos na pesquisa. Os programas são descritos a partir das diversas etapas que envolvem tanto as simulações CFD como de desempenho térmico. São apresentadas, ainda, algumas das medidas adotadas visando à qualidade dos resultados. Os procedimentos adotados e, em parte discutidos neste capítulo, são baseados em referencial consultado ou nos termos da norma vigente.

As atuais técnicas de simulação computacional permitem representar diferentes fenômenos físicos em sua atuação sobre estruturas, sistemas ou componentes construtivos em diversas escalas através da sua substituição por idealizações numéricas ou analíticas.

Os primeiros programas computacionais para simulação de edificações foram desenvolvidos ainda na década de 1970. A partir de 1990,

com a popularização dos computadores pessoais, empresas e grupos de pesquisa passaram a participar do desenvolvimento de interfaces para essas ferramentas. O aumento na capacidade computacional permitiu o desenvolvimento de programas cada vez mais modernos e complexos, tais como o *EnergyPlus*, o FLUENT, o CFX e o PHOENICS. O primeiro destes adota os principais recursos do DOE-2 e do BLAST, enquanto os outros utilizam o conceito de Dinâmica dos Fluidos Computacional para representar detalhadamente o fluxo de calor e o comportamento do ar no interior e exterior de edificações. Entretanto, devido ao fato de tratarem de fenômenos físicos complexos, estas ferramentas computacionais têm seu emprego restrito a centros de pesquisas de universidades e institutos, com pouca transferência de tecnologia para o setor de projetos, ou seja, os escritórios de engenharia e arquitetura (MENDES et al, 2005).

No caso do Brasil, a crise do petróleo, ocorrida antes de 1990, despertou o interesse de grupos de pesquisa situados em universidades e centros especializados, que começaram a concentrar esforços para a melhoria da eficiência energética de edificações, utilizando a ainda recente simulação computacional (MENDES et al, 2005).

Em relação à precisão das simulações computacionais, Grimmond (2005) adverte que, em paralelo ao desenvolvimento de programas e mesmo com o aumento na capacidade computacional, intensificam-se as discussões sobre as diferenças entre modelagem e cálculos computacionais e observações de campo nos estudos relacionados à climatologia urbana e planejamento urbano, uma vez que a complexidade do mundo real contrasta bastante com a necessária simplificação da realidade que ocorre em modelos numéricos.

Martins et al (2009) explicam que, por definição, toda simulação computacional representa uma simplificação da realidade em seus níveis de complexidade. No entanto, as ferramentas computacionais representam mecanismos fundamentais na avaliação de um projeto ou mesmo uma edificação existente, permitindo contornar obstáculos e questões consideradas quanto à interferência do usuário num monitoramento.

No caso dos programas de simulação do desempenho termoenergético de edificações, é possível prever a energia que um prédio consumirá antes que venha a ser construído em função das cargas térmicas internas, das rotinas de ocupação e características dos materiais, entre outros aspectos. Estes resultados podem, ainda, ser empregados como guia no processo de planejamento do bairro, permitindo projetar edificações mais eficientes em relação ao consumo de energia (CHALIFOUX, 2013).

Mendes et al (2005) explicam que através de programas de simulação pode-se prever, de forma rápida e dinâmica, o desempenho térmico e energético de edifícios segundo diferentes alternativas projetuais, opções de desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação ou condicionamento de ar, permitindo, ainda, avaliar o impacto ambiental de uma proposta.

4.1. A simulação das condições de ventilação natural

Atualmente o mercado dispõe de diversos códigos CFD. A utilização do ANSYS CFX em sua versão 14.0 deve-se à disponibilidade da licença

³⁹ *Computer Aided Design* ou desenho auxiliado por computador.

educacional permanente de um assento no Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) a partir de abril de 2012.

Paralelamente, as experiências acumuladas na utilização deste aplicativo nos trabalhos de doutoramento de Prata (2006) e Brandão (2009), dissertações de Cóstola (2006), Leite (2008) e Leite (2010), além de uma série de três cursos e *workshops* também contribuíram para sua escolha.

4.1.1. Programa ANSYS – CFX

O ANSYS CFX é um pacote de simulação CFD que permite analisar quaisquer situações envolvendo a dinâmica de fluidos.

No programa estão embutidas as equações fundamentais de conservação de massa (equação da continuidade), conservação de momento (equações Navier-Stokes), conservação de energia, para o caso de simulações que envolvam análises térmicas, dispersão de fumaça e poluentes (equação de conservação escalar) e equações para turbulência. O aplicativo permite, também, que o usuário insira equações específicas para diversas variáveis, sendo necessário, no entanto, um maior conhecimento do fenômeno para gerar um nível de detalhamento adequado (MARCONDES; UMAKOSHI, 2007).

A simulação desenvolve-se em cinco módulos sequenciais, partindo da modelagem da geometria, seguido pela geração de malha, a determinação das condições iniciais e de contorno, o cálculo propriamente dito e a visualização dos resultados.

As cinco etapas podem ser organizadas na plataforma *Workbench*. De acordo com a licença disponível é possível inserir diferentes módulos (sistemas de componentes) para preparação da geometria e mesmo diferentes geradores de malha e integrá-los às fases de determinação das condições de contorno, cálculo da simulação e visualização dos resultados. A interface permite realizar modificações em diferentes fases de forma simples, atualizando automaticamente as etapas posteriores, o que contribui significativamente para a agilidade dos testes paramétricos e de verificação da independência da malha.

4.1.1.1. Geometria do modelo e definição do domínio

O primeiro passo corresponde à preparação da geometria que compõe o modelo e a confecção de um domínio para que, posteriormente, este possa ser importado nos módulos que integram a sequência de preparação, cálculo e visualização dos resultados.

A preparação do modelo pode ser feita em qualquer ambiente do tipo CAD³⁹. O próprio ANSYS CFX dispõe de ferramenta de desenho para preparação da geometria. Nessa modelagem é necessário que todos os elementos a serem simulados, ou seja, tanto os objetos de interesse (obstáculos) quanto o entorno (fronteiras), estejam contidos em um mesmo volume estanque que passará a representar o domínio fluido.

O domínio utilizado para simular o escoamento do ar pode assumir diversas formas geométricas, comumente adotando-se configurações retangulares, octogonais ou circulares em virtude das direções do vento a serem analisadas. A opção por um domínio retangular pode ser feita quando se quer simular apenas uma direção de vento incidente. A confecção de um domínio deste tipo apresenta como principal vantagem a geração de malhas

com menor número de elementos, uma vez que as dimensões do domínio são reduzidas em comparação ao formato octogonal ou circular, onde todas as direções tomam como medida àquelas indicadas para a região a sotavento.

Na etapa de preparação do domínio é necessário definir suas dimensões de maneira que os limites fixados não influenciem os resultados da simulação. Assim, devem ser adotadas recomendações para que a área de obstrução em relação à seção do domínio não ultrapasse determinados limites. COST (2004) aconselha 3% como um limite para a relação entre a área de obstrução dos elementos e as dimensões do domínio.

Tomando como base o referencial consultado (COST, 2004; PRATA, 2005; CÔSTOLA, 2006; BRANDÃO, 2010; LEITE, 2010) aliado à experiência acumulada na utilização do programa é possível adotar como padrões mínimos para confecção do domínio cinco vezes a altura do maior elemento presente no conjunto até os limites a barlavento, laterais e topo e pelo menos quinze vezes para definir o limite da região a sotavento.

Mesmo considerando apenas duas direções de vento para as simulações de ventilação urbana, optou-se por um domínio em formato octogonal, como demonstra a figura 60. A medida visa evitar o efeito de blocagem ou maior proximidade das fronteiras do domínio em relação aos obstáculos. Ainda, o desenvolvimento desta pesquisa ou investigações futuras podem se valer da simulação de outras direções de vento, sendo possível modificar a direção do fluxo através da indicação do ângulo no conjunto de equações que compõem o arquivo ccl (*CFX Command Language*).

Figura 60 – Domínio octogonal para simulação da ventilação urbana

No caso das simulações de ventilação na escala urbana, o modelo confeccionado é composto pelas edificações inseridas nos cenários analisados, sendo fundamental que sua geometria seja simplificada. A medida diminui consideravelmente o tempo de processamento e a capacidade computacional necessária para os cálculos (PRATA, 2005; LEITE, 2008). Assim, arestas e faces curvas de pequena dimensão podem ser desconsideradas, bem como distâncias entre as edificações menores do que 5 m, unificando-as em blocos para extrusão.

Na etapa de modelagem do entorno foi adotada uma altura de 3 m para os edifícios. Contudo, devido à presença de telhados, as construções de um pavimento foram modeladas com 4,5 m de altura, as de dois pavimentos com 7,5 m e assim seguiu-se nos casos em que foi necessário considerar a presença deste ou de outros elementos construtivos.

O conjunto urbano simulado possui mais quadras a barlavento do que a sotavento. Tal aspecto deve-se ao fato de que, para as equações do escoamento de fluidos, o efeito dos obstáculos situados a montante é muito mais significativo do que o inverso. Tendo em vista os parâmetros analisados nesta pesquisa, mais especificamente a pressão devido ao vento que incide sobre as fachadas de edifícios, adicionou-se uma linha de três quadras anterior àquelas que se situam no entorno imediato dos edifícios modelo para captar os diversos efeitos que sofrem os fluxos ao encontrar obstáculos tal como ocorre em meio urbano, como demonstrado na figura 61.

Figura 61 – Configuração dos cenários urbanos para apreender os efeitos aerodinâmicos provocados pelas quadras a montante sobre os edifícios modelo

No caso das simulações dos fluxos internos, o domínio é representado pelo próprio apartamento (figura 62). Suas janelas representam fronteiras de entrada e saída do ar, sendo os dados das simulações fornecidos pelas análises de ventilação urbana. Todas as portas internas foram modeladas como vãos livres enquanto a porta externa permaneceu fechada.

Figura 62 – Domínio para simulação da ventilação natural interna

4.1.1.2. Geração de malha

A malha, em duas ou três dimensões, é utilizada em simulações CFD para representar os obstáculos contidos no domínio e as áreas adjacentes. Durante sua geração o domínio é dividido em partes menores, constituindo os volumes discretizados que contém os pontos solucionáveis através das equações fundamentais.

O módulo *meshing* é a mais recente ferramenta desenvolvida pela ANSYS para geração de malhas, sendo incorporado à interface do *Workbench*. Neste programa, foram incorporados diversos recursos que antes pertenciam a outros aplicativos, tais como o ICEM CFD, TGrid, CFX-Mesh e o Gambit, integrando-os para diferentes tipos de análises (estrutural, mecânica, fluidodinâmica) e produzindo malhas de forma automatizada a partir de alguns parâmetros simplificados.

Para as simulações do comportamento da ventilação natural em meio urbano foram geradas malhas compostas por elementos tetraédricos em formação desestruturada. A opção por este tipo de malha deve-se à agilidade na sua confecção, uma vez que o programa produz automaticamente as características dos elementos, adequando-os mais facilmente às geometrias mais complexas e refinando-os nas regiões próximas aos obstáculos, como demonstra a figura 63. Tal aspecto é fundamental considerando-se a complexidade das formas das edificações dos cenários urbanos avaliados.

Figura 63 – Aspecto geral da malha composta por tetraedros para simulação da ventilação urbana

Diversas investigações do comportamento da ventilação natural na escala urbana se valeram de malhas desestruturadas para as simulações em CFD (PRATA, 2005; CHANG, 2006; CÓSTOLA, 2006; BRANDÃO, 2009; ASFOUR, 2010; LEITE, 2008; LEITE, 2010; LIU et al 2014).

Sobre o piso do domínio, os edifícios modelo e as edificações que compõem o entorno foram adicionadas camadas de elementos prismáticos às malhas tetraédricas, como é possível perceber na figura 64. O objetivo é apreender adequadamente os efeitos de desprendimento da camada limite no contato com os obstáculos inseridos no domínio.

Figura 64 – Detalhe em corte da camada de prismas sobre os edifícios onde se deseja avaliar mais precisamente os fenômenos de desprendimento da camada limite.

A tabela 5, confeccionada com base em dados fornecidos pelo CFX, detalha a quantidade de tetraedros, prismas, pirâmides e o total de elementos que compõem as malhas geradas para cada um dos cenários. Destaca-se a elevação na quantidade de elementos devido à maior complexidade dos casos analisados. Formas urbanas mais verticais, como nos cenários 2 e 3, geram maiores quantidades de elementos, ao passo que morfologias mais horizontais e com taxas de ocupação do solo mais elevadas apresentam menores quantidades de elementos, como nos cenários 1 e 4.

ELEMENTO	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 4
Tetraedros	4.392.343	8.902.979	5.811.950	2.591.744
Prismas	1.743.294	3.624.178	2.287.747	1.442.764
Pirâmides	3.676	9.386	739	9.530
Total de elementos	6.139.313	12.536.543	8.100.436	5.012.518

Tabela 5 – Quantidade de elementos que compõem as malhas de cada cenário para as simulações de ventilação urbana.

Já no caso do apartamento, a ortogonalidade do modelo torna possível gerar malhas estruturadas para as simulações dos fluxos no ambiente interno. A vantagem na utilização de malhas formadas por elementos hexaédricos em detrimento dos tetraedros é a menor difusividade e regularidade determinada aos fluxos, com possibilidades de redução no tempo de processamento e o melhor fechamento das simulações.

Figura 65 – Aspecto da malha composta por tetraedros (esquerda) e por hexaédros (direita)

De fato, nos primeiros testes de adequação da malha e verificação da independência desta, realizados sob as mesmas condições iniciais e de contorno para as duas opções, o tempo para fechamento das simulações foi significativamente menor no modelo estruturado. Porém, à medida que se alteravam parâmetros da malha visando o seu refinamento a situação se inverteu, chegando a mais de quatro horas de cálculo para a malha estruturada sem, contudo, atingir o nível de resíduos almejado, como demonstra o gráfico (figura 66).

Figura 66 – Comparação dos tempos de simulação da ventilação natural interna utilizando malhas compostas por tetraedros e hexaedros

Há que se considerar, ainda, que o necessário refinamento da malha, responsável pelo aumento no tempo para fechamento, teve efeitos melhores no modelo desestruturado, uma vez que na malha formada por tetraedros a relação entre a quantidade de elementos e a qualidade da malha alcançou melhores resultados do que na malha hexaédrica. Com a redução na dimensão dos elementos, os resultados não eram tão significativos para o último modelo, sobretudo em relação ao valor de *yplus*, elemento fundamental para capturar corretamente o fenômeno de desprendimento da camada limite e um dos principais indicativos da qualidade da malha.

Portanto, adotou-se uma única malha desestruturada composta por 1.526.494 elementos divididos entre 1.093.478 tetraedros e 431.518 prismas distribuídos em cinco camadas sobre as paredes do modelo para simular os fluxos internos. Outras pesquisas recentes utilizaram malhas tetraédricas desestruturadas para simular o fluxo de ar no interior de edificações (STAMOU; KATSIRIS, 2006; ZUKOWSKI, 2007; SEIFERT et al, 2006; CHEUNG; LIU, 2011; CHAFI; HALLE, 2011; LIU et al, 2014).

A escolha deste tipo de malha deu-se, fundamentalmente, em função do desempenho considerando os parâmetros de qualidade adotados e que são discutidos no item a seguir. Ressalta-se que as duas malhas, após o refinamento, apresentaram valores de *yplus* bastante diferentes, sendo melhor para a situação desestruturada, uma vez que a malha composta por hexaédros alcançou o valor fora do intervalo considerado adequado em literatura.

Muito embora a diferença em termos de *yplus* e a quantidade total de elementos seja significativa, analisando os resultados das variáveis abordadas nesta parte da pesquisa (velocidade do ar e a vazão de ar), é possível perceber

que seus valores situam-se bastante próximos, como verifica-se na figura 67. Paralelamente, tal aspecto corrobora a qualidade dos resultados atingidos.

Figura 67 – Comparação dos resultados de vazão de ar e velocidade do ar obtidos com malhas compostas por tetraedros e hexaedros

4.1.1.3. Verificação da qualidade da malha

Apesar de parâmetros como a forma dos elementos que compõem a malha e sua dimensão mais adequada serem fundamentais à precisão dos resultados de simulações CFD, em geral, há pouca literatura disponível sobre a qualidade de malhas e os níveis recomendados ou mesmo aceitáveis de acordo com os fenômenos a serem analisados. Excetuando-se a discussão apresentada em Zhang et al (2010), maior aprofundamento na questão é obtido recorrendo-se aos fóruns virtuais e, principalmente, em tutoriais e cursos na área.

Em relação à qualidade geral da malha, a documentação do CFX recomenda qualidade ortogonal acima de 0,1 e assimetria (*Skewness*) não superior a 0,95 (CFX, 2003). Além destes parâmetros, outros aspectos da malha podem ser verificados durante o cálculo da simulação através do diagnóstico realizado pelo próprio programa sobre as características de malha adotadas.

Como forma de atingir resultados adequados em função do modelo de turbulência adotado, o valor de *yplus* foi planejado de acordo com os valores indicados em literatura. A seguir, são discutidos os procedimentos envolvidos para alcançar tais níveis, passando pelos necessários testes para verificar a independência da malha.

4.1.1.3.1. Valor de *yplus*

De acordo com Cóstola (2006), é fundamental que uma simulação através da técnica CFD represente os fenômenos que ocorrem na camada limite. Assim, deve-se prever a presença de elementos da malha junto aos limites dos obstáculos compatível com o fluido e o gradiente de velocidades da simulação para descrever precisamente tais fenômenos.

O valor de *yplus* é um parâmetro adimensional que serve para medir a distância da primeira camada de prismas até a parede do obstáculo, sendo utilizado para descrever as relações 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.

O valor adequado de *yplus* é determinado a partir de alguns fatores, como número de Reynolds, fricção superficial, tensão de cisalhamento na parede e a velocidade de atrito. É possível prever o valor de *yplus* que será atingido a partir da determinação da altura ou distância do primeiro ponto da malha até a parede do obstáculo, como descreve a equação 31.

$$y^+ = \frac{\rho \cdot \Delta y \cdot U_\tau}{\mu} \quad (\text{Equação 31})$$

Onde:

ρ – densidade do ar (kg/m³)

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

U_τ - velocidade de atrito (m/s)

μ – viscosidade dinâmica (kg/m.s)

Embora o valor de *yplus* constitua um importante parâmetro de análise da qualidade da simulação, Cóstola (2006) acrescenta que este é um dado de saída, não podendo ser fixado a priori, pois é calculado com base no U_τ , uma incógnita na simulação. Utilizou-se, portanto, outra fórmula⁴⁰ (equação 32) capaz de indicar o valor de *yplus* a partir da indicação do valor almejado. Assim, em função do modelo de turbulência que será adotado, é possível prever o seu valor ao final da simulação com base na altura da primeira camada de prismas.

$$\Delta y = \sqrt{74} \times y^+ \times L \times Re^{-13/14} \quad (\text{Equação 32})$$

Onde:

y^+ - Admite-se um valor para o cálculo dentro de um intervalo característico do modelo de turbulência a ser utilizado.

L – Dimensão do maior elemento presente no domínio

Re – o número de Reynolds gerado com base nas características da simulação.

Vasta discussão sobre o valor adequado de *yplus* pode ser encontrada em literatura específica. Cóstola & Alucci (2011) ressaltam que diferentes limites para o valor de *yplus* são indicados, o que demonstra a falta de consenso em relação a medidas exatas para simulações. Com a utilização do modelo de turbulência $K - \epsilon$ padrão, adotado nas análises realizadas nesta pesquisa, a documentação do programa recomenda que o valor de y^+ esteja entre 20 e 100 (CFX; 2003). COST (2004) situa os valores próximos deste

⁴⁰ A fórmula é usualmente aplicada durante a fase de preparação e checagem da qualidade de malhas das simulações realizadas pela equipe técnica da ESSS de São Paulo e foi apresentada durante um dos cursos realizados.

intervalo, aconselhando entre 30 e 100, níveis que são compatíveis com os valores comumente discutidos em fóruns, situados entre 30 e 300. Já para Blocken; Stathopoulos; Carmeliet (2007), valores entre 30 e 1.000 são admissíveis. Assim, resumem Cóstola & Alucci (2011), níveis muito baixos (menores que 20) ou muito altos (superiores a 1.000) nunca são recomendados.

Não obstante, concorda-se com Cóstola & Alucci (2011) quanto ao excesso de rigor das recomendações presentes em COST (2004) e na própria documentação do programa em relação ao valor de y_{plus} . Os valores indicados por Blocken; Stathopoulos; Carmeliet (2007), observam os autores, são mais adequados e podem ser explicados pelo gráfico a seguir (figura 68).

Figura 68 – Valores de referência para o y_{plus} de acordo com a sua posição em relação à parede

Fonte: Blocken; Stathopoulos; Carmeliet (2007).

Em todas as simulações, a altura das sucessivas camadas de prismas foi dimensionada de acordo com as características discutidas anteriormente e tendo em vista a adoção do modelo $K - \epsilon$ padrão. Mesmo que não haja um consenso em relação à questão do intervalo aceitável para o valor de y_{plus} , deve-se considerar que o parâmetro constitui parte importante na verificação da qualidade das simulações

Nas simulações do fluxo de ar no interior do apartamento não houve dificuldades em estabelecer valores de y_{plus} próximos do recomendado, situando-os abaixo de 120 em todos os casos, como demonstra a figura 69.

Contudo, um valor dentro do intervalo indicado não foi atingido na maior parte das análises na escala urbana. Em contrapartida à facilidade para obter níveis dentro do almejado nas análises do apartamento, os valores permaneceram bem mais elevados, como também demonstra a figura 69. Em grande parte das superfícies dos edifícios modelo foram atingidos valores em torno de 1.000, com algumas regiões menores onde o valor superou os 3.000.

Figura 69 – Comparação entre os valores de *yplus* obtidos para a simulação de fluxos internos (a) e na ventilação urbana (b)

Não obstante, apesar da dificuldade em alcançar valores de *yplus* de acordo com o que recomenda a literatura, é importante destacar que a determinação da pressão incidente sobre as fachadas dos edifícios não sofre variações significativas em função deste parâmetro, como discutido em Leite & Frota (2013). O gráfico a seguir (figura 70) apresenta os resultados de *Cp* obtidos em cinco testes de refinamento da malha. Mesmo a redução em torno de 670% no valor de *yplus* não produz alterações significativas (da ordem de 3% a 6%), nos dados de *Cp* em seis pontos diferentes sobre as fachadas do edifício modelo.

Figura 70 – Valores de pressão em seis pontos de interesse nas fachadas do edifício modelo e o valor de *yplus*

Fonte: LEITE; FROTA (2013).

Em síntese, concorda-se com Cóstola & Alucci (2011) ao sugerirem que, nas simulações para determinação da pressão incidente sobre as fachadas de edifícios, a independência da malha, a imposição correta de condições iniciais e de contorno e a obtenção de um nível de resíduos considerado satisfatório podem ser priorizadas em relação a outras características, como o próprio valor de *yplus*.

4.1.1.3.2. Testes de independência da malha

Em simulações computacionais, a densidade da malha utilizada não deve interferir nos resultados (COST, 2004). Nesse sentido, o teste de independência da malha tem como objetivo atribuir malhas adequadas às simulações sem que isso signifique uma quantidade de elementos em demasia, que por sua vez implica em maiores tempos de cálculo. A invariabilidade dos resultados mesmo diante do aumento no número de elementos da malha indica a sua independência.

Verificada a independência e a qualidade da malha, é possível utilizá-la em outras simulações variando apenas as condições iniciais e de contorno. Utiliza-se como exemplo o caso das simulações de ventilação natural interna. Como demonstra a figura 71, após a série de testes para verificação de sua independência, aplicou-se uma mesma malha às diversas outras simulações computacionais.

Figura 71 – Sistematização das etapas para geração de malha, verificação da sua independência e utilização em diferentes análises de ventilação no apartamento modelo

Os testes de independência de malha, tanto nas análises na escala urbana como no apartamento, tiveram início com a adoção de uma malha considerada simples ou grosseira, sendo refinada à medida que o máximo de iterações permitido era atingido ou o nível de resíduos desejado alcançado, o que ocorresse primeiro. Como é possível observar no caso das simulações de fluxos internos, apresentado na figura 72, a partir da terceira rodada de cálculos, não há variação significativa dos resultados (abaixo de 10%). Mesmo com o aumento de 31% na quantidade total de elementos da malha, que ocorre na quarta simulação, os valores não se alteram, indicando sua independência. Reajusta-se esta malha, retornando às características utilizadas na simulação 3, com menor densidade e, portanto, menos capacidade de processamento computacional requerida, para utilizá-la em todas as análises.

Figura 72 – Refinamento sucessivo na malha e sua influência na quantidade total de elementos e valores obtidos nas simulações

Ainda utilizando como exemplo as simulações de ventilação interna, nota-se na figura 73 que, após as primeiras iterações, pobres em termos de qualidade e precisão dos resultados e onde oscilam os valores obtidos inicialmente, a tendência é a estabilização das variáveis. Em regime estacionário, além da verificação da convergência em níveis considerados satisfatórios, a não oscilação dos parâmetros físicos envolvidos na simulação corrobora a precisão dos resultados. Tendo em vista a necessidade de determinar os valores dos parâmetros de interesse da pesquisa (velocidade do ar no interior dos ambientes e a vazão total que atravessa o apartamento), acompanhou-se o seu comportamento durante o cálculo da série de seis simulações, sendo fundamental a sua estabilização em todos os casos.

Figura 73 – Estabilização das variáveis vazão de ar (esquerda) e velocidade do ar (direita) durante a verificação da independência da malha para simular o comportamento dos fluxos no apartamento.

O CFX – Pre é a fase de preparação para que a simulação seja processada. Nesta etapa são introduzidos os parâmetros iniciais, definidos o modelo de turbulência, as propriedades dos materiais e as condições de contorno.

As simulações CFD foram consideradas em condição estacionária, isotérmica, incompressível e turbulenta. A pressão adotada como referência no interior do domínio fluido é de 1 atm e a temperatura é de 25 °C. As unidades de dimensão, tempo e velocidade são metro, segundos e metros por segundo, respectivamente.

Nas análises da ventilação natural urbana, determinou-se a condição de não escorregamento aos edifícios e ao piso do modelo enquanto que o topo foi considerado livre de atrito. Blocken; Stathopoulos; Carmeliet (2007) destacam que em simulações fluidodinâmicas, normalmente a parte anterior do domínio e o terreno situado antes do plano de entrada são considerados de mesma rugosidade, o que indica que não é a intenção simular o desenvolvimento de uma camada limite iniciando-se no plano de entrada. Todas as laterais do domínio foram configuradas como aberturas. A estas foi atribuída uma velocidade nas componentes cartesianas x, y e z através de equações. Considerou-se a velocidade média para as direções leste e sudeste, fixadas pelo diagnóstico de vento, como a velocidade de referência.

Nas simulações da ventilação natural no interior do apartamento, a todas as fronteiras sólidas (paredes, piso e topo) foi determinada a condição de não escorregamento.

Equações específicas foram inseridas no arquivo ccl para descrever alguns dos parâmetros envolvidos nas simulações de ventilação urbana. O comportamento logarítmico do perfil vertical de velocidade do ar é descrito pela equação 6 (BRE, 1978), apresentada no item 2.2.3.2. Outra expressão foi escrita para calcular o coeficiente de pressão nas superfícies dos edifícios e no centro das janelas do apartamento modelo nos pavimentos escolhidos. A equação 33 divide a pressão (*pressure*) em um ponto qualquer na fachada pela metade do produto da densidade (*density*) pela média (*ave*) da velocidade do ar (*velocity*) na entrada do domínio (*opening*), posteriormente substituído pelo ponto de referência.

$$(Pressure)/(0.5*Density*(ave(Velocity))@opening \quad \text{(Equação 33)}$$

O ponto de referência adotado, por sua vez, está localizado no mesmo nível da cobertura (72 m) e antes da perturbação do fluxo pelos obstáculos, situando-o na parte anterior do domínio, na metade da distância entre a entrada de ar e os primeiros edifícios.

A intensidade de turbulência na entrada do fluxo de ar é considerada média (5%). Esta é a opção padrão apresentada pelo ANSYS-CFX e utilizada tanto nas simulações na escala urbana como no interior do apartamento.

4.1.1.4. Adoção de um modelo de turbulência

Os códigos de dinâmica dos fluidos computadorizada adotam modelos para tentar descrever o fenômeno caótico, randômico ou aleatório que caracteriza a turbulência. Awbi (1991) descreve que a tarefa do modelo de turbulência é incorporar uma série de equações auxiliares diferenciais e/ou algébricas para expressar as características de um fluxo turbulento e que, paralelamente, permitam o fechamento das equações de transporte.

Cóstola & Alucci (2011) comentam que programas CFD possuem diversas opções para modelagem da turbulência. No entanto, acrescentam os autores, pouca ou nenhuma informação é fornecida sobre as vantagens e desvantagens entre cada opção disponível. No entanto, Cóstola (2006) adverte que o uso de modelos mais sofisticados e cuja qualidade é reconhecida na literatura, como o "*Detached eddy simulation*" (DES) ou "*Large eddy simulation*" (LES) ainda não é uma realidade para a determinação de C_p em situações corriqueiras devido às altas capacidades de processamento e armazenamento necessárias.

Ao contrário da escassa discussão acerca da qualidade da malha, a discussão sobre a precisão e o desempenho dos diversos modelos de turbulência existentes é recorrente em publicações na área. Em Zhang et al (2007), por exemplo, modelos de turbulência disponíveis no mercado (RNG $k-\epsilon$, *low Reynolds number* $k-\epsilon$, SST $k-\omega$, *Large Eddy Simulation*, entre outros) foram avaliados em relação à convecção natural e forçada e com gradiente de temperatura entre outras situações, comparando seu desempenho aos valores presentes em literatura.

No módulo CFX-Pre alguns modelos de turbulência estão disponíveis para escolha do usuário. Quatro destes foram testados para avaliar os

resultados em relação ao cálculo dos coeficientes de pressão. Antes da escolha de um em detrimento dos demais, considerou-se o tempo de processamento e a capacidade de representação da região de vórtices gerada pelo desvio dos fluxos ao entrar em contato com obstáculos, aspectos importantes para a presente pesquisa.

Foram analisados os intervalos de C_p máximos e mínimos e os valores específicos em seis pontos de interesse localizados na fachada do edifício modelo, três no primeiro pavimento (P1, P2 e P3) e três no último (P4, P5 e P6), como resume a tabela 6. Adotou-se uma rugosidade (Z_0) de 0,5 m, uma composição regular de obstáculos no entorno (3 m de altura) e direção de vento normal à fachada frontal.

Modelo de turbulência	C_p Máximo	C_p Mínimo	P1	P2	P3	P4	P5	P6
k- ϵ	1,01	-0,73	0,31	0,58	0,64	0,56	0,64	0,61
RNG k- ϵ	0,95	-0,74	0,29	0,56	0,62	0,51	0,6	0,58
SST	1,07	-0,81	0,35	0,65	0,71	0,58	0,67	0,65
<i>Eddy Viscosity Transport</i>	1,03	-1,04	0,32	0,6	0,66	0,53	0,62	0,59

Tabela 6 – Intervalos de C_p máximos e mínimos e para cada ponto de interesse na fachada a barlavento de acordo com os modelos de turbulência testados.

De maneira geral, não se notam diferenças significativas nos valores de C_p entre os modelos testados. Diferenças maiores foram anotadas pelo modelo SST, que definiu valores cerca de 15% mais elevados em relação aos demais modelos, reforçando uma indicação apresentada em Stamou & Katsiris (2006) que destaca uma deficiência nos modelos k- ϵ em criar regiões com velocidades muito baixas e, em consequência, números de Reynolds também baixos, comprometendo a performance deste modelo. Sobre essa diferença é importante destacar que o modelo SST indica a necessidade de limites estreitos de y_{plus} (abaixo de 2), inatingíveis em todos os casos simulados.

Em pontos mais baixos (P1, P2 e P3), que sofrem mais intensamente a influência da rugosidade, as diferenças entre os modelos mantiveram-se baixas. Em pontos mais elevados (P4, P5 e P6), onde o fluxo é menos influenciado pela rugosidade do piso, as diferenças chegaram a 9%, com valores mais altos para o modelo k- ϵ padrão.

Em relação à região a sotavento do conjunto de edifícios modelo, o RNG k- ϵ descreve um trecho composto por vórtices mais independentes, maiores e de contornos mais precisos. Apesar de apresentá-los com valores relativamente mais elevados comparados aos demais modelos, no modelo RNG k- ϵ a dimensão do conjunto de vórtices a sotavento é mais expressiva e permite, ao mesmo tempo, um maior detalhamento da relação com os edifícios baixos na faixa posterior do cenário, indicando a alteração dos fluxos de velocidades mais baixas devido à presença de tais edificações, como é possível notar ao analisar a figura 74.

O comportamento do trecho intermediário da zona de vórtices com o modelo SST é próximo do verificado no modelo k- ϵ , ao passo que o modelo *Eddy Viscosity Transport* afastou a zona de velocidades mais baixas para a mesma posição verificada no k- ϵ padrão, aspectos também evidentes na figura 74.

Salienta-se, contudo, que a análise do impacto dos edifícios na região posterior é aspecto secundário das simulações realizadas nesta pesquisa.

Figura 74 – Detalhe da zona de vórtices devido à presença dos edifícios altos descrita pelo modelo $k-\epsilon$ padrão (a), RNG $k-\epsilon$ (b), SST (c) e Eddy Viscosity Transport (d).

Hang & Li (2012) compararam os modelos $k-\epsilon$ padrão e RNG $k-\epsilon$ em pesquisa sobre a ventilação natural em meio a um conjunto de edifícios altos. Os autores evidenciaram que o modelo RNG $k-\epsilon$ representa melhor as condições de turbulência na região a barlavento, porém a previsão dos fluxos médios foi pior se comparada ao modelo $k-\epsilon$ padrão.

Em relação ao tempo de processamento, os quatro diferentes modelos de turbulência indicaram maiores variações, com uma melhor relação para os modelos $k-\epsilon$ e SST, como resume a figura 75. Destaca-se que o RNG $k-\epsilon$ não atingiu o nível de resíduos adequado em três testes sequenciais refinando a malha utilizada e adotando uma maior quantidade de iterações, desde 1.000, passando por 2.000, até 3.000.

Figura 75 – Comparação do tempo de processamento de um mesmo cenário utilizando diferentes modelos de turbulência

Conclui-se, portanto, que mesmo diante da reconhecida limitação do modelo $k-\epsilon$ em relação a outros (ZHANG et al, 2007; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011), sua robustez e vasta aplicação na análise de fluxos na escala urbana, no

interior de edifícios e outras aplicações na área de engenharia pesaram na sua escolha para as simulações desta pesquisa. Assim, o modelo de turbulência utilizado nas simulações de ventilação urbana e no interior das edificações foi o $k-\epsilon$ padrão.

Corroboram a aplicação deste modelo a sua utilização em investigações que também tratavam do edifício alto, como em Cheung & Liu (2011) ou do campo de pressões sobre as fachadas, como em Nishizawa et al (2003), Burnett; Bojic; Yik (2005), Hirano et al (2006), Cóstola (2006); Cheng; Lam; Demirbilek (2008) ou Cheng et al (2011). Diversas outras pesquisas semelhantes utilizaram o modelo para simular as condições de ventilação na escala urbana e/ou interior de edificações (CARRILHO DA GRAÇA et al, 2002; BADY; KATO; HUANG, 2008; WANG; WONG, 2009; ASFOUR, 2010; NG et al, 2011; 2012; HANG; LI, 2012; LIU et al, 2014).

4.1.1.5. Determinação da vazão de ar no apartamento modelo

Na presente pesquisa, a vazão de ar no apartamento utilizado como modelo constitui dado de entrada para as simulações de desempenho térmico, sendo necessária sua previsão.

Entre os métodos disponíveis e que foram listados no item 2.2.6.2, utilizam-se as simulações CFD para calcular as taxas de renovação do ar. A escolha deve-se à maior precisão do método em comparação aos modelos empíricos e à maior agilidade e menores custos em relação aos ensaios ou a técnica do gás traçador. Entretanto, em virtude da importância que a variável vazão de ar assume no contexto da pesquisa, faz-se necessário avaliar a qualidade dos resultados obtidos com o método aplicado.

Assim, tomando o mesmo edifício utilizado como exemplo para o método proposto por Silva & Saraiva (2005), apresentado na figura 76, simulou-se a vazão de ar em CFD, comparando-a aos resultados obtidos através deste mesmo método sob as mesmas condições. Adicionalmente, os resultados são comparados aos modelos de BS 5925 (1991) (equação 26) e de Aynsley; Melbourne; Vickery (1977) (equação 30).

Figura 76 – Sobreposição do esquema de fluxos apresentado por Silva & Saraiva (2005) ao resultado da simulação CFD em planta (esquerda) e em perspectiva (direita)

⁴¹ Informações obtidas através de e-mails enviados ao pesquisador discutindo-se os resultados obtidos em cada etapa de comparação entre os métodos

A partir dos dados de pressão sobre as aberturas, calculados em CFD, foi realizada a simulação da ventilação natural no interior da edificação, indicando a vazão de ar por ação do vento. Paralelamente, os mesmos dados de C_p foram inseridos em planilha eletrônica contendo o método simplificado empreendido por Silva & Saraiva (2005). O resultado foi uma vazão de ar de $1,04 \text{ m}^3/\text{s}$ para a simulação CFD, valor 27% superior ao determinado pelo método de Silva & Saraiva (2005). A vazão de ar simulada pelo ANSYS CFX foi 37% mais elevada em relação ao algoritmo apresentado em BS 5925 (1991) e 13% superior ao valor previsto com base no método descrito por Aynsley; Melbourne; Vickery (1977), como resume a figura 77.

Figura 77 – Comparação da vazão de ar em apartamento segundo os quatro diferentes métodos testados

A maior vazão de ar obtida através do método de simulação computacional em relação aos demais encontra respaldo em Seifert et al (2006). Em suas investigações simulando a ventilação natural em edifícios, os autores ressaltam que os valores calculados através de CFD foram superiores ao método simplificado nas três configurações testadas.

Em parte, as diferenças entre os algoritmos podem ser explicadas pela complexidade conferida aos fluxos desde a sua entrada na edificação, cujas aberturas situam-se em paralelo, passando, posteriormente, por duas configurações em série, o que, possivelmente, compromete a abrangência de tais modelos. Analisa-se, especificamente, a diferença entre o método simplificado proposto por Silva & Saraiva (2005) e os resultados obtidos com a simulação.

A diferença entre os métodos, interpretada como aceitável⁴¹ pelo professor Dr. Jorge Gil Saraiva, evidencia o peso que a perda de carga (ζ) assume no cálculo. No artigo, o valor é de 2.5 e foi estimado a partir de ajustes realizados em análises utilizando apartamentos reais, como advertiu seu coautor. Nestas análises foi contabilizado o efeito do mobiliário e dos equipamentos presentes nestes ambientes, que contribuem para as perdas adicionais que ocorrem na passagem dos fluxos. No caso do método numérico, existem problemas associados à passagem do ar pelas aberturas, somente contornável com a adoção de malhas extremamente pequenas ou determinando condições de fronteira adicionais específicas para considerar tais efeitos.

A simples redução no valor da perda de carga (ζ) para 2, mais adequado para o caso das simulações em CFD, uma vez que inexistem

obstáculos internos, representa uma aproximação maior na vazão de ar entre os dois métodos, resultando em uma diferença de 13%, como indicado pela figura 78.

Figura 78 – Demonstração do peso da variável perda de carga (ζ) nos cálculos de vazão de ar

No entanto, apesar da proximidade dos resultados para o caso da edificação avaliada, destaca-se a incapacidade de algoritmos simplificados em abranger situações mais complexas nas quais há um número maior de aberturas e ambientes. Dispostos em diferentes configurações, tais situações levam a uma maior complexidade no comportamento dos fluxos diante das pressões que se colocam às fachadas. No caso do método proposto por Silva & Saraiva (2005), sua aplicação somente é possível quando é possível definir, *a priori*, o percurso dos fluxos no interior dos ambientes, aspecto nem sempre viável ou facilmente reconhecido.

Como se observa no caso do apartamento modelo utilizado nesta pesquisa, temos seis aberturas externas e oito aberturas internas, entre portas e janelas, que dividem os seus sete compartimentos. Dessa forma, analisando-se os fenômenos envolvendo o comportamento dos fluxos, lançam-se sete equações de conservação de massa, sete equações de conservação de movimento e mais sete para conservação de energia contando com um número de variáveis impraticável (velocidade do escoamento em cada fronteira), o que torna fundamental a simulação computacional. Acrescenta-se, ainda, o campo de pressões sobre as fachadas, que varia significativamente entre os cenários analisados, reforçando a necessidade de determinar-se a vazão de ar a partir de um modelo numérico capaz de lidar com tal nível de complexidade.

Em relação à aplicação de simulações CFD para calcular taxas de vazão de ar devido à ação do vento, as simulações realizadas por Asfour & Gadi (2007) apresentam diferenças de 3,3% a 7,5% comparadas a um modelo analítico. Contudo, ressalta-se que a pesquisa utilizou edificações simples de pequena área, dotadas de duas aberturas para a passagem dos fluxos de ar, apenas, o que concorre à aproximação dos resultados.

Os resultados de vazão de ar obtidos na simulação CFD para o apartamento modelo utilizado na pesquisa são comparados às trocas de ar calculadas pelo método proposto por BS 5925 (1991), à equação presente em ASHRAE (2001) e ao algoritmo desenvolvido por Aynsley; Melbourne; Vickery (1977). A comparação, cujo objetivo é reforçar a possibilidade de utilização do método numérico em relação a um algoritmo bastante difundido, inicia-se

tomando os resultados obtidos na simulação com vento incidindo a partir do leste para as condições de entorno definidas pelo cenário 1 e aplicando-os ao conjunto de equações 25, 26, e 30.

Como é possível perceber na figura 79, as variações são mais significativas em pavimentos mais baixos, tendendo à redução com o incremento em altura. Comparado aos valores das simulações CFD, o método de BS 5925 (1991) é 213% menor no primeiro pavimento e cerca de 120% mais baixo no caso da equação presente em ASHRAE (2001), porém situa-se 18% acima se realizarmos o cálculo através do modelo de Aynsley; Melbourne; Vickery (1977). No pavimento intermediário, as diferenças são menores, oscilando entre 90% e 26% para os métodos BS 5925 (1991) e ASHRAE (2001), respectivamente. No pavimento mais alto o modelo da ASHRAE (2001) apresenta 35% de diferença, sendo 58% mais elevado em relação ao método de BS5925 (1991), porém é 8% mais baixo comparado à equação proposta por Aynsley; Melbourne; Vickery (1977).

Figura 79 – Trocas de ar calculadas através da simulação computacional e segundo equações de diferentes métodos para o apartamento modelo em três diferentes pavimentos com vento leste

No caso do vento sudeste, o pavimento mais baixo reforça a diferença devido à influência da rugosidade. O valor simulado é 142% mais alto em relação à quantidade de trocas apontadas pelo cálculo do modelo simplificado proposto por BS 5925 (1991) e 25% superior ao da ASHRAE (2001), ao passo que é 42% menor do que o número indicado pelo modelo elaborado por Aynsley; Melbourne; Vickery (1977). A diferença deve-se ao fato deste último modelo adotar o valor da velocidade na altura da cobertura, enquanto que os demais sugerem correções para a intensidade do vento. No pavimento intermediário as diferenças são menores. O valor calculado pelo método de BS 5925 (1991) é 48% abaixo do resultado de CFX, porém a simulação determina valor 34% menor se comparado ao método de Aynsley; Melbourne; Vickery (1977), mas ainda 19% mais alto em relação ao método da ASHRAE (2001). Para o pavimento mais alto os valores se aproximam, com diferenças de 27% em relação ao método de BS 5925 (1991) e apenas 5% para o valor de Aynsley; Melbourne; Vickery (1977), como resume a figura 8.

Figura 80 – Trocas de ar calculadas através da simulação computacional e segundo equações de diferentes métodos para o apartamento modelo em três diferentes pavimentos com vento sudeste

É fundamental ressaltar que as diferenças entre o método presente em BS 5925 (1991) e CFX decorrem do valor de C_p adotado. Mesmo na documentação da norma britânica não há definição sobre como proceder em relação ao valor de C_p em caso de múltiplas aberturas. Outras publicações que apresentam o método (FROTA; SCHIFFER, 2003; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014) tampouco esclarecem sobre este parâmetro.

Os resultados obtidos anteriormente com o método BS 5925 (1991) consideram uma média ponderada entre o valor de C_p para cada abertura e sua área. Com isso, as vazões de ar se afastam daquelas obtidas através da simulação computacional. No método numérico, por sua vez, as pressões incidentes sobre cada abertura são computadas separadamente na etapa de preparação da análise CFD, uma vez que influenciam no fluxo em cada ambiente e na vazão de ar total. Para medir a diferença específica entre os dois métodos procedeu-se uma análise simples onde foi adotada a média ponderada dos valores de C_p pelas áreas das aberturas a barlavento subtraídos dos dados de C_p nas aberturas a sotavento. Tal medida é semelhante ao que determina o método de Aynsley; Melbourne; Vickery (1977) e similar à forma como é realizada a simulação computacional. Como resultado, as diferenças entre o modelo de BS 5925 (1991) e o CFX foram diminuídas, sendo bem mais discretas nos pavimentos mais elevados, onde se situam entre 6% e 8% para o vento leste e entre 1% e 7% para o vento sudeste.

Baseado nos resultados, conclui-se que os métodos para previsão da vazão de ar diferem entre si, sobretudo quanto à forma de tomar os dados de pressão. Uma vez que estes são fundamentais para o cálculo da vazão de ar, a interferência nos resultados é significativa. Contudo, em relação aos modelos apresentados e, mesmo considerando a maior complexidade de um em comparação a outro, é importante alertar quanto aos valores calculados em todos estes. Considerando-se uma condição de fluxo permanente através de aberturas, o que dificilmente acontece em virtude das variações que ocorrem no comportamento do vento quanto à sua intensidade e direção, a quantidade de trocas de ar em intervalos de tempo maiores pode resultar em valores relativamente altos.

Em Saraiva; Silva; Santos (1999) a aplicação de método semelhante ao apresentado por Silva & Saraiva (2005) determina entre 60 e 90 trocas de ar por hora para os ambientes de dormitório e um total de 34 renovações do ar considerando-se todo o volume que compreende o apartamento utilizado pelos autores para os cálculos.

No caso das simulações realizadas para o apartamento modelo, tomando-se os $5,36 \text{ m}^3/\text{s}$ obtidos na simulação com vento leste para o cenário 1, temos um total de 67 trocas que ocorrem em uma hora no apartamento situado no primeiro pavimento considerando-se o seu volume total de $169,34 \text{ m}^3$. O valor sobe para 135 trocas por hora se considerarmos a vazão de ar no último pavimento.

A taxa de renovação obtida pelas simulações computacionais situa-se próxima dos dados apresentados por Liu et al (2014). Na pesquisa foram analisados três tipos de apartamentos situados no pavimento tipo de um edifício de grande altura, sendo quatro com 230 m^3 , quatro com 177 m^3 e dois com 175 m^3 . Os dois últimos apresentam dimensões semelhantes àquelas do apartamento modelo adotado nesta pesquisa. Nestes, as taxas de renovação do ar situaram-se entre 112 e 138 trocas por hora para incidências de vento perpendiculares e entre 53 e 78 trocas por hora para unidades mais oblíquas em relação aos fluxos. Os valores foram inseridos na aba coeficiente de vento do programa *EnergyPlus* para cálculo do desempenho térmico das unidades residenciais utilizadas na pesquisa.

Em Asfour & Gadi (2007), simulações CFD utilizando três opções de edifícios de volumetria simples e dotados de aberturas em faces opostas determinaram vazões entre $2,81 \text{ m}^3/\text{s}$ e $3,07 \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando que os volumes eram de 128 m^3 e 125 m^3 , tem-se entre 67 e 75 trocas de ar por hora. Os valores são expressivos por tratar-se de apenas um ambiente, diferente da série de compartimentos que compõe o apartamento modelo aplicado a presente pesquisa. Também utilizando modelos simples com duas aberturas apenas, os resultados das simulações realizadas por Seifert et al (2006) indicaram vazões de $2,66 \text{ m}^3/\text{s}$ e $3,72 \text{ m}^3/\text{s}$, totalizando 45 e 65 trocas de ar por hora, respectivamente. Os valores situam-se próximos em comparação aos determinados por um método simplificado.

Muito embora os valores obtidos nas simulações estejam próximos aos calculados por métodos simplificados, estes suscitam análises mais cuidadosas, uma vez que os programas computacionais para cálculo do desempenho térmico são, em sua maioria, desenvolvidos em outros países e cujo clima determina um maior nível de isolamento da envoltória das edificações. Como reflexo dessas características construtivas, tais programas adotam baixas quantidades de trocas de ar por hora e infiltrações mínimas como padrão para os cálculos. Tais valores podem, no entanto, ser alterados pelo projetista. O *DesignBuilder*, por exemplo, adota o valor padrão de três trocas de ar por hora, bem mais baixo do que as quantidades previstas nas simulações CFD.

4.2. A simulação do desempenho térmico

A simulação do desempenho térmico de edifícios tem como objetivo avaliar os impactos das decisões projetuais sobre o conforto térmico dos ocupantes e o consumo da energia para sua operação.

Nesse sentido, programas para cálculo do balanço térmico da edificação constituem ferramentas importantes para avaliar, de maneira relativamente rápida e simples, o impacto de determinadas propostas sobre o comportamento térmico de cada ambiente do edifício, denominados zonas térmicas. A partir da orientação da edificação, das dimensões e características das aberturas, dos materiais que compõem os fechamentos opacos e transparentes e demais detalhes técnicos, o projetista pode avaliar, de maneira dinâmica, o desempenho ambiental da edificação em diferentes climas e situações visando atingir níveis desejáveis de eficiência energética.

Os programas de previsão e análise do desempenho termoenergético de edificações reproduzem os fenômenos físicos responsáveis pelas trocas térmicas, calculando o balanço de energia da edificação, os índices de iluminação e o consumo energético a partir da modelagem do edifício e da indicação de seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento (OLIVEIRA, 2006; SORGATO, 2011; D.O.E., 2012a).

Atualmente estão disponíveis diversos programas para simulação de desempenho termoenergético de edificações como o DOE-2, BLAST, ESP-r e *EnergyPlus*. Todos se baseiam na representação de um modelo de edifício (PEDRINI, WESTPHAL, LAMBERTS, 2002). De acordo com Oliveira (2006), os programas mais utilizados são o DOE, através de sua interface *VisualDOE*, e o *EnergyPlus*, desenvolvidos pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Este último pode ser utilizado através de sua interface, o *Designbuilder*. De maneira geral, os programas trabalham com três grupos de variáveis principais. Estas, por sua vez, reúnem uma série de parâmetros de influência sobre o desempenho térmico da edificação: as variáveis do clima local; as variáveis de projeto, que tratam do layout interno, da geometria da edificação, das propriedades termofísicas dos materiais de construção, entre outros; e as variáveis de uso e ocupação, compreendendo as rotinas, as cargas térmicas internas e o uso de equipamentos entre outros (OLIVEIRA, 2006).

Nesta tese, as simulações de desempenho térmico foram realizadas através do programa *DesignBuilder* em sua versão 3.2.0.070. O aplicativo foi utilizado para calcular o desempenho térmico de unidades habitacionais do edifício modelo utilizando somente a ventilação natural como estratégia de resfriamento.

4.2.1. O programa *DesignBuilder*

O *DesignBuilder* oferece uma interface gráfica mais simples para utilizar um dos motores de cálculo do balanço térmico mais difundidos atualmente, o *EnergyPlus*. No *software* estão disponíveis todos os recursos utilizados no *EnergyPlus*, incluindo opções avançadas, como uso da ventilação natural, controle da luz solar, fachadas duplas e pisos aquecidos entre outros através do módulo completo HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) do *EnergyPlus* (D.O.E. 2012b).

A principal vantagem é a interface amigável, o que torna possível a rápida modelagem tridimensional do edifício a ser avaliado, além da inserção de variáveis construtivas e elementos arquitetônicos, especificação de materiais, rotinas de ocupação, iluminação, atividades e de utilização de equipamentos. O aplicativo apresenta, ainda, qualidades fundamentais como o acesso simplificado ao banco de dados meteorológico, modelo sofisticado de avaliação do consumo energético e cálculo das cargas de aquecimento e

resfriamento através do método de balanço de calor aprovado pela ASHRAE (TRONCHIN; FABBRI 2008; NEGREIROS, 2010).

Os resultados são analisados através de imagens, animações, tabelas de dados e gráficos em intervalos determinados pelo projetista (anual, mensal, diário, horário ou frações destes). Os principais parâmetros avaliados são o consumo de energia; a variação na temperatura do ar, a temperatura radiante média, a temperatura operativa e a umidade do ar; os níveis de conforto pelo padrão ASHRAE 55 e PMV entre outros; a informação climática local; a transmissão de calor pela envoltória, as taxas de infiltração e ventilação; as cargas de aquecimento e resfriamento e a emissão de gás carbônico.

O *DesignBuilder* foi testado de acordo com a norma ASHRAE 140 (2004) - *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs* (BESTEST) e possui todas as características e requisitos necessários a um programa de simulação determinados pelo RTQ-R, a saber:

- modelar 8.760 horas por ano;
- modelar variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos, rede de ventilação natural e sistemas de condicionamento artificial, definidos separadamente para cada dia da semana e feriados;
- modelar efeitos de inércia térmica;
- modelar efeitos de multi-zonas térmicas;
- ter capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto;
- determinar a capacidade solicitada pelo sistema de condicionamento de ar;
- produzir relatórios horários das trocas de ar e das infiltrações;
- produzir relatórios horários do uso final de energia.

Negreiros (2010) destaca que o aplicativo é um dos poucos que permite o cálculo da ventilação natural a partir da determinação do tamanho da abertura, do coeficiente de descarga, período em que permanece aberta, velocidade corrigida e a diferença de pressão entre as aberturas do ambiente.

Apesar da possibilidade de analisar o comportamento da ventilação natural, concorda-se com a avaliação de Oliveira (2006) quanto à dificuldade em simular edificações naturalmente ventiladas devido à limitação dos programas de simulação do desempenho térmico para tratar um fenômeno complexo como o escoamento do ar, sujeito a alterações devido à influência do entorno e dos registros climáticos. Uma possibilidade de contorno de tal deficiência, pondera o autor, seria a aplicação de ensaios em túnel de vento ou a adoção de simulações em ambiente CFD para os dados de entrada da ventilação natural.

4.2.2. Parâmetros de simulação do desempenho térmico

A seguir são apresentadas as determinações presentes em RTQ – R (2012) para simulação do desempenho térmico de edificações multifamiliares naturalmente ventiladas.

As indicações foram agrupadas em modelagem geométrica do edifício e do apartamento modelo, a inserção dos parâmetros climáticos do local, padrão de uso e cargas internas, as propriedades térmicas dos componentes da envoltória, configurações padrão adotadas e a inserção da ventilação natural nas simulações de desempenho térmico.

4.2.2.1. Modelagem da geometria

RTQ – R (2012) determina que, para o caso de edificações multifamiliares com mais de 10 pavimentos, não é necessário modelar todos os pavimentos tipo, devendo ser modelado um pavimento a cada cinco pavimentos tipo. No caso, as unidades habitacionais do pavimento tipo, do térreo e da cobertura devem ser modeladas com as características geométricas, propriedades térmicas dos elementos construtivos e orientação solar de acordo com o projeto arquitetônico. Ainda, é necessário que cada ambiente da unidade habitacional seja modelado como uma zona térmica.

Para a modelagem do edifício e apartamento utilizados na pesquisa, a geometria foi importada de ambiente CAD e, então, redesenhada para a geração de blocos e zonas no *DesignBuilder*. Utilizando a planta baixa como referência, foram criadas divisórias externas (*walls*) e internas (*partitions*) que deram forma tridimensional ao apartamento.

Serão avaliados três ambientes de permanência prolongada, assim denominados os espaços internos de ocupação contínua por um ou mais indivíduos. No caso específico desta pesquisa, apenas a sala, a suíte do casal e o dormitório voltado para a fachada leste serão analisados, como destacado na figura 81.

Figura 81 – Modelagem do apartamento modelo no programa *DesignBuilder* com detalhe para as zonas de permanência prolongada a serem analisadas detalhadamente e a visualização tridimensional da unidade.

Contrariamente ao que determina o RTQ – R (2012) optou-se por avaliar o desempenho térmico nos apartamentos do primeiro, décimo primeiro e vigésimo terceiro pavimentos. Assim, apenas tais unidades tiveram seus ambientes detalhados. O restante do modelo, composto pelo corpo do edifício, complementos dos pavimentos primeiro, décimo primeiro e vigésimo terceiro, pilotis e vigésimo quarto pavimento (cobertura) foram modelados como componentes adiabáticos (figura 82).

⁴²http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=3_south_america_wmo_region_3/country=BRA/cname=Brazil

Figura 82 – O edifício modelo e o detalhamento apenas dos apartamentos no primeiro, décimo primeiro e penúltimo pavimentos voltados para quadrante leste-sul.

A medida visa excluir a influência dos ganhos de calor pelo piso, no caso de utilizar um apartamento no térreo, e os ganhos pela cobertura para o apartamento no topo do edifício, uma vez que em baixas latitudes os níveis de radiação sobre planos horizontais são significativos.

4.2.2.2. Escolha do arquivo climático

Usuários de programas de simulação do desempenho térmico possuem uma variedade de dados de clima à disposição, variando desde as coletas *in loco* até a utilização de arquivos climáticos considerados típicos ou de referência do clima de uma determinada localidade. São considerados típicos por não incluírem os extremos de temperatura. Entre os tipos disponíveis, destacam-se o TRY (*Test Reference Year*), TMY (*Typical Meteorological Year*) e WYEC (*Weather Year for Energy Calculation*).

O programa *DesignBuilder* utiliza dados horários de clima para definir as condições externas durante as simulações. Cada localidade possui um arquivo separado com dados de temperatura do ar, umidade relativa, radiação e posição solar, velocidade do ar e direção de vento entre outras informações. O programa obtém este arquivo automaticamente a partir de conexão com o *site*⁴² do DoE (*U.S. Department of Energy*).

O arquivo adotado para Fortaleza, em formato EPW (*EnergyPlus Weather Data*), possui o tratamento mais recente em relação aos dados climáticos, representado pela opção TMY. O arquivo apresenta 8.760 horas de dados de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, pressão barométrica entre outras variáveis. Este é gerado com base num ano meteorológico típico (do inglês *Typical Meteorological Year*), organizado a partir de uma sequência de dados históricos de vários anos. Diferentemente da metodologia de criação do TRY, na qual são eliminados anos com valores extremos até que reste um ano completo, no caso do TMY para cada estação e cada mês são excluídos os mais quentes e mais frios até que reste apenas um, considerado o mês típico do lugar. A seleção de doze meses, não necessariamente de um mesmo ano, resulta no arquivo TMY (RORIZ, 2012).

RTQ – R (2012) determina como características do arquivo climático:

- Fornecer valores horários para os parâmetros relevantes e requeridos como *input* pelo programa de simulação, tais como temperatura, umidade, direção e velocidade do vento e radiação solar;
- Os dados climáticos presentes no arquivo devem ser representativos da Zona Bioclimática onde se situa ou situará o edifício analisado e, caso o local do projeto não possua arquivo climático, deve-se utilizar dados climáticos de uma região próxima cujas características climáticas sejam semelhantes;
- Devem ser utilizados arquivos climáticos disponibilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos⁴³ ou os arquivos climáticos publicados pelo Procel⁴⁴ em formatos tais como TRY e TMY.

⁴³ www.eere.energy.gov

⁴⁴ www.procelinfo.com.br/etiquetagem_edificios

4.2.2.3. Padrão de uso e cargas internas

As simulações, que avaliam apenas três ambientes de permanência prolongada, levam em conta a ocupação da suíte, dormitório e da sala durante todo o ano. O apartamento é ocupado por quatro pessoas no total, sendo 2 por dormitório: casal e 2 filhos.

No programa, na aba *Activity*, foi utilizado um padrão de ocupação do modelo representando uma família com 4 membros, sendo 2 em cada dormitório e a sala deve ser utilizada por todos os usuários dos dormitórios, como recomendado em RTQ – R (2012). Os padrões de ocupação foram modelados para dias úteis e fins de semana.

Os valores de ocupação são determinados em termos de densidade (pessoa/m²) e as rotinas de ocupação foram indicadas especificamente nos ambientes de interesse, como descrito em RTQ – R (2012).

Hora	Dormitórios		Sala	
	Dias de Semana (%)	Final de Semana (%)	Dias de Semana (%)	Final de Semana (%)
1h	100	100	0	0
2h	100	100	0	0
3h	100	100	0	0
4h	100	100	0	0
5h	100	100	0	0
6h	100	100	0	0
7h	100	100	0	0
8h	0	100	0	0
9h	0	100	0	0
10h	0	50	0	0
11h	0	0	0	25
12h	0	0	0	75
13h	0	0	0	0
14h	0	0	25	75
15h	0	0	25	50
16h	0	0	25	50
17h	0	0	25	50
18h	0	0	25	25
19h	0	0	100	25
20h	0	0	50	50
21h	50	50	50	50
22h	100	100	0	0
23h	100	100	0	0
24h	100	100	0	0

Tabela 7 – Rotina de ocupação do dormitório e da sala

Para cada ambiente a ser simulado, uma taxa metabólica deve ser adotada de acordo com a atividade desempenhada. RTQ – R (2012) determina valores baseados na ASHRAE (2009) considerando uma área de pele média de 1,80 m² (equivalente à área de pele de uma pessoa média). A seguir são apresentadas as taxas metabólicas determinadas pelo RTQ – R (2012) e adotadas na simulação (tabela 8).

Ambiente	Atividade realizada	Calor produzido (W/m ²)	Calor produzido para área de pele = 1,80 m ² (W)
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

Tabela 8 – Níveis metabólicos de acordo com a atividade realizada nos ambientes escolhidos

O RTQ – R (2012) recomenda que a modelagem do sistema de iluminação artificial deva ser realizada para os ambientes de permanência prolongada considerando dois padrões de uso: um para os dias de semana e outro para os finais de semana.

Os valores 100% representam os horários do uso da iluminação e os valores 0% representam que a iluminação do ambiente está desligada, como apresentado na tabela 9, confeccionada com base no RTQ – R (2012).

Hora	Dormitórios		Sala	
	Dias de Semana (%)	Final de Semana (%)	Dias de Semana (%)	Final de Semana (%)
1h	0	0	0	0
2h	0	0	0	0
3h	0	0	0	0
4h	0	0	0	0
5h	0	0	0	0
6h	0	0	0	0
7h	100	0	0	0
8h	0	0	0	0
9h	0	100	0	0
10h	0	0	0	0
11h	0	0	0	100
12h	0	0	0	100
13h	0	0	0	0
14h	0	0	0	0
15h	0	0	0	0
16h	0	0	0	0
17h	0	0	100	100
18h	0	0	100	100
19h	0	0	100	100
20h	0	0	100	100
21h	100	100	100	100
22h	100	100	0	0
23h	0	0	0	0
24h	0	0	0	0

Tabela 9 – Padrão de utilização da iluminação artificial no dormitório e na sala

O padrão de consumo dos sistemas de iluminação artificial e equipamentos elétricos foi adotado de acordo com os horários de funcionamento, também como recomendado em RTQ – R (2012). Os ambientes de permanência prolongada devem ser modelados com densidades de potência instalada de iluminação, sendo de 6 W/m² para a sala e de 5 W/m² para os ambientes de dormitório.

4.2.2.4. Propriedades térmicas da envoltória

Os materiais constituintes das envoltórias foram definidos com base no levantamento realizado para definição do edifício modelo, avaliando a recorrência dos tipos de materiais constituintes. Ainda, consultaram-se as especificações constantes no projeto arquitetônico do edifício modelo. Adicionalmente, as normas técnicas NBR – 15.220 e NBR – 15.575 foram utilizados no cálculo e para comparar os valores mínimos admitidos.

Em relação ao envelope do edifício, o revestimento cerâmico de fachada tem se convertido em prática frequente no Brasil, sobretudo em regiões litorâneas. Nesta pesquisa adotam-se as paredes externas do edifício modelo com essas características. Seguindo os métodos de cálculo presentes na NBR 15220 – 2 atingiu-se valor de transmitância térmica (U) abaixo do limite mínimo indicado para a alvenaria com revestimento cerâmico, que foi de 2,34 W/m².K. Uma vez inseridas a quantidade de camadas, espessuras e características dos materiais constituintes, o próprio programa *DesignBuilder* calculou o valor de U em 2,356 W/m².K. Embora a NBR 15.575, em sua parte quatro, determine que as paredes externas de edifícios localizados na zona bioclimática 8 deverão apresentar valores de U entre 2,59 W/m².K e 3,70 W/m².K, adotou-se o valor obtido devido à representatividade da opção pelo revestimento cerâmico de fachada na região de estudo.

Em relação às esquadrias, os tipos mais comuns verificados na amostra de edifícios residenciais levantada são as de correr com montantes em alumínio. Esse tipo de janela permite que até metade do vão permaneça aberto para ventilação. Segundo o projeto arquitetônico, o vidro utilizado é incolor com 3 mm de espessura, cuja transmitância térmica é de 5,89 W/m².K e o fator solar de 0,86.

No piso foi adotado o revestimento cerâmico comum assentado sobre argamassa e o forro é composto de laje em concreto com espessura de 25 cm sem forro. Entretanto, no caso do piso e do forro a transferência de calor é nula, uma vez que estes foram indicados como elementos adiabáticos.

Apesar da evolução no uso de paredes internas em gesso ou tipo *dry-wall*⁴⁵, cada vez mais comuns no mercado da construção civil, as divisórias internas foram indicadas como alvenaria de tijolos cerâmicos (9,0 x 19,0 x 19,0 cm) com argamassa externa (2,5 cm) e interna (2,5 cm) e pintura em cor clara, com valor de U calculado em 2,472 W/m². K e capacidade térmica de 79 kJ/m² K.

4.2.2.5. Configurações padrão adotadas

Algumas configurações de ordem geral devem ser ajustadas para as simulações. As indicações padrão para o *EnergyPlus* com base em Sorgato (2011) e reunidas na tabela 10, foram incorporadas ao *DesignBuilder*.

⁴⁵ A parede tipo *drywall* é constituída por uma estrutura de perfis de aço galvanizado na qual são parafusadas, em ambos os lados, chapas de gesso. A forma de montagem e os componentes utilizados permitem que a parede seja configurada para atender a diferentes níveis de desempenho, de acordo com as exigências ou necessidades de cada ambiente em termos mecânicos, acústicos, térmicos e de comportamento frente ao fogo. Fonte: Associação Brasileira do Drywall, disponível em <http://www.drywall.org.br/index1.php/7/parede>.

Parâmetro	Algoritmo adotado
<i>Solar Distribution</i>	<i>Full InteriorAndExterior</i>
<i>SurfaceConvectionAlgorithm: Inside</i>	<i>Detailed</i>
<i>SurfaceConvectionAlgorithm:Outside</i>	DOE-2
<i>HeatBalanceAlgorithm</i>	CTF – <i>ConductionTransferFunction</i>
<i>Timestep</i>	<i>4 per hour</i>

Tabela 10 – Configurações padrão adotadas nas simulações

O *DesignBuilder* não apresenta a possibilidade detalhada (*detailed*) para o cálculo da convecção superficial. Em relação à condução, o método utilizado é o *Conduction Transfer Functions* do *EnergyPlus*.

O *shadowing interval* na aba solar apresenta um padrão de 20, que indica um intervalo de insolação comum a países de clima frio, com maiores índices de nebulosidade. Considerando a realidade climática de Fortaleza, adotou-se o valor de 1 como intervalo, ou seja, o sol está incidindo sobre as superfícies da edificação em todos os dias do ano.

4.2.2.6. Ventilação natural e desempenho térmico

A influência da ventilação natural no desempenho térmico de edificações é tema de diversas pesquisas recentes abordando diferentes tipologias e condições climáticas (CARRILHO DA GRAÇA et al, 2002; MOESEKE et al, 2005; OLIVEIRA, 2006; CÓSTOLA, 2006; MATOS, 2007; SORGATO, 2009; VERSAGE, 2009; MARCONDES, 2010; NEGREIROS, 2010; CARRILHO DA GRAÇA; MARTINS; HORTA, 2012; GUIMARÃES; CARLO, 2012; PRAJONGSAN; SHARPLES, 2012).

Em virtude das atuais necessidades ambientais e de redução do consumo energético, programas computacionais para predição do desempenho térmico de edificações têm constantemente desenvolvido os modelos para o cálculo da ventilação natural. Comumente, nestes aplicativos estão embutidos modelos de rede, como o COMIS ou AIRNET, que permitem o cálculo do fluxo de ar que atravessa a edificação devido à ação dos ventos ou em função da diferença de temperatura. As informações são integradas ao balanço térmico por zona através de algoritmos, que consideram os dados de direção e velocidade do vento presentes no arquivo climático utilizado na simulação, os coeficientes de pressão incidentes sobre as superfícies da edificação e o tamanho e a perda de carga das aberturas, entre outras variáveis para calcular as perdas ou ganhos de calor devido à ventilação natural.

Contudo, a utilização da ventilação natural para remoção do calor implica em uma série de complexidades inerentes ao comportamento do ar em movimento que, no caso da modelagem em programas deste tipo, pode resultar em incertezas e inadequações que comprometem os resultados. Apesar de uma abordagem comum, estes modelos apenas calculam a vazão de ar que atravessa as aberturas, não descrevendo o comportamento dos fluxos no interior dos ambientes, tampouco o campo de velocidades do ar.

No caso do *DesignBuilder*, o usuário pode optar entre dois métodos de simulação utilizando a ventilação natural: a opção programada (*scheduled*) e a alternativa calculada (*calculated*). Na primeira, utilizada na presente pesquisa, um valor fixo da quantidade de trocas de ar por hora é indicado

pelo projetista e o programa o considera nos processos de simulação somado ao valor de infiltração. Na segunda opção os valores de ventilação natural e infiltração serão calculados a partir das dimensões das janelas e frestas (*cracks*), efeito chaminé (*buoyancy*) e, principalmente, dos valores de C_p para cada abertura.

É possível inserir manualmente os valores de C_p para as oito principais incidências de vento a cada 45°. A medida evita a adoção de valores padrão oriundos das pesquisas de AIVC (1984) embutidos em bibliotecas do programa, porém reconhecidamente limitados quando utilizados para geometrias mais elaboradas e relações espaciais mais complexas. No entanto, para dar entrada nos dados desta forma, é necessário que as aberturas estejam em posição ortogonal à incidência de vento, características que divergem das configurações urbanas dos cenários, uma vez que o edifício modelo está implantado em posição oblíqua ao eixo norte-sul.

Outra medida necessária é a exclusão de quaisquer sistemas mecânicos para aquecimento ou refrigeração na aba HVAC e a indicação de que a ventilação natural é a única estratégia de resfriamento utilizada. Insere-se a quantidade de trocas de ar que ocorrem em uma hora e a programação de quando a estratégia será utilizada, que pode ser determinada de acordo com as condições ambientais (temperaturas externas ou internas ou quando a sua diferença atingir determinados valores). Nas simulações desta pesquisa, a estratégia de ventilação natural permanece ativa em todos os momentos, para medir sua influência nos resultados durante todo o dia e ao longo do ano inteiro, como demonstra a figura 83.

Figura 83 – Organização da aba HVAC para simulação utilizando apenas a ventilação natural

No edifício modelo, as janelas são do tipo de correr, portanto, razão de abertura de 50%. Estas permanecem abertas durante todo o dia através de programação específica. As portas, por sua vez, foram indicadas como 100% de vão livre para passagem do ar e, à exceção da porta de acesso ao apartamento, permanecem abertas durante todo o dia e todo o ano.

O programa demonstra sensibilidade à alteração dos parâmetros que influenciam a ventilação natural, como demonstraram os resultados obtidos

em uma série de testes preliminares. O índice fator de vento (*Wind factor*) determina sua influência na simulação, sendo seus valores entre 0 para nenhuma incidência de vento, o que permite analisar a ventilação somente pelo efeito chaminé, até 1, onde a ação do vento é considerada completamente ativa. Os valores intermediários implicam em percentuais da influência do vento na simulação. Além deste aspecto, o fluxo de ar é influenciado por características tais como a área de abertura e o tempo em que permanecem abertas as portas e janelas inseridas no modelo.

No entanto, uma vez que o foco da pesquisa envolve a análise do potencial da ventilação natural sobre o desempenho térmico de edifícios, é fundamental avaliar se o valor da temperatura interna sofre alterações com o aumento da vazão de ar. Para tanto, implantou-se uma quadra com os quatro edifícios modelo em um cenário hipotético desobstruído e realizou-se uma série de simulações elevando-se a quantidade de trocas de ar por hora em cada caso. Os testes foram feitos com trocas de 5, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 vezes o volume total de ar do apartamento, verificando o comportamento da temperatura do ar no interior dos ambientes da suíte, dormitório e sala durante o dia 19 de fevereiro em relação ao aumento nas taxas de ventilação natural. Adicionalmente, verificou-se a ocorrência de conforto térmico segundo o índice de De Dear & Brager (1998) durante um ano típico (TMY).

A figura 84 apresenta o comportamento da temperatura do ar na suíte. É possível perceber que quando a temperatura externa está mais elevada ocorre uma maior aproximação nas curvas e a influência de maiores taxas de vazão de ar é menor. No período entre as 10:00 e as 15:00, quando a temperatura externa situa-se em torno de 30 °C, todas as curvas se situam próximo deste valor, inexistindo diferenças superiores a 0,3 grau em relação à temperatura externa mesmo variando-se a taxa de renovações de ar de 10 para 100 trocas de ar por hora, por exemplo.

No início da manhã e durante a noite, quando as temperaturas externas são mais baixas, é possível perceber diferenças mais significativas, reforçando que a influência de maiores taxas de vazão de ar é mais perceptível em períodos mais amenos. Nestes casos, o aumento de 5 para 10 renovações por hora ou de 10 para 20 trocas de ar causa diferenças de na temperatura do ar em torno de 1 grau.

Figura 84 – Comportamento da temperatura do ar na suíte em relação ao aumento na vazão de ar

No caso do dormitório, os efeitos da vazão de ar sobre a temperatura interna são semelhantes ao caso anterior, com maiores diferenças quando a temperatura externa é mais baixa. Contudo, as diferenças se estreitam a partir de 40 trocas de ar por hora, inexistindo diferenças superiores a 0,3 grau acima desta taxa mesmo com o dobro da vazão de ar. Tanto neste ambiente como nos demais, quando a vazão atinge valores acima de 80 trocas por hora a tendência é que a temperatura interna seja a igual à externa, o que se espera de uma situação em que o fluxo de ar intenso tende à uniformização das condições ambientais (figura 85).

Figura 85 – Comportamento da temperatura do ar no dormitório em relação ao aumento na vazão de ar

As curvas de temperatura verificadas na simulação da sala, apresentadas na figura 86, corroboram as características vistas nos demais ambientes, o que reforça a sensibilidade do programa em relação ao aumento das taxas de renovação do ar. Novamente, a partir de 40 trocas horárias ocorre um estreitamento das curvas e, mesmo quando a temperatura externa é mais baixa, internamente os valores apresentam o mesmo intervalo de diferenças. Em alguns casos, a temperatura interna é levemente superior à externa em função do aquecimento das superfícies, aspecto indicado pela temperatura radiante.

Figura 86 – Comportamento da temperatura do ar na sala em relação ao aumento na vazão de ar

Utilizando o índice de conforto presente na ASHRAE 55 (2004) para determinar o total de horas em conforto durante o ano, é possível perceber que, no caso da suíte, a elevação de 5 para 10 renovações por hora aumenta em cerca de 30% a quantidade de horas em conforto. No dormitório, ao dobrar-se a quantidade de trocas de ar inicial, ocorre uma ampliação de mais de 80% no total de horas em conforto, sendo 45% maior no caso da sala.

Ao passar de 10 para 20 trocas de ar por hora a influência da vazão diminui sensivelmente, implicando apenas em 8% a mais na quantidade de horas em situação de conforto na suíte, 15% no dormitório e 11% na sala. Dobrando-se o valor de 20 trocas por hora para 40 produz um aumento de cerca de 2% a 3% no total de horas em conforto nos três ambientes. A partir de 40 trocas de ar por hora, no entanto, as diferenças mantêm-se constantes e situam-se entre 0,2% e 0,3% mesmo elevando-se a quantidade das taxas para 60, 80 ou 100 trocas por hora, como indica a figura 87.

Figura 87 – Total de horas durante o ano em conforto térmico nos três ambientes variando-se a taxa de vazão de ar

O que se denota a partir dos testes de sensibilidade do programa em relação à vazão do ar é que, acima de 40 renovações por hora, a influência sobre a temperatura do ambiente pode ser desprezada. O próprio *DesignBuilder* limita o parâmetro a um máximo de 100 trocas horárias, o que não deve comprometer as análises nos casos em que a taxa de vazão de ar situe-se acima deste valor.

É importante destacar o fato do *DesignBuilder* e outros programas para cálculo do balanço térmico de edificações serem sensíveis a esta característica, o que pode ser considerado um avanço na aproximação das condições vivenciadas na realidade. Tais impressões foram destacadas por Cóstola (2006) em suas simulações utilizando o TAS (EDSL, 2008).

Ao contrário, Oliveira (2006) assinalou a limitação do programa de desempenho térmico utilizado quanto à incorporação da ventilação natural para. O autor destacou que, mesmo diante de altas taxas de renovação do ar (250 trocas por hora) adotadas em sua pesquisa, o Visual DOE não registrou a aproximação dos valores de temperatura interna e externa.

Na verdade, a tendência natural diante de uma maior intensidade dos fluxos atravessando ambientes em que inexitem cargas internas expressivas

é a aproximação em relação à temperatura externa. A velocidade do ar, por sua vez, variável associada à quantidade de trocas realizadas num determinado período, é bem mais sensível ao aumento da vazão. Assim, mesmo que a temperatura verificada internamente seja a mesma ou, em alguns casos, superior à temperatura do ambiente externo, é a velocidade do ar que vai influenciar no resfriamento fisiológico dos ocupantes. Desde que ocorram fluxos próximos ao corpo em temperatura mais baixa do que a da pele, os limites de temperatura interna aceitáveis do ponto de vista do conforto térmico podem ser estendidos.

Reforça-se, portanto, a necessidade de medir este parâmetro como forma de associa-lo às avaliações. Contudo, programas de desempenho térmico como o *DesignBuilder* e seus modelos de rede para cálculo da ventilação natural são limitados em relação a este parâmetro, sendo incapazes de prever a velocidade do ar no interior dos ambientes avaliados.

4.3. Critério de avaliação do desempenho térmico

A escolha de um critério de avaliação do desempenho térmico de edificações permite a analisar, objetivamente, os resultados das simulações computacionais.

A avaliação do desempenho térmico de edifícios dotados de sistemas de condicionamento do ar pode ser feita através do consumo de energia para resfriamento ou calculando-se a carga térmica a ser retirada pelo sistema, entre outros parâmetros. Em edifícios naturalmente ventilados, por sua vez, pode-se adotar como critério a temperatura interna (OLIVEIRA, 2006), a temperatura operativa ou neutra em relação a determinado índice adaptativo (MARCONDES, 2010; NEGREIROS, 2010), o total de horas em conforto (PRAJONGSAN; SHARPLES, 2012; LIU et al, 2014), ou ainda o cálculo dos graus-hora de desconforto ou graus-hora para resfriamento (MATOS, 2007; SORGATO, 2009; VERSAGE, 2009; RTQ – R, 2012). Nesta pesquisa, optou-se pela predição do total de horas dentro da zona de conforto de acordo com um índice adaptativo como critério de avaliação do desempenho térmico.

4.3.1. Índice de conforto adotado

Nesta pesquisa, a abordagem de uma edificação naturalmente ventilada em região tropical reduz a aplicabilidade dos modelos de balanço térmico, reconhecidamente limitados para tais condições, o que reforça a necessidade de utilizar um índice adaptativo.

O índice adaptativo escolhido deve, necessariamente, adequar-se ao clima da localidade como forma de melhor retratar as condições de conforto térmico. Analogamente ao realizado por Oliveira (2006), Pereira & Assis (2009) compararam a temperatura neutra mensal dos modelos adaptativos de Humphreys (1978); Auliciems (1981), De Dear & Brager (2002) e Nicol & Humphreys (2002) em relação aos limites da zona de conforto definidos por Araújo (1996). Utilizando dados das normais climatológicas para Fortaleza, os resultados indicaram que as zonas de conforto geradas por Humphreys (1978), Auliciems (1981) e De Dear & Brager (2002) assemelham-se à definida por Araújo (1996), com os dois primeiros apresentando uma aproximação maior.

Além da proximidade da temperatura de conforto expressa pelo índice com a zona de conforto estabelecida por Araújo (1996) para o clima da cidade de Natal, bastante próximo das características do clima de Fortaleza, a escolha de um modelo adaptativo como critério de avaliação dos resultados das simulações deve contemplar a sua capacidade de acompanhar as oscilações climáticas que ocorrem ao longo do ano. Como ressalta Oliveira (2006), uma vez que a temperatura de conforto em índices adaptativos tende a acompanhar as variações na temperatura externa, a escolha de um determinado índice deve ser feita em função de sua capacidade para representar tais oscilações.

Utilizando as temperaturas médias mensais presentes no arquivo TMY, o mesmo utilizado nas simulações de desempenho térmico, é possível perceber a proximidade da temperatura neutra expressa pelos índices de Humphreys (1978) e De Dear & Brager (2002) em relação à temperatura média nos diferentes períodos do ano. Nos meses que compõem o período de verão, o índice de Humphreys (1978) apresenta-se um pouco mais próximo à temperatura média mensal do que os demais.

Figura 88 – Variação do comportamento da temperatura neutra para Fortaleza segundo diversos índices adaptativos

Todavia, é possível concluir, com base no gráfico apresentado anteriormente na figura 88, que é possível utilizar tanto o modelo de Humphreys (1978) como o índice de De Dear & Brager (1998) em virtude das pequenas diferenças entre os dois. Entretanto, corroboram a escolha do modelo adotado pela ASHRAE 55 (2004) a maior abrangência e difusão promovida pela norma internacional, sua incorporação em notáveis sistemas de etiquetagem de edificações e a agenda recente de revisões e melhorias que contemplam, principalmente, a ampliação dos limites de temperatura operativa em localidades de clima quente devido à elevação na velocidade do ar (DE DEAR, 2011).

Apesar da proximidade das temperaturas neutras determinadas pelos dois modelos, a faixa definida pelo modelo de De Dear & Brager (1998) é menos restritiva. O modelo adotado pela ASHRAE 55 (2004) considera que o ambiente está em conforto quando, no máximo, 20% das pessoas encontram-

se insatisfeitas, situando as temperaturas operativas no intervalo entre 3,5 graus abaixo da temperatura operativa e 3,5 graus acima desta. O modelo ainda define um intervalo mais restrito, em que 90% dos ocupantes estarão em conforto, numa faixa de 2,5 graus a menos da temperatura operativa e 2,5 graus a mais do que esta, como indicado na figura 89.

Figura 89 – Zona de conforto proposta por De Dear & Brager (1998) para o clima de Fortaleza com faixas de 80% e 90% de aceitação

Em virtude da pouca variação da temperatura do ar durante o dia e mesmo ao longo do ano, características evidenciadas no diagnóstico climático, e, baseado na experiência que resulta da vivência do clima local, acredita-se que os intervalos mais abrangentes que definem a zona de conforto a partir do índice da ASHRAE 55 (2004), somando-se ou subtraindo 3,5 graus, são demasiadamente amplos e podem não corresponder a situações de conforto térmico na realidade climática de Fortaleza. O organismo dos habitantes é acostumado a pouca variabilidade na amplitude térmica, o que torna incompatível um intervalo de 7 graus como limites para definir a condição de conforto térmica.

Assim, decidiu-se adotar a zona mais restritiva, onde 90% dos ocupantes estão satisfeitos, definida com 2,5 graus a mais e a menos da temperatura neutra determinada por este índice, sugerindo um maior rigor na avaliação das condições ambientais internas.

O valor busca retratar a situação de conforto térmico em uma região de elevadas taxas de umidade do ar durante a maior parte do tempo e, sobretudo, nos períodos mais quentes. Apesar do índice da ASHRAE não impor restrições à umidade do ar, de acordo com Pereira & Assis (2010), o índice de Humphreys (1978), cujo comportamento é semelhante, assume limites de apenas 1 grau para mais e para menos da temperatura neutra em localidades onde a umidade do ar é maior.

4.4. Conclusões do capítulo

Quanto à operacionalização das simulações CFD, constatou-se que, muito embora constitua parte importante para verificação da qualidade das simulações, o valor de *yplus* dentro do intervalo comentado em literatura não compromete a precisão dos dados de C_p sobre as fachadas. Face à dificuldade de atingir os valores recomendados, prioriza-se o fechamento das simulações e a adoção de malhas com valores aceitáveis de qualidade ortogonal e assimetria, como determinado na documentação do programa.

Contudo, frisa-se que uma camada de prismas será adotada em todas as simulações, tendo seu valor determinado de acordo com os testes de independência da malha e diante da possibilidade de atingir a convergência nos cálculos.

As recomendações presentes em RTQ-R (2012) direcionarão a organização das simulações computacionais de desempenho térmico do apartamento modelo. À exceção de alguns ajustes realizados em função de aspectos específicos da pesquisa, como as unidades escolhidas para modelagem detalhada ou o valor de U para as paredes externas do edifício, entre outros, as demais recomendações para habitações multifamiliares situadas na Zona Bioclimática 8 serão aplicadas às simulações.

Os resultados das simulações de desempenho térmico serão analisados com base percentual de horas dentro da zona de conforto estabelecida pelo índice escolhido, além da quantidade anual radiação solar absorvida em cada ambiente. O índice de conforto da ASHRAE 55 (2004) foi adotado em virtude da sua maior abrangência e atualização, inclusive com referência ao movimento do ar e sua influência sobre o conforto térmico.

5. Resultados das simulações computacionais

5.1. A ventilação natural urbana

Os resultados das simulações de ventilação natural nos quatro cenários urbanos são avaliados com base em aspectos qualitativos e quantitativos.

Do ponto de vista qualitativo, as análises são realizadas através de planos horizontais em três níveis diferentes: a 4,5 m, 34,5 m e 67,5 m do piso. Estes correspondem às alturas em que as correntes de ar atingem o centro das aberturas nos três pavimentos selecionados e permitem compreender os efeitos aerodinâmicos específicos que determinam o campo de pressão incidente sobre as três unidades residenciais avaliadas, constituindo os dados de entrada aplicados às simulações dos fluxos internos, apresentados na etapa seguinte.

Adicionalmente, utilizam-se planos verticais contendo o contorno de velocidades acrescido de vetores, além da visualização através de linhas de corrente para descrever tridimensionalmente os efeitos do vento em contato com as edificações em cada cenário representativo do adensamento urbano.

Alguns dados específicos em pontos de interesse são calculados. Estes são exportados para planilhas eletrônicas, apresentando graficamente os seus resultados. Avalia-se o C_p em função da pressão incidente no centro das janelas no primeiro, décimo primeiro e vigésimo terceiro pavimentos do edifício modelo e ao longo de uma linha na altura do pavimento. Ainda são discutidos o perfil vertical de velocidade do ar e a dissipação da energia cinética turbulenta, comparando o seu comportamento em determinados

trechos no domínio à situação de fluxo livre. O objetivo é avaliar a influência do nível de adensamento construtivo e verticalização de edificações em cada um dos quatro cenários urbanos sobre o comportamento do vento.

Os resultados para as duas incidências de vento simuladas são discutidos separadamente. Inicia-se com a análise dos dados obtidos com o vento na direção leste e, em seguida, com vento sudeste. Ao final da discussão de cada cenário são realizadas considerações gerais sobre os resultados das quatro configurações urbanas avaliadas.

5.1.1. Cenário 1

No primeiro cenário urbano, a ocupação do solo é feita, em grande parte, por edificações mais baixas, com um ou dois pavimentos, que utilizam praticamente toda a dimensão do terreno, totalizando uma taxa de ocupação (TO) de 39,2%. Além das quatro torres residenciais ao centro deste conjunto urbano, cinco edifícios altos estão presentes no contexto. Foi calculada uma altura média (AM) do cenário de 8,5 m, obtida como o quociente entre o volume total dos edifícios (m^3) pela área que ocupam no piso (m^2).

Como reflexo das condições de ocupação do solo, nos níveis próximos ao chão, o vento leste sofre efeitos de canalização mais perceptíveis nos eixos de vias. Também nos espaços entre os edifícios mais altos, localizados no centro do cenário, é possível perceber uma aceleração após o seu confinamento, como demonstram os contornos de velocidades combinados com vetores a 4,5 m do solo na figura 90, indicando, ao mesmo tempo, que o fluxo conseguiu atingir as fachadas do edifício modelo mesmo diante da baixa porosidade verificada neste nível.

Uma região de vórtices com aproximadamente 350 m de comprimento é formada a sotavento, demarcada em tons mais escuros de azul e cujas velocidades situam-se abaixo de 0,7 m/s. A quadra de maior taxa de ocupação, situada ao centro da primeira linha de quarteirões à frente do conjunto, produz uma área de estagnação do ar significativa na rua situada a imediatamente após esta. Tal aspecto reforça a obstrução causada por conjuntos que, apesar da menor altura, representam baixa porosidade.

Figura 90 – Visualização do vento leste a 4,5 m do solo no cenário 1

Devido à baixa verticalização do cenário 1, as alterações mais significativas no comportamento dos fluxos são percebidas nas regiões próximas aos edifícios mais altos, localizados ao centro deste cenário.

Neste nível, os edifícios modelo representam os principais obstáculos aos fluxos de ar, como evidenciado pela visualização de um plano a 34,5 m de altura (figura 91). Como consequência, o conjunto de quatro edifícios modelo é o responsável pela maior região de vórtices gerada na região a sotavento, cujo comprimento é superior a 300 m. Tal efeito deve-se ao fato do vento atingir as fachadas do edifício modelo sem grandes dificuldades. É possível perceber, também, que o espaçamento entre as torres diminui o impacto sobre essa zona de desaceleração, uma vez que permite um trecho de velocidades acima de 1,5 m/s em seu centro, cujas tonalidades de azul são mais claras ao centro. Ao acelerar o ar no espaço confinado entre estas, acaba reduzindo as dimensões da zona de desaceleração típica de áreas localizadas após obstáculos de grandes dimensões tanto verticais como horizontais.

Os outros cinco edifícios que possuem mais de dez pavimentos e que estão situados no canto inferior do cenário também alteram a permeabilidade do escoamento, porém com impactos restritos à região imediatamente posterior a estes. Somente a torre residencial localizada mais próxima ao edifício modelo, e em posição relativamente à frente deste, provoca um desvio na corrente de ar capaz de alterar o campo de pressões sobre a fachada do edifício modelo. Como é possível perceber na figura 91, o efeito de canto provocado por este obstáculo provoca um desvio no fluxo que incidiria imediatamente sobre o edifício modelo.

Figura 91 – Visualização do vento leste a 34,5 m do solo no cenário 1 com destaque para o desvio causado pelo edifício à frente do edifício modelo

No plano a 67,5 m do solo a influência da rugosidade é menor e, consequentemente, a velocidade do ar atinge valores mais altos. A zona de vórtices a sotavento é o efeito mais evidente, uma vez que os fluxos atingem as fachadas dos edifícios modelo sem qualquer interferência dos demais

obstáculos que compõem este arranjo urbano, o que contribui para imprimir maiores pressões sobre as aberturas (figura 92).

Figura 92 – Visualização do vento leste a 67,5 m do solo no cenário 1

O plano vertical descreve a altura da região de vórtices no trecho posterior ao conjunto de edifícios modelo, evidenciando a alteração no fluxo. Esta possui um pouco mais da altura do edifício, aproximadamente 80 m, diminuindo gradativamente à medida que se afasta deste, numa dimensão aproximada de 300 m, como demonstra a figura 93.

Figura 93 – Plano vertical ao centro do cenário 1 demonstra como o vento leste atinge os edifícios modelo e a formação da região de vórtices

As linhas de corrente reforçam o efeito de barreira provocado pelo conjunto de edifícios mais altos ao centro do cenário 1, que separam o fluxo dominante, produzindo um efeito de esteira em níveis mais baixos. Em detalhe é possível perceber a inversão do escoamento na base dessas torres residenciais. Os dois efeitos corroboram a criação de uma zona de menor intensidade do ar que se desenvolve na região a sotavento destes. Paralelamente, a condição de fluxo sem maiores obstáculos à frente dos edifícios modelo garante pressões mais elevadas sobre suas fachadas a barlavento (figura 94).

Figura 94 – A visualização através de linhas de corrente no plano geral e em detalhe reforçam os desvios causados pelos edifícios mais altos

Devido à influência da rugosidade do meio e aos efeitos aerodinâmicos determinados pelos obstáculos do cenário 1, observa-se que as edificações apresentam valores de C_p mais elevados em trechos mais altos das fachadas. Percebe-se, também, que os dois edifícios modelo atrás dos dois primeiros são comprometidos do ponto de vista do campo de pressões, como era esperado. Ainda, o edifício modelo a direita é menos obstruído do que o da esquerda, escolhido para as análises e destacado na figura 95. Tal característica gera valores de C_p diferentes entre as duas fachadas.

Figura 95 – Valores de C_p sobre as superfícies das edificações do entorno no cenário 1 com vento leste e destaca para o edifício modelo escolhido para as análises

⁴⁶ Informação discutida através de e-mail em 17/07/2014.

A incidência do vento leste é oblíqua à fachada principal dos edifícios modelo, gerando contornos de C_p assimétricos, como demonstra a figura 96. Na região central e mais alta da fachada, os contornos de C_p atingem valores mais elevados, próximos de 0,9, diminuindo à medida que se aproximam da borda, onde é possível verificar valores negativos. Sobre este aspecto, o Dr. Jorge Alberto Gil Saraiva alertou⁴⁶ que as limitações envolvidas nas análises numéricas, mais especificamente o refinamento da malha, tende a reproduzir valores negativos nesta posição, uma vez que *“esses modelos são uma tentativa de fechar as equações de conservação/transporte e, como tal, pressupõem sempre hipóteses que são de fluidos e têm muitas limitações junto das fronteiras sólidas”*. Trata-se de tema pouco recorrente em literatura, mesmo a específica, e que encontra dificuldade na sua reprodução em modelos analíticos em virtude das dimensões que as maquetes podem assumir em ensaios, impedindo a inserção de pontos de medição nesta área.

Figura 96 – Contornos de C_p sobre as fachadas principais dos edifícios modelos no cenário 1 com vento leste

O valor de C_p sobre a fachada principal com vento leste comportou-se como esperado, apresentando valores mais elevados no vigésimo terceiro pavimento, valores intermediários no décimo primeiro pavimento e mais baixos no primeiro pavimento, como indicam as linhas tracejadas ao longo da fachada. Destacam-se os valores de C_p negativos próximos do canto esquerdo do edifício, justamente onde está a janela da suíte do casal.

Figura 97 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 1 com vento leste

No cenário 1, apesar dos valores de C_p na fachada a barlavento se situarem dentro da normalidade, a sotavento é possível perceber variações específicas devido à posição dos edifícios. A partir do detalhe da figura 98 é possível inferir que, ao incidir sobre o edifício à frente, parte do fluxo sofre desvios, elevando-se acima do nível do edifício imediatamente após este primeiro. Outra parte, depois do desvio, incide sobre o edifício situado atrás, que redireciona o fluxo para baixo. Ao descer, as correntes apresentam velocidades menores, indicadas por trechos em azul escuro no detalhe, o que leva a uma distribuição desigual no campo de pressões.

Como reflexo, a diferença de pressão, discutida em literatura como a diferença entre o C_p de cada fachada (ΔC_p), comporta-se de maneira diferente nos diversos níveis. Tal fato decorre da posição dos obstáculos tanto a montante do fluxo como devido à distância daqueles localizados a jusante.

Figura 98 – Visualização em detalhe da redução na velocidade do ar nas partes mais baixas da fachada a sotavento devido ao desvio nos fluxos

Com o vento sudeste, há uma menor obstrução aos fluxos em relação ao vento leste, como mostra a figura 99. A 4,5 m do solo (figura 99), o vento percorre os espaços livres que correspondem às vias. Porém, devido à inclinação das correntes, as áreas de estagnação do movimento do ar diminuem de proporções, ocorrendo em pequenos trechos após os edifícios.

Figura 99 – Visualização do vento sudeste a 4,5 m do solo no cenário 1

A 34,5 m do solo, as maiores alterações impostas aos fluxos são devido ao conjunto de edifícios mais altos localizados justamente a sudeste do edifício modelo. Os desvios nos fluxos explicam a perda de pressão que diferencia os valores de C_p registrados com vento leste daqueles com vento sudeste, mesmo que não mudem as condições espaciais urbanas (figura 100).

Figura 100 – Visualização do vento sudeste a 34,5 m do solo no cenário 1

No nível mais alto, da mesma forma que ocorre com vento leste, somente os quatro edifícios modelo impõem alterações aos fluxos. A zona de formação de vórtices é, no entanto, menor nessa altura do que com o vento leste devido à inclinação das correntes de ar.

Figura 101 – Visualização do vento sudeste a 67,5 m do solo no cenário 1

O plano vertical demonstra que, devido à elevação dos fluxos que ocorre a partir do escalonamento dos edifícios localizados a sudeste do edifício modelo, a zona de vórtices gerada após este é menor do que com o vento leste. Contudo, as velocidades registradas são mais baixas nessa região de menores proporções em comparação ao vento leste (figura 102).

Figura 102 – Plano vertical no cenário 1 demonstra como o vento sudeste atinge os edifícios modelo e a formação da região de vórtices

Além da grande região de baixas velocidades a sotavento do conjunto edificado do cenário 1, a visualização através das linhas de correntes permite perceber o comportamento dos fluxos ao encontrar os edifícios altos no canto sudeste deste cenário. Em detalhe, na figura 103, a perturbação dos fluxos impede maiores pressões junto à base do edifício modelo.

Figura 103 – A visualização através de linhas de corrente no plano geral e em detalhe reforçam os desvios causados pelos edifícios mais altos a sudeste do conjunto

Em relação aos valores de C_p , é possível perceber na figura 104 que as maiores pressões ocorrem nos cantos dos edifícios do entorno em função do vento sudeste, que incide inclinado em relação às suas fachadas. Sobre a fachada do edifício modelo, no entanto, as variações específicas decorrem da presença de torres no canto sudeste do cenário 1.

Figura 104 – Valores de C_p sobre as superfícies das edificações do entorno e edifícios modelo no cenário 1 com vento leste

A linha de C_p apresenta comportamento oposto em comparação com a incidência leste, uma vez que os fluxos incidem com maior força no canto superior esquerdo da fachada principal, justamente onde se localizam as aberturas analisadas. Como resultado, os valores de C_p são mais elevados da esquerda para a direita, dos cantos para o centro da fachada do edifício modelo, como mostra a figura 105.

Os valores mais altos entre os casos são obtidos no vigésimo terceiro pavimento do cenário 1, em grande parte acima de 0,8. A alteração dos fluxos comentada anteriormente provoca uma redução ao longo da base do edifício modelo (primeiro pavimento). No pavimento intermediário, a modificação no comportamento dos fluxos impõe o efeito contrário, onde o valor de C_p aumenta ao longo da fachada, desde negativo até atingir acima de 0,3.

Figura 105 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 1 com vento sudeste

5.1.2. Cenário 2

A maior verticalização do cenário 2, conjunto urbano formado em sua maioria por edifícios residenciais em altura, determina baixas taxas de ocupação do solo em cada quadra. No geral, este cenário apresenta uma taxa de ocupação de 23,2%, a mais baixa entre os casos analisados, que contrasta com uma altura média de 30,3 m, por sua vez, a mais elevada entre os arranjos urbanos simulados.

Como reflexo direto desta forma de assentamento, de baixa TO e elevada AM, há uma permeabilidade maior aos fluxos. Diferentemente do cenário 1, o vento não é canalizado somente nos eixos das ruas, mas principalmente nos espaços entre os primeiros edifícios.

No plano horizontal a 4,5 m do solo é evidente a permeabilidade ao vento leste entre as edificações nas primeiras quadras. Até o meio do cenário, onde estão os edifícios modelo, ainda é possível verificar trechos com velocidades acima de 1,5 m/s. Assim, mesmo diante da expressiva presença de edifícios mais altos em comparação ao cenário 1, próximo do nível do solo, a intensidade dos fluxos não é tão comprometida, como evidenciam os intervalos de velocidade entre 0,4 m/s e 1,8 m/s em sua maioria. Contudo, ao analisar a forma como os fluxos atingem o edifício modelo, percebe-se que os desvios provocados pela massa construída situada em posição anterior a este são responsáveis por correntes que praticamente tangenciam sua fachada. Como resultado, o campo de pressões é reduzido.

Ainda que em meio ao cenário 2 existam poucas áreas de estagnação do ar, a zona de vórtices formada a sotavento é significativamente maior, ultrapassando os limites da figura 106.

Figura 106 – Visualização do vento leste a 4,5 m do solo no cenário 2

A 34,5 m do solo, muitos dos edifícios ainda estão presentes devido a maior verticalização deste cenário. Os efeitos aerodinâmicos devido à

presença dos edifícios altos são, portanto, mais perceptíveis, variando em função da posição de cada um em relação ao sentido do vento. Entre os diversos efeitos verificados, a diminuição da influência da rugosidade do piso torna mais evidente a aceleração nas bordas dos edifícios, a canalização no espaço entre estes e a formação de barreira quando estes têm suas fachadas maiores perpendiculares ao vento predominante (figura 107).

A formação da região de vórtices vai ganhando contornos mais precisos e, paralelamente, diminui devido à maior permeabilidade verificada nesta altura.

Mesmo diante da presença de diversos corredores formados entre os edifícios, as trajetórias do vento leste até atingir os edifícios modelo continuam bastante comprometidas neste nível. Sobretudo devido à presença de um edifício com a mesma altura (72 m) na quadra à frente do edifício modelo, os cursos são defletidos e incidem obliquamente à fachada, reduzindo significativamente o campo de pressões.

Figura 107 – Visualização do vento leste a 34,5 m do solo no cenário 2

A 67,5 m do solo os fluxos conseguem adentrar ainda mais intensamente no cenário 2, aspecto evidente pelas correntes com velocidades acima de 4,2 m/s entre os edifícios. Como resultado, as dimensões das áreas de estagnação do ar são visivelmente reduzidas, como é possível perceber na figura 108.

Contudo, a pressão incidente sobre a fachada do edifício modelo persiste bastante alterada devido ao efeito de barreira causado pelo edifício situado a barlavento. Apesar dos fluxos adentrarem até o meio deste cenário com maiores intensidades, ao encontrar o edifício à frente do edifício modelo, a série de desvios acaba gerando uma zona de vórtices na região anterior deste.

Figura 108 – Visualização do vento leste a 67,5 m do solo no cenário 2

O plano vertical reitera os efeitos até então verificados nos planos horizontais. É possível perceber, na figura 109, que os fluxos são alterados pela massa edificada como um todo. Diversas zonas de vórtices são formadas ao longo do eixo, reforçando que, para o vento leste, o cenário 2 apresenta um nível de obstrução bastante significativo.

Figura 109 – Plano vertical ao centro do cenário 2 demonstra como o vento leste atinge os edifícios modelo e como se formam vórtices na região posterior

A visualização através das linhas de corrente apresentada pela figura 110 reforça a maior permeabilidade do cenário 2. Ao mesmo tempo em que são melhor caracterizados os vórtices na região posterior, pode-se perceber, no detalhe, o grau de perturbação dos fluxos ao encontrar os edifícios modelo, o que concorre à redução do potencial de ventilação natural nos apartamentos quando os fluxos incidem de leste. Em detalhe o comportamento da região imediatamente à frente do edifício modelo, influenciada pela presença dos vórtices a barlavento deste

Figura 110 – A visualização através de linhas de corrente no plano geral e em detalhe reforçam os desvios causados pelo conjunto de edifícios

Como previsto, os valores de C_p na fachada a barlavento são negativos. De maneira geral, há uma uniformidade nos valores calculados, situados no intervalo entre -0,6 e -0,4. O fluxo de ar no interior do apartamento somente ocorre em função de valores ainda mais baixos verificados na fachada oposta. Na figura 111, as linhas sobre a fachada marcam a altura das aberturas nos três diferentes pavimentos e indicam valores entre -0,5 e -0,6 na fachada a barlavento, representados no gráfico.

Figura 111 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 2 com vento leste

Com o vento incidindo de sudeste, as áreas de baixas velocidades do ar no cenário 2, em tons de azul claro e escuro (abaixo de 1 m/s), ocorrem menos em meio aos edifícios comparadas ao vento leste. Mais especificamente, como mostra a figura 112, na região à frente do edifício modelo, no centro do cenário, verifica-se que os fluxos incidem obliquamente sobre a fachada e não a tangenciam como na incidência leste, o que contribui para um campo de pressões com maior intensidade sobre essa superfície.

Figura 112 – Visualização do vento sudeste a 4,5 m do solo no cenário 2

A 34,5 m do solo, o vento sudeste imprime a principal característica responsável pelo campo de pressões significativamente diferente do verificado com o vento leste: a formação de corredor devido aos primeiros edifícios, como destacado pelas linhas tracejadas sobre a figura 113, que determina que os fluxos incidam diretamente sobre o canto esquerdo do edifício modelo, contribuindo para elevar a pressão sobre a sua fachada.

Figura 113 – Visualização do vento sudeste a 34,5 m do solo no cenário 2

A 67,5 m do solo, o efeito específico da corrente que foi citado no nível intermediário persiste. Os fluxos que incidem sobre o canto do edifício modelo, após a alteração imposta pelo primeiro edifício alto a sudeste do conjunto, apresentam velocidades acima de 1,8 m/s.

Figura 114 – Visualização do vento sudeste a 67,5 m do solo no cenário 2

No plano vertical é possível perceber que o vento sudeste é direcionado para cima, reduzindo a força com que incidiria sobre o edifício modelo, cuja posição é destacada na figura 115. Contudo, nota-se no detalhe da mesma figura 115, o desvio devido a um edifício de altura mediana que acaba contribuindo para elevar a pressão na parte superior da fachada do edifício modelo.

Figura 115 – Plano vertical no cenário 2 demonstra como o vento sudeste atinge o edifício modelo e o desvio específico provocado pelo edifício à frente deste

As linhas de corrente descrevem como a abertura entre os primeiros edifícios contribui para elevar as pressões sobre o edifício modelo. Como destacado na figura 116, algumas correntes atravessam as edificações e atingem a fachada. Também nos demais edifícios, o valor de C_p é mais elevado justamente próximo do canto devido à incidência de vento inclinada.

Figura 116 – As linhas de corrente reforçam a maior permeabilidade do cenário 2 ao vento sudeste que contribui para pressões positivas na fachada do edifício modelo

No trecho onde se localizam as janelas, próximo do canto esquerdo do edifício modelo, o valor de C_p varia bastante entre os pavimentos. Ainda é negativo no primeiro pavimento em função dos desvios sofridos pelos fluxos, elevando-se no décimo primeiro pavimento e atinge valores acima de 0,15 no vigésimo terceiro, notadamente na área próxima à janela da suíte, e segue caindo à medida que se afasta da aresta, como descreve a figura 117.

Figura 117 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 2 com vento sudeste

5.1.3. Cenário 3

O cenário 3 é formado, em sua maioria, por edifícios com altura variando entre 15 m e 35 m. A TO de 24% é um pouco mais alta do que a verificada no cenário 2, porém com altura média 9 m menor do que este último, calculada em 21,5 m.

O alinhamento de uma série de prédios, com suas fachadas maiores em oposição ao vento dominante e situados na linha de frente, contribui para a formação de corredores nos eixos das ruas, como é possível verificar na visualização a 4,5 m do solo (figura 118).

Contudo, se comparado ao comportamento do vento no cenário 1, neste nível não são verificados tantos trechos com velocidades mais baixas. Em relação ao cenário 2, as regiões em tons de azul mais escuro, que caracterizam velocidades abaixo de 0,4 m/s, são um pouco mais recorrentes nos espaços entre os edifícios no cenário 3, uma vez que a taxa de ocupação é um pouco mais alta. Especificamente, a zona de vórtices após o conjunto edificado está situada no espaço entre as últimas edificações que compõem o cenário 3 e se arrasta por cerca de 5 km em um contorno mais esguio, observando-se a imagem inteira no programa e que foi recortada a seguir. No cenário 2, por sua vez, a região de vórtices apresenta uma configuração mais larga e que se estende por mais de 7 km, aproximadamente.

Mais importante, no entanto, é destacar que, mesmo no nível próximo ao solo e diante dos obstáculos à frente, é possível perceber na figura 118 que os fluxos conseguem atingir a fachada do edifício modelo. A partir dos efeitos de canto, demarcados em verde claro e cujas velocidades estão acima dos 2 m/s, é que caracteriza-se o contato do vento com as fachadas dos edifícios ao centro do cenário.

Figura 118 – Visualização do vento leste a 4,5 m do solo no cenário 3

A 34,5 m de altura é evidente a maior permeabilidade do cenário 3 em relação ao cenário 2, uma vez que poucas edificações atingem alturas superiores aos 30 m. Assim, percebe-se uma grande corrente formada no espaço entre dois edifícios mais à frente do conjunto edificado que compõe

este cenário, um em forma de “x” e outro de planta próxima a um triângulo. Esta situação forma um corredor para entrada dos fluxos até o centro do cenário. Na área destacada pelo círculo, ainda são verificadas velocidades acima de 3,5 m/s antes de atingirem o edifício modelo (figura 119).

Figura 119 – Visualização do vento leste a 34,5 m do solo no cenário 3 com destaque para o corredor de vento formado entre os edifícios

A rarefeita presença de edificações da mesma altura do edifício modelo é evidenciada no plano a 67,5 m do solo. Esta situação garante que o vento atinja as fachadas com velocidades ainda mais elevadas, próximas de 4,0 m/s. Na figura 120, destaca-se a posição específica de um edifício que, inclinado em relação ao vento leste, altera a incidência do vento sobre as fachadas dos edifícios modelo. Como resultado, os valores de C_p são bastante alterados do edifício modelo mais próximo. A área de desaceleração dos fluxos na região a sotavento do cenário 3 apresenta proporções semelhantes às aquelas verificadas no cenário 2, apesar da maior verticalização deste último.

Figura 120 – Visualização do vento leste a 67,5 m do solo no cenário 3

O plano vertical descreve a elevação da camada limite em função da presença das edificações que compõem o cenário 3. A visualização dos fluxos através da figura 121 permite compreender, também, como a presença de edifícios de altura média possibilita que os fluxos atinjam a fachada do edifício modelo. É possível perceber uma zona com velocidades um pouco acima daquelas verificadas nesse mesmo trecho no cenário inicial.

Figura 121 – Plano vertical ao centro do cenário 3 demonstra como os fluxos atingem os edifícios modelo e a região de vórtices

A visualização através das linhas de corrente permite detalhar os efeitos provocados pelos edifícios, como os fluxos que compõem a zona de vórtices atrás dos edifícios modelo e sobre a última linha de quadras ao final do cenário. No detalhe, as edificações mais baixas à frente do edifício modelo, ainda que próximas, permitem a passagem dos fluxos, que atingem a fachada deste. Um efeito de esteira nos níveis mais baixos do edifício modelo ocorre devido à barreira formada por estes. Este aspecto diferencia-se do verificado no cenário 2, ocorrendo de maneira semelhante ao cenário 1, mesmo diante de taxa de ocupação e altura média bastante diferentes (figura 122).

Figura 122 – Linhas de corrente no plano geral e em detalhe reforçam os desvios devido ao conjunto de edifícios e o efeito esteira à frente do edifício modelo

Apesar dos valores de C_p sobre as fachadas a barlavento comportarem-se como esperado, com valores mais elevados nos pontos altos e reduzidos próximos ao solo, a obstrução provocada pelos obstáculos à frente dos edifícios modelo determina contornos de C_p diferentes do que foi visto nos cenários 1 e 2. O vento leste, que incide obliquamente à fachada, gera um comportamento assimétrico. Diferentemente do verificado no cenário 1, a área com valores mais altos se concentra sobre o edifício modelo à esquerda, justamente a região onde localizam-se os pontos de interesse.

Figura 123 – Contornos de C_p sobre as fachadas dos edifícios modelos no cenário 3

Especificamente, as linhas de C_p sobre a fachada do edifício modelo para o vento leste indicam valores um pouco mais elevados do que os verificados no cenário 1, sobretudo para os pavimentos mais alto (23°) e mais baixo (1°), enquanto foram menores no pavimento intermediário (11°). A presença de uma borda negativa persiste, como já discutido em outras seções, e valores máximos, em torno de 0,8, são verificados em maior quantidade do que no cenário 1. O que se destaca, no entanto, é a verificação de valores até mais elevados neste cenário em comparação com o cenário inicial. Tal fato deve-se à posição específica de alguns dos obstáculos à frente deste, como já comentado. Muito embora este cenário apresente uma verticalização significativamente maior em comparação com o cenário 1, os fluxos parecem atravessar os espaços entre as edificações e atingir a fachada do edifício modelo, diferentemente do que ocorre no cenário 2.

Figura 124 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 3 com vento leste

Apesar da tendência de velocidades do ar mais elevadas com o vento sudeste verificada nos demais arranjos urbanos, o cenário 3 foge à regra no nível mais próximo do chão (4,5 m do solo). Na figura 125 são percebidos mais trechos com velocidades abaixo de 1 m/s em comparação ao vento leste. O que ocorre é que a proximidade dos edifícios passa a representar mais obstáculos aos fluxos inclinados, somente fluindo através do eixo das vias.

Figura 125 – Visualização do vento sudeste a 4,5 m do solo no cenário 3

A 34,5 m do solo os fluxos encontram mais áreas de passagem. Contudo, percebe-se uma situação diferente do que ocorre com vento leste, na qual dois edifícios direcionam e até mesmo aceleram parte dos fluxos até a fachada do edifício modelo com cerca de 2,5 m/s. Com o vento sudeste, os desvios devido aos obstáculos nessa altura impedem maiores velocidades do ar à frente deste, em torno de 1,4 m/s (figura 126).

Figura 126 – Visualização do vento sudeste a 34,5 m do solo no cenário 3

No nível mais alto analisado, por sua vez, a maior intensidade do vento sudeste não encontra obstáculos até incidir sobre o edifício modelo. Um campo de velocidades acima de 4 m/s é verificado imediatamente à frente deste, com reflexos na pressão sobre a fachada e suas aberturas. Após o conjunto edificado, a região de vórtices tem formato mais alongado e dimensões menores do que o visto com o vento leste.

Figura 127 – Visualização do vento sudeste a 67,5 m do solo no cenário 3

O plano vertical descreve a obstrução causada pela edificação mais baixa que o edifício modelo localizada cerca de 200 m a frente deste. Devido às suas dimensões, é possível perceber dois efeitos: a diminuição na intensidade das correntes até a metade da fachada do edifício modelo, marcado no detalhe, e, ao mesmo tempo, a aceleração do fluxo que incide próximo ao seu topo. No detalhe da figura 128, destaca-se a elevação na camada limite devido a este mesmo edifício.

Figura 128 – Plano vertical ao centro do cenário 3 demonstra como o comportamento do vento sudeste é modificado pelos edifícios à frente do edifício modelo

Através das linhas de corrente, ressalta-se o efeito de direcionamento devido à posição de alguns dos obstáculos. Após os edifícios mais baixos, o vento sudeste é direcionado pelo edifício inclinado em destaque na figura 129 para percorrer o espaço entre as edificações, também destacado, e atingir a fachada do edifício modelo. Percebe-se que os contornos de C_p com valores mais elevados situam-se nos cantos dos edifícios deste cenário.

Figura 129 – A visualização através de linhas de corrente reforça os desvios devido ao conjunto de edifícios mais à frente e o direcionamento dos fluxos vindos de sudeste

Especificamente em relação ao C_p , se com o vento leste os valores foram altos e próximos nos diferentes níveis, com o vento sudeste ocorre uma maior diferenciação entre os pavimentos. No vigésimo terceiro pavimento atingem-se valores mais elevados e, devido aos efeitos já discutidos, o valor no décimo primeiro pavimento é pouco acima de 0,2 na região das janelas, sendo abaixo de 0,15 no primeiro pavimento, como indica a figura 130.

Figura 130 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 3 com vento sudeste

5.1.4. Cenário 4

O cenário 4 apresenta a mais elevada TO entre os arranjos urbanos avaliados, calculada em 64,4%. A AM das edificações não é expressiva, calculada em torno de 9 m, pouco acima daquela verificada no cenário 1.

Tal configuração urbana, que ocupa o solo de maneira extensiva em comparação aos demais cenários, produz impactos sobre o escoamento do ar. No plano a 4,5 m do solo é possível perceber que os fluxos somente encontram passagem nos eixos das vias e, neste nível, praticamente todo o conjunto urbano está envolvido em velocidades abaixo de 1,4 m/s, com diversos trechos onde a velocidade do ar é ainda mais baixa, à semelhança do cenário inicial.

Contudo, mesmo diante de uma taxa de ocupação cerca de três vezes maior do que o cenário 2, o vento ainda consegue incidir sobre as fachadas do edifício modelo, como pode-se perceber pelos desvios sofridos pelo fluxo, gerando efeitos de canto junto às arestas dos edifícios modelo ao centro do cenário (figura 131).

Figura 131 – Visualização do vento leste a 4,5 m do solo no cenário 4

A ausência de edifícios com altura superior a 30 m é evidenciada no plano a 34,5 m do solo. Consequentemente, os fluxos atingem a fachada do edifício modelo sem sofrer desvios ou quaisquer efeitos significantes além da influência do nível de rugosidade imposto pelo meio, como é possível perceber pela figura 132.

Entretanto, antes de atingir a fachada do edifício modelo, verifica-se um trecho com vento de intensidade até 1,8 m/s, valores abaixo daqueles verificados nesta mesma posição nos cenários 1 e 3. Tal fato deve-se, em grande parte, à maior taxa de ocupação e nível de rugosidade impostos por esta forma urbana, apesar de inexistirem obstáculos na mesma altura da janela do décimo primeiro pavimento. Sobre tudo no cenário 3, a presença de edifícios em posição específica gerou condições específicas que favoreceram as correntes de ar, contribuindo para um campo de pressões mais elevado nesse nível em comparação ao cenário 4, menos verticalizado.

Figura 132 – Visualização do vento leste a 34,5 m do solo no cenário 4

A 67,5 m do piso, nível livre de obstáculos, eram esperados valores maiores de velocidade do ar em comparação aos demais cenários, o que ocorre somente nas laterais do domínio. Contudo, pode-se concluir que a velocidade do ar próximo aos edifícios modelo no cenário 4 somente é mais baixa nesse nível em comparação ao cenário 3 devido à ausência de elementos que direcionem o fluxo da forma como ocorre neste último.

Figura 133 – Visualização do vento leste a 67,5 m do solo no cenário 4

A ocupação mais intensa do solo pode provocar alterações mais significativas mesmo diante de obstáculos de menor porte. Uma vez que o fluxo somente encontra passagem entre as vias, ao entrar em contato com os edifícios nas primeiras quadras, ainda que estes apresentem pouca altura (12 m), o fluxo é desviado para cima, como demonstra o plano vertical (figura 134).

Figura 134 – Plano vertical evidencia a ausência de obstáculos mais altos para o vento leste

A visualização através das linhas de corrente (figura 135) permite apreender melhor o efeito de elevação nas correntes que resulta da maior ocupação do nível do solo. Como reflexo, o campo de pressões é mais elevado nas partes mais altas da fachada principal.

Figura 135 – A visualização através de linhas de corrente no plano geral reforça a elevação nos fluxos devido aos desvios causados pelos primeiros edifícios

Em relação à pressão sobre a fachada, os efeitos descritos anteriormente determinam uma área com valores mais elevados em posição mais concentrada do que o que foi visto nos cenários 1 e 3, como pode-se perceber através dos contornos de C_p (figura 136). Novamente, destaca-se o papel do entorno na alteração do campo de pressões sobre as fachadas. Ainda que os resultados situem-se dentro de intervalos próximos, há uma clara diferença na distribuição da intensidade com que os fluxos atingem a fachada.

Figura 136 – Contornos de C_p sobre as fachadas principais dos edifícios modelos no cenário 4

O comportamento dos valores de C_p são semelhantes ao cenário 3 para a primeira incidência de vento, porém um pouco mais baixos, principalmente no pavimento mais alto (23°). Os valores de C_p no pavimento intermediário (11°) são cerca de 0,15 mais baixos do que no cenário 3 porém ainda acima do cenário 1 cerca de 0,2. O decréscimo no C_p sobre as aberturas do primeiro pavimento ocorre de forma semelhante ao cenário 3, apesar das diferenças morfológicas entre os dois. Tais características reforçam, então, o resultado dos desvios sofridos pelos fluxos.

Figura 137 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 3 com vento leste

Devido a maior ocupação do solo no cenário 4, o vento sudeste encontra as mesmas dificuldades para atravessar o conjunto edificado verificadas para a primeira incidência de vento. A maior diferença está na área

de formação de vórtices. Em grande parte, os fluxos somente encontram passagem no espaço das vias. Como reflexo, a velocidade do ar na região à frente do edifício modelo situa-se em torno de 1 m/s, valor semelhante ao registrado com o vento leste (figura 138).

Figura 138 – Visualização do vento sudeste a 4,5 m do solo no cenário 4

Como esperado, em função da altura dos edifícios do entorno, os fluxos no plano a 34,5 m do solo demonstram o impacto causado pelos edifícios modelo, isolados neste nível acima do solo. O campo de velocidades imediatamente à frente da fachada principal é em torno de 2,5 m/s. Os efeitos de canto nos dois edifícios demonstram que, neste plano, os fluxos somente são alterados ao encontrar estes obstáculos, como demonstra a figura 139.

Figura 139 – Visualização do vento sudeste a 34,5 m do solo no cenário 4

Também no plano a 67,5 m do solo inexistem obstáculos que alterem as condições de ventilação natural. Neste nível, a velocidade do ar na região anterior ao plano da fachada situa-se em torno de 3,2 m/s. Os efeitos de canto perdem um pouco de expressividade, assim como a região de vórtices, que é ainda menor em relação ao nível intermediário (34,5 m do solo), com apenas alguns trechos onde a velocidade do ar está abaixo de 0,3 m/s (figura 140).

Figura 140 – Visualização do vento sudeste a 67,5 m do solo no cenário 4

O plano vertical evidencia a pouca obstrução aos fluxos. Apesar da elevação nas correntes, ainda que pouco expressiva, os primeiros edifícios apenas alteram a incidência sobre a parte mais baixa do edifício modelo, como é possível perceber na figura 140.

Figura 141 – Plano vertical demonstra a alteração dos fluxos de sudeste devido a presença dos edifícios à frente do edifício modelo.

À semelhança do que ocorre com o cenário 1, a ausência de edifícios altos faz com que os edifícios modelo ao centro do cenário criem um efeito de barreira. Como se percebe na figura 142, valores de C_p mais elevados são registrados nos cantos do edifício modelo em função da incidência de vento inclinada em relação à fachada.

Figura 142 – Visualização através de linhas de corrente no plano geral reforça o efeito de barreira dos edifícios modelo

Como esperado, a condição menos obstruída do cenário 4 faz com que os valores de C_p sejam elevados. Devido à inclinação do vento, os picos ocorrem no canto esquerdo superior da fachada. Mais especificamente, no vigésimo terceiro pavimento, próximo da região das janelas, o C_p atinge os mais altos valores para este cenário, em torno de 0,6. A pressão diminui no pavimento intermediário, onde o C_p se situa em torno de 0,4. No primeiro pavimento os valores são ainda mais baixos, entre 0,1 e 0,3, como mostra a figura 143.

Figura 143 – Variação do C_p ao longo das linhas que marcam as aberturas de entrada do ar no cenário 4 com vento sudeste

5.1.5. Sobre os resultados das simulações de ventilação urbana

Em relação aos resultados das simulações de ventilação urbana é necessário destacar que, apesar da escolha criteriosa de cada um dos quatro cenários urbanos, determinados obstáculos ganharam maior importância no contexto das análises.

Buscou-se avaliar as condições de ventilação natural em configurações urbanas reais e cuja uniformidade ou padrões da morfologia urbana se diferenciavam significativamente entre si. Com isso seria possível analisar os resultados a partir de premissas comumente encontradas em literatura sobre o comportamento do vento em contato com obstáculos. Esperava-se, por exemplo, que em cenários de menor verticalização as correntes se apresentassem menos alteradas e, portanto, mais intensas, enquanto arranjos urbanos verticalizados e obstruídos determinariam fluxos mais comprometidos e supostamente permeados por trechos de velocidades mais baixas, que imprimiriam baixas pressões sobre as fachadas. Contudo, tais expectativas foram significativamente alteradas em função de efeitos aerodinâmicos específicos impostos por alguns elementos presentes nestes.

Pode-se citar a formação de um corredor para o vento leste entre edifícios do cenário 3, como destacado na figura 144. Este é responsável pela aceleração e reorientação de boa parte dos fluxos, contribuindo para elevar o nível de pressão sobre a fachada do edifício modelo, que desponta como um dos mais altos valores de C_p entre os casos analisados.

Figura 144 – Formação de espécie de corredor para os fluxos de leste no cenário 3

Situação semelhante quanto à especificidade da posição de obstáculos, porém com efeito oposto, foi verificado no cenário 1. Os três edifícios altos situados à frente do edifício modelo e destacados na figura 145 contribuíram para reduzir o campo de pressões sobre sua fachada naquele que seria um arranjo urbano com possibilidades de valores de C_p tão elevados quanto no cenário 4, também sob condições menos obstruídas. No entanto, com vento sudeste, sobre as janelas da suíte, do dormitório e da sala, são verificados níveis entre 11% e 47% menores no pavimento mais baixo no

cenário 1. Em comparação ao cenário 3, mais obstruído, as diferenças são entre 9% e 118%.

Figura 145 – Influência dos poucos edifícios altos presentes no cenário 1 sobre o campo de pressões na fachada do edifício modelo

A separação nas correntes de leste provocada por alguns poucos edifícios mais altos no cenário 4, marcados na figura 146, impediu valores mais elevados de C_p nos pavimentos mais baixos do edifício modelo mesmo diante de um menor nível de obstrução ao vento. Devido a isso, os valores situam-se bastante próximos àqueles registrados no cenário 3. O efeito ganha maiores proporções, sobretudo, devido à ausência de outros espaços além das vias para passagem dos fluxos neste cenário urbano.

Figura 146 – Elevação na camada limite devido a presença de edifícios um pouco mais altos que os demais no cenário 4

Tais constatações, além de outros efeitos percebidos, porém não detalhados, reforçam o papel indissociável do contexto urbano nas simulações CFD, ensaios em túnel de vento ou outras análises para determinar os valores de C_p sobre as aberturas de edifícios. No conjunto das oito simulações de vento reforçou-se a premissa de que o entorno imediato do edifício, compreendido pelos obstáculos que compõem a morfologia urbana, é determinante para o campo de pressões sobre as superfícies das edificações. Assumir valores médios de C_p , oriundos de bibliotecas padrão ou pré-determinados segundo métodos redutivos ou simplificados pode não corresponder ao potencial de ventilação natural daquela situação.

Também é possível concluir que contextos urbanos formados por edifícios baixos não significam, necessariamente, maiores valores de C_p , como indicado pelo conjunto de dados gerados para os cenários 1 ou 4, assim como o contrário para arranjos verticalizados também não pode ser assumido como condição invariável. Na discussão dos resultados em cada conjunto urbano escolhido discorreu-se, principalmente, sobre como em níveis mais elevados de adensamento urbano através da verticalização é possível atingir valores de C_p próximos daqueles verificados em situações menos densas, como verificado no cenário 3 e em algumas situações envolvendo o cenário 2.

Embasando tal constatação está a importância de simular, no mínimo, duas direções de vento predominantes. Desde que existam registros meteorológicos que indiquem a ocorrência significativa de mais de uma direção de vento na localidade, reforça-se a necessidade de simular tal variação, uma vez que seus reflexos na forma como os fluxos atravessam os obstáculos do meio urbano é estruturalmente diferente.

As análises contemplando tal variação, que em Fortaleza ocorre continuamente durante o dia, porém sempre dentro do quadrante leste-sudeste (Leite, 2010), associadas às já citadas especificidades da morfologia urbana, permitiram condições de ventilação natural por ação dos ventos mesmo em casos onde a expectativa era por precárias condições de pressão sobre a fachada principal do edifício modelo. Sobretudo no cenário 2, com o vento incidindo a 135° , a diferença em relação ao vento leste é significativa. O vento sudeste permitiu um campo de pressões positivo no décimo primeiro pavimento e vigésimo terceiro, além de uma maior diferença de pressão entre as duas fachadas no primeiro pavimento, ainda que negativas. Por outro lado, no cenário 3, as características de posicionamento dos edifícios que foram fundamentais para elevar o campo de pressões com o vento leste, não funcionaram com o vento sudeste.

Como forma de reforçar a proximidade dos resultados de C_p , procede-se, agora, a uma análise comparando os valores obtidos em cada um dos três níveis analisados nos quatro cenários urbanos e segundo a incidência de vento. Utilizam-se, novamente, as linhas de C_p sobre cada pavimento com o objetivo de analisar o comportamento da pressão naquele nível.

No primeiro pavimento, com o vento leste, o cenário 4 apresenta os mais altos valores próximos ao canto do edifício modelo (a esquerda do gráfico), onde se localizam as janelas. Os valores são discretamente mais elevados do que àqueles obtidos no cenário 3. A borda negativa existe em todos os casos. Contudo, o mais importante é notar a influência do conjunto de edifícios mais altos responsável por diminuir o valor de C_p no cenário 1. Neste cenário, as pressões mais altas sobre a fachada somente são alcançadas no canto oposto, sobressaindo-se em relação aos demais. O cenário 2 determina valores de C_p bem mais baixos, como verifica-se na figura 147.

Figura 147 – Comparação dos valores de C_p para o primeiro pavimento com vento leste entre os quatro cenários urbanos

No décimo primeiro pavimento são mantidas as características vistas no primeiro pavimento. Os cenários 3 e 4 seguem com linhas de C_p bastante próximas, somente havendo diferenças no canto direito da fachada do edifício modelo. O cenário 1 ainda apresenta valores de C_p mais baixos, sobretudo próximo da região das janelas, enquanto que os valores no cenário 2 são todos abaixo de -0,5.

Figura 148 – Comparação dos valores de C_p para o décimo primeiro pavimento com vento leste entre os quatro cenários urbanos

No vigésimo terceiro pavimento as diferenças são mais perceptíveis. Os valores são, em geral, mais elevados, como esperado em virtude da maior altura em relação ao solo. O cenário 3 desponta com dados de C_p cerca de 15% mais altos do que os valores obtidos no cenário 4 e, em relação ao cenário 1, as diferenças são em torno de 25% maiores. Mais uma vez, os valores são altos no canto direito, em oposição à borda negativa à esquerda e próximo das aberturas, efeito que se deve à inclinação dos fluxos de leste em relação ao plano da fachada, como demonstra a figura 149.

Figura 149 – Comparação dos valores de C_p para o vigésimo terceiro pavimento com vento leste entre os quatro cenários urbanos

O conjunto de três comparações realizadas anteriormente reforçam a influência dos obstáculos que, paralelamente, impediram valores de C_p mais altos no caso do cenário 1 e elevaram o campo de pressões no cenário 3. As condições de obstrução do cenário 2 impedem melhores condições de ventilação natural quando o vento incide de leste, cabendo o questionamento do que ocorre a sotavento para que, diante de pressões ainda mais baixas ali verificadas, o ar possa fluir através do apartamento.

O vento incidindo de sudeste provoca diferenças maiores nos valores de C_p entre os cenários em relação ao que foi visto com o vento leste. Nesta direção de vento, o campo de pressões comportou-se mais como esperado. Os cenários com menores níveis de obstrução obtiveram valores mais elevados de C_p , como ocorre no primeiro pavimento (figura 150). O cenário 4 apresenta um comportamento bastante uniforme, no qual, após as bordas negativas, o valor eleva-se no meio da fachada. Nos demais casos, a intensidade do campo de pressões é maior no canto direito. No cenário 1, na região próxima das janelas, os valores situam-se acima de 0,1, um pouco abaixo dos valores alcançados pelo cenário 3, bem mais obstruído. O cenário 2, novamente, apresenta os menores valores de C_p , ainda negativos.

Figura 150 – Comparação dos valores de C_p para o primeiro pavimento com vento sudeste entre os quatro cenários urbanos

A uniformidade da linha de C_p verificada no pavimento mais baixo em meio ao cenário 4 não é mais percebida no décimo primeiro pavimento. Os valores obtidos no cenário 4 ainda são mais elevados, boa parte acima dos 0,6, porém agora decrescem à medida que caminham para a direita da fachada, afastando-se da região das janelas. Os mais altos níveis à esquerda da fachada principal decorrem do vento incidindo inclinado em relação à fachada, com maiores pressões sobre este canto.

No cenário 1, também menos obstruído, são obtidos valores mais elevados em relação aos cenários 2 e 3. O principal aspecto percebido com a segunda incidência de vento simulada é a presença de valores positivos no cenário 2, em torno de 0,15 na região das aberturas, como demonstra a figura 151.

Figura 151 – Comparação dos valores de C_p para o décimo primeiro pavimento com vento sudeste entre os quatro cenários urbanos

Finalmente, no vigésimo terceiro pavimento, a maior liberdade aos fluxos permitida pelos cenários 1 e 4 é reforçada pelos valores acima de 0,8 na região das aberturas. A menor influência da rugosidade imposta pelo meio também determina valores bem mais altos para os cenários 2 e 3, com níveis em torno de 0,3 e 0,2, respectivamente, como demonstra a figura 152.

Figura 152 – Comparação dos valores de C_p para o vigésimo terceiro pavimento com vento sudeste entre os quatro cenários urbanos

As linhas de C_p sobre os três pavimentos escolhidos confirmam aspectos fundamentais discutidos em literatura acerca dos fatores que influenciam a intensidade com que o vento atinge os edifícios. Apesar de constituir um dos principais objetivos desta tese, e a despeito da tentativa de cobrir todos os aspectos com a consideração da morfologia urbana e do ângulo de incidência, outros fatores ainda podem ser incluídos em outros momentos, como a orientação do edifício, que foi fixada no item 3.2.

Ainda, a opção por utilizar todo o potencial construtivo da quadra ao centro de todos os cenários e onde foram locados quatro edifícios modelo, tendo-se optado pelo edifício mais a sul/leste para avaliações mais detalhadas, também influencia o campo de pressões sobre este. A posição dos dois edifícios imediatamente atrás dos dois primeiros implica na forma como os fluxos se comportam ali e dão margem a análises futuras do que as correntes poderiam reservar a estes edifícios, em princípio mais prejudicados do ponto de vista do potencial de vento. Entretanto, é possível observar na figura 116 que, com o vento sudeste, o edifício atrás obtém um campo de pressões mais elevados do que o edifício a sua frente. Mais uma vez, a questão da forma urbana se põe à frente da discussão sobre os valores de C_p .

Nesse sentido, buscou-se um recurso prático e objetivo para demonstrar, visualmente, o quanto os edifícios obstruem o percurso dos fluxos antes de atingirem as janelas na fachada a barlavento. Uma ferramenta capaz de fornecer imediatamente este tipo de informação é a máscara de obstrução devido ao entorno, em projeção estereográfica, por exemplo.

Comumente utilizadas para análises de insolação, tais máscaras permitem apreender, em parte, o nível de rugosidade e porosidade que caracteriza o conjunto de edificações no entorno imediato do edifício modelo em cada cenário. Estas foram elaboradas no programa *Ecotect Analysis 2011* (AUTODESK, 2010) a partir da fachada principal nos três diferentes pavimentos. Sobre cada máscara de projeção, reunidas na figura 153, foram tracejadas as duas direções de vento predominantes.

A maior obstrução do cenário 2 em todos os níveis é evidente. No entanto, no cenário 1, observa-se a presença de edifícios altos a leste e, principalmente, a sudeste do edifício modelo, apesar do predomínio de edificações mais baixas. Estes edifícios presentes no cenário inicial explicam valores de pressão mais baixos em comparação com o cenário 3, por exemplo. Ainda, no décimo primeiro pavimento, o nível de obstrução a sudeste no cenário 1 é maior do que no cenário 3 e até mesmo discretamente superior ao verificado no cenário 2, bem mais verticalizado, o que explica valores de C_p próximos entre estes três cenários, como também pode-se perceber a partir das máscaras de obstrução.

Faz-se mais importante observar que no décimo primeiro pavimento do cenário 3, apesar de alguns obstáculos na periferia do edifício modelo, o os fluxos de leste ou sudeste já não encontram obstáculos até atingirem a fachada, elevando a pressão incidente. Com isso é possível explicar os valores mais elevados neste cenário em grande parte dos casos.

O cenário 4 apresenta o menor nível de obstrução entre as configurações urbanas analisadas. A alta taxa de ocupação do solo e, portanto, a pouca permeabilidade às correntes de ar, pode ser percebida no nível mais baixo com o preenchimento de todos os espaços na periferia da máscara de obstrução. Já a partir do pavimento intermediário, diferentemente de todos os demais casos, inexistem obstáculos ao vento.

Figura 153 – Conjunto de máscaras do entorno por pavimento e para cada cenário urbano

Muito embora o valor de C_p sobre a fachada principal do edifício modelo constitua parte fundamental das análises sobre o vento, como é sabido, mais importante do que a capacidade isolada de ventilar a fachada voltada para a incidência predominante, o potencial de ventilação natural é função da diferença entre as pressões que incidem sobre as fachadas onde se localizam as aberturas. A diferença entre os valores de C_p nas aberturas a barlavento e a sotavento (ΔC_p) constitui uma das variáveis de maior influência no processo de ventilação natural em edifícios.

Ainda, devido à série de fatores que levaram a condições específicas de ventilação natural urbana nos assentamentos urbanos escolhidos já descritas neste e em outros momentos, em alguns casos foi possível verificar também diferenças específicas no ΔC_p . Em algumas situações, como nos cenários 1 e 4, foram verificados valores elevados de pressão positiva a barlavento que não corresponderam, necessariamente, a valores negativos proporcionais a sotavento. Tais resultados contrastaram com situações no cenário 3, em que a diferença de pressão entre as duas fachadas foi maior. O efeito, que leva a maiores taxas de vazão de ar, dá indícios da influência dos elementos a sotavento do edifício modelo, como indicado na figura 98. A posição dos obstáculos atrás do edifício modelo parece influir mais em casos menos obstruídos do que naqueles em que os fluxos já atingem a fachada mais alterados.

Uma vez que o apartamento modelo dispõe de três janelas a barlavento e três a sotavento, todas com áreas de abertura diferentes, a diferença de C_p foi assumida como a média ponderada pelas áreas das aberturas para entrada do vento e aquelas que funcionam como saídas de ar, calculada em planilha eletrônica. Esta forma de cálculo foi discutida no item 4.1.1.5.

Nos resultados das simulações com o vento leste, que incide próximo da perpendicularidade sobre a fachada do edifício modelo, em todos os cenários os valores foram mais elevados no pavimento mais alto, como esperado em função da menor influência da rugosidade e dos efeitos aerodinâmicos impostos pelos obstáculos. Percebe-se, contudo, a presença de uma zona de pressões mais baixas próximo da metade da altura do edifício modelo em todos os quatro casos simulados. Comparando-se os dados do primeiro pavimento aos do décimo primeiro, é possível perceber valores mais altos no nível mais baixo da fachada, reforçando a existência de uma zona de menor pressão próxima à meia altura do edifício. Conclui-se, assim, que em fachadas de edifícios multifamiliares em altura, uma posição mais elevada em relação ao solo nem sempre significa um campo de pressões mais elevado.

Em relação à morfologia urbana, no cenário 3 os valores de diferença de C_p foram os mais altos em quase todos os pavimentos analisados. As diferenças apresentadas pelo cenário 4 foram próximas daquelas verificadas no cenário 1, mesmo que este último apresente características morfológicas bem diferentes. No cenário 2 são verificados alguns corredores de vento que, muito embora permitam a passagem do vento leste entre as primeiras linhas de edificações, estes não são suficientes para que os fluxos atinjam a fachada do edifício modelo com pressão positiva. Como era esperado, este arranjo urbano apresentou as mais baixas diferenças de C_p entre as fachadas, o que reduz o potencial de aplicação da estratégia de ventilação natural quando o vento incide nessa direção. Os valores de pressão incidente foram negativos a barlavento, fato que se deveu à série de desvios sofridos pelos fluxos em contato com edificações à frente do conjunto de edifícios modelo.

No caso do cenário 3 os espaços entre os edifícios aliados a edificações mais baixas parecem garantir uma incidência mais efetiva sobre as superfícies do edifício modelo, apresentando algumas das maiores diferenças de C_p entre as fachadas no caso do vento leste. É sabido que o estrangulamento do fluxo tende à sua aceleração, como foi visto naquela espécie de corredor criado, como indicado em destaque na figura 144. Tal aspecto reforça que melhorias nas condições de ventilação natural podem ser obtidas através da ocupação do solo ao variar as posições dos edifícios numa estratégia de criação desses espaços onde as correntes fluem melhor.

O cenário 4, apesar da maior taxa de ocupação, atinge valores bastante próximos do cenário 3, porém mais baixos. Em função das características morfológicas do conjunto urbano reunido no cenário 4, os valores são superiores nos pavimentos mais baixo e intermediário do que o cenário 1, certamente influenciados pela presença da torre localizada à frente do edifício modelo no cenário inicial.

Figura 154 – Variação do ΔC_p entre as fachadas do edifício modelo nos três pavimentos com vento leste

Quando o vento sopra de sudeste, as diferenças de C_p entre as fachadas foram significativas com a elevação em altura. Novamente, ao afastar-se do nível do solo, a pressão incidente foi maior, como já era esperado. Diferentemente do vento leste, já não se verifica uma zona central da fachada com valores mais baixos.

Novamente, a influência da maior verticalização do cenário 2 é significativa, indicada pelos valores mais baixos entre os quatro casos analisados. Contudo, o que se destaca é que, mesmo sob as condições de obstrução devido ao conjunto urbano mais verticalizado reunido no cenário 2, as diferenças foram maiores. Especificamente, no caso do pavimento mais baixo, a diferença calculada neste cenário foi superior ao cenário 1. O fato é isolado e deve-se à presença de um conjunto verticalizado que, no cenário inicial, se coloca à frente do edifício modelo quando a incidência de vento é sudeste, gerando uma zona de estagnação do ar cujos efeitos se estendem até próximo da fachada principal.

O cenário 4 apresenta as maiores diferenças, o que reduz a influência da taxa de ocupação do solo.

Figura 155 – Variação do ΔC_p entre as fachadas do edifício modelo nos três pavimentos com vento sudeste

Agora com base na diferença de C_p sobre as fachadas do edifício modelo, reforça-se que o dinamismo inerente ao comportamento do vento é capaz de gerar diferenças de pressão entre as fachadas mesmo em níveis mais elevados de adensamento urbano através da verticalização, como descrevem os cenários 2 e 3. Dependendo da incidência de vento, se leste ou sudeste, boas diferenças podem ser atingidas, contribuindo para que os fluxos atravessem os ambientes do apartamento com intensidade perceptível e, possivelmente, capaz de promover o resfriamento dos ocupantes. No caso do vento leste, principal predominância em Fortaleza, ocorrendo em 44% do tempo, o cenário 2 atingiu valores bastante reduzidos, com diferenças entre 76% até 240% mais baixas do que os outros cenários. Entretanto, quando o vento incide a partir do sudeste, o que ocorre durante 34% do período em Fortaleza, as diferenças foram entre 22% e 156%.

Em síntese, apresentam-se as fracas correlações entre a altura média e o ΔC_p e entre a T.O. e o ΔC_p reunidas na figura 150. Os valores baixos de R^2 nos dois casos corroboram a premissa de que as características específicas da forma urbana impedem a determinação de quais formas podem comprometer ou mesmo potencializar a ventilação de fachadas.

Figura 156 – Correlações entre AM e ΔC_p (esquerda) e entre TO e ΔC_p (direita)

A análise dos perfis transversais de velocidade do ar permite inferir acerca da influência da ocupação do solo sobre o comportamento dos fluxos em cada cenário urbano. Mais especificamente, o CFX permite medir, em qualquer altura em relação ao solo, a velocidade do ar e a dissipação da energia cinética turbulenta. Posteriormente, tais variáveis foram exportadas para uma planilha eletrônica para avaliar, graficamente, o nível de rugosidade e a turbulência impostos por cada arranjo urbano estudado.

Para comparar os resultados da influência da forma urbana em cada cenário foram determinados quatro pontos, como demonstra a figura 157, que utiliza o cenário 1 como exemplo. O ponto 1, situado a 100 m da entrada de ar no domínio, caracteriza o fluxo livre da interferência de obstáculos e considera apenas a rugosidade do meio, servindo como referência. O ponto 2, localizado em meio às edificações e imediatamente à frente dos edifícios modelo, mede como o fluxo se comporta antes de atingir suas fachadas. O ponto 3 está em posição posterior ao conjunto edificado e a 200 m do ponto 2. Neste ponto é possível comparar o nível de obstrução imposto por cada configuração urbana sobre a velocidade do ar. O ponto 4, a 200 m do ponto 3, está localizado na região de formação de vórtices e dá indícios do espaço necessário para que o fluxo retorne à sua condição próximo daquela verificada quando este não havia sido alterado pelo meio urbano.

Figura 157 – Pontos de verificação dos perfis verticais de velocidade do ar com vento leste em cada cenário urbano

De maneira geral, os perfis de velocidade do ar em função da altura se comportam como esperado em todas as configurações urbanas testadas. Comparadas ao fluxo livre, a presença dos edifícios invariavelmente altera o padrão de aumento da velocidade do ar com o incremento em altura, demonstrando a elevação na camada limite para níveis superiores a 100 m de altura devido à presença dos edifícios.

O ponto 2 permite medir a influência da TO e da AM na desaceleração dos fluxos. A linha tracejada mais espessa no gráfico marca a altura de 50 m, que constitui a região de maior interesse da pesquisa por estar junto aos edifícios.

A morfologia urbana verificada no cenário 3, com uma taxa de ocupação um pouco maior que no cenário 2, exerce uma influência significativa sobre o perfil vertical de vento leste. No ponto 2, até próximo dos 25 m de altura, a intensidade dos fluxos no cenário 3 é menor em comparação ao cenário 2, fato que se deve aos edifícios mais largos e com menor espaçamento entre estes que caracterizam o cenário 3. Pouco acima deste nível, no entanto, a velocidade do ar no cenário 3 é mais elevada em relação ao cenário 2 e, acima dos 50 m de altura, a tendência é o seu aumento expressivo. A menor influência da rugosidade imprime maiores diferenças, uma vez que no cenário 2 a média de altura é elevada (30,3 m), a velocidade permanece bem mais baixa do que o cenário 3 até os 70 m de altura. O cenário 3 descreve ainda um efeito específico na elevação da camada limite, próximo da altura média deste cenário, calculada em 21,5 m.

O mesmo efeito ocorre com a velocidade do ar no cenário 4, mais baixa até os 20 m de altura. Tal fato decorre da elevada taxa de ocupação deste conjunto (64,4%), a mais alta entre as configurações urbanas analisadas, o que também leva a menores velocidades do ar até os 20 m de altura, como mostra o gráfico (figura 158).

Figura 158 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 2 com vento leste para os quatro cenários

Em relação ao ponto 3, onde a influência dos vórtices passa a ser mais evidente, pode-se perceber que o nível de rugosidade de cada cenário determina maiores reduções à velocidade do ar. Até os 50 m de altura, o conjunto mais verticalizado do cenário 2 determina velocidades do ar entre 140% a 800% mais baixos em comparação ao cenário 1, menos verticalizado. O cenário 3 segue essa tendência, porém com valores entre 150% e 200% menores do que a condição de baixa verticalização representada pelo cenário 1. A elevada taxa de ocupação do cenário 4 imprime reduções menores ao vento leste, com valores entre 80% e 220% menores.

No caso do cenário 2, o ponto 3 reforça o efeito das edificações mais altas e da rugosidade elevada nesta área da cidade. São verificadas velocidades abaixo de 0,5 m/s até os 50 m de altura e que aumentam vertiginosamente após o nível dos edifícios mais altos, por volta dos 70 m. No

cenário 3, os planos em diferentes alturas demonstraram que a área de formação de vórtices situa-se mais próximo da região central.

Figura 159 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 3 com vento leste para os quatro cenários

O ponto 4, localizado no início da zona onde os fluxos dão indícios da tendência de retorno à condição não perturbada, reforça a influência da forma de ocupação do solo sobre o vento. De maneira geral, os perfis corroboram os achados em Leite (2010). Comparando-se à condição menos verticalizada do cenário 1, o comportamento dos fluxos é mais comprometido no cenário 3, onde predominam edifícios com menos de 15 pavimentos, porém mais largos e com poucos espaços entre estes. A configuração mais verticalizada do cenário 2 e edifícios de mais de 60 m reserva velocidades maiores em relação aos cenários 3 e 4 entre 25 m e 70 m de altura. A maior taxa de ocupação do cenário 4, por sua vez, imprime reduções semelhantes até os 25 m de altura comparado ao cenário 2.

Figura 160 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 4 com vento leste para os quatro cenários

Também no ponto 2, que se situa imediatamente à frente do edifício modelo e, portanto, demonstra o comportamento dos fluxos antes de atingir a sua fachada, calculou-se a energia cinética turbulenta em função da altura em relação ao solo.

Tomando como base a figura 161, é possível perceber que, a cerca de 25 m do solo, a maior turbulência é percebida nos cenários 3 e 4. O cenário 1 permanece mais próximo do fluxo livre em função da menor verticalização e taxa de ocupação moderadas neste arranjo urbano avaliado.

No cenário 2, por sua vez, a intensidade de turbulência é percebida nos níveis mais altos, até mesmo acima dos 100 m, reforçando que a expressiva verticalização verificada neste conjunto determinam correntes bastante comprometidas. Pouco acima do solo, o cenário 2 apresenta níveis de turbulência menores do que os cenários 3 e 4, porém, poucos metros acima, as diferenças são entre 10% e 330% maiores para o cenário 2.

De maneira geral, nos demais cenários, o que se percebe é que, após os 50 m de altura, limite vertical da maioria dos edifícios que os compõem, a perturbação dos fluxos e, portanto, a turbulência, diminui significativamente, como também é indicado na figura 161.

Figura 161 – Comparação da dissipação da energia cinética turbulenta em função da altura no ponto 2 entre os diversos cenários com vento leste

Além dos 4 pontos de verificação dos perfis verticais de velocidade do ar com vento leste, foram acrescentados outros dois pontos nas simulações com vento sudeste. Também tomando o cenário 1 como exemplo, a figura 162 mostra o ponto 1, na entrada de ar no domínio, que corresponde ao fluxo inalterado pela forma urbana, servindo de referência às comparações. O ponto 2, o mesmo para as duas incidências de vento, situa-se imediatamente à frente da fachada do edifício modelo. O ponto 5, distante 200 m do ponto 2, retrata a zona de vórtices após o edifício modelo, enquanto que os perfis no ponto 6 já dão indícios do retorno dos fluxos à normalidade pela aproximação das características verificadas no ponto 1.

Figura 162 – Pontos de verificação dos perfis verticais de velocidade do ar com vento sudeste em cada cenário urbano

De acordo com os perfis verticais de velocidade do ar para a incidência sudeste, no ponto 2, o cenário 4 representa o menor nível de rugosidade até os 50 m de altura. O perfil do cenário 1 é próximo do apresentado pelo cenário 4, como esperado em função da baixa verticalização dos dois casos. Contudo, até os 50 m de altura, a velocidade do ar no ponto 2 é entre 27% e 125% menor no cenário 1, como pode-se perceber na figura 163.

Os dois cenários mais verticalizados representam maiores reduções à velocidade do ar, como esperado. Até os 50 m de altura, o perfil do cenário 3 é mais lento em relação ao cenário 4, com valores entre 8% e 169% menores. No cenário 2, por sua vez, as reduções são maiores em comparação ao quarto cenário. Sua condição mais obstruída imprime reduções mais significativas à velocidade do ar, até mais de 400% menores do que o cenário 4.

Figura 163 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 2 com vento sudeste para os quatro cenários

No ponto 5, localizado na região posterior aos edifícios modelo, os perfis dos quatro cenários se aproximam, com diferenças mais perceptíveis apenas para o caso do cenário 1, como indica a figura 164.

Entre 25 m e 50 m de altura, o cenário 2 apresenta um perfil comprometido. Comparado ao perfil de vento do cenário 1, porém, as maiores reduções situam-se em torno de 250%. Nos cenários 3 e 4, as diferenças são até mais significativas, oscilando entre 10% em níveis mais baixos e atingindo diferenças acima dos 400%.

Tomando como base tais medições, é possível inferir acerca da influência da alta taxa de ocupação do solo dos cenários 1 e 4 no comportamento dos fluxos em níveis próximos do solo. Analisando esta que é uma região a sotavento em todos os casos, visto que o ponto 5 está localizado atrás de edifícios altos independentemente do arranjo urbano analisado, a maior rugosidade dos cenários 3 e 4 determina perfis próximos àqueles registrados nos cenários menos verticalizados. No cenário 2 existe, por outro lado, uma série de espaços entre os edifícios, de menor taxa de ocupação do solo, por onde o vento atravessa, contribuindo para aproximar o perfil das condições menos obstruídas. Reforçando tal constatação está o fato do cenário 3 apresentar maiores velocidades acima dos 25 m do que o cenário 4.

Figura 164 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 5 com vento sudeste para os quatro cenários

No ponto 6 observa-se uma maior diferenciação entre os cenários. Ainda mais afastado dos edifícios modelo e, portanto, mais inserido nas regiões de vórtices, este ponto permite discutir o nível de influência das variáveis de ocupação do solo, bastante diferentes entre os cenários, sobre o perfil de vento. O cenário 1 apresenta velocidades do ar maiores até os 50 m, seguido de perto pelo cenário 4, cujos valores são, no máximo, 51% menores. No cenário 2 as maiores diferenças situam-se em torno de 180%. A maior obstrução é causada pelo cenário 3. Com o vento leste, este cenário obteve melhores condições de ventilação, inclusive evidenciado pelo perfil de velocidade na mesma região. Contudo, a incidência sudeste determina reduções bem maiores ao perfil de vento neste cenário, com diversos níveis em que a velocidade é mais de 260% menor do que no cenário 1. Mais

importante, até os 50 m de altura, o cenário 3 apresenta velocidades entre 17% e 41% menores do que o cenário 2, apesar da maior verticalização deste.

Figura 165 – Comparação dos perfis verticais de velocidade do ar no ponto 6 com vento sudeste para os quatro cenários

Diferentemente do que ocorreu com vento leste, o cenário 1 determina uma maior turbulência para o ponto 2. Tal aspecto, em grande parte, decorre em função dos edifícios a sudeste deste ponto que, sendo mais altos em meio a um contexto de baixa verticalização, produzem mais alterações mais perceptíveis aos fluxos, como demonstra a figura 160.

O cenário 2, mais uma vez, determina elevados níveis de turbulência também acima dos 50 m, como esperado. Contudo, até os 50 m de altura, as correntes tem comportamento menos comprometido do que o cenário inicial. O cenário 3, apesar da verticalização de edificações, não apresenta níveis de turbulência tão expressivos como o cenário inicial, aproximando-se do cenário 4, como também é indicado pela figura 166.

Figura 166 – Comparação da dissipação da energia cinética turbulenta em função da altura no ponto 2 entre os diversos cenários com vento sudeste

5.2. A ventilação natural interna

A vazão de ar no apartamento modelo e a velocidade do fluxo nos três ambientes de permanência prolongada (suíte, dormitório e sala) constituem os principais parâmetros de análise dos resultados das simulações internas.

Devido aos efeitos que o vento leste assumiu nos cenários urbanos, e que foram discutidos no item anterior, a vazão de ar apresentou pouca diferença nesta incidência entre os quatro cenários, à exceção do cenário 2. Como esperado, as maiores trocas de ar ocorrem no vigésimo terceiro pavimento. No entanto, a principal incidência de vento revela valores mais elevados no primeiro pavimento em comparação ao nível intermediário.

Entre todos os pavimentos, as maiores taxas de renovação do ar são obtidas no cenário 1, com $6,35 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor é cerca de 520% superior ao verificado no cenário 2, contudo apenas 1% maior que o cenário 3 e 3% acima do valor alcançado pelo cenário 4.

No pavimento intermediário, novamente o cenário 1 apresenta valores mais elevados, como era esperado num cenário menos verticalizado. A vazão de ar no cenário inicial é 7% superior ao cenário 3 e 3% superior ao quarto cenário, porém mais de 500% maior do que o cenário 2.

Analisando o apartamento no primeiro pavimento, novamente a obstrução foi significativa somente no cenário 2. Os valores do cenário 3 são semelhantes ao cenário 4, mas 10% acima do medido no cenário 1. Quanto ao cenário 2, as taxas de renovação do ar foram 800% superiores, revelando o impacto da maior verticalização deste arranjo urbano em relação à renovação do ar.

Figura 167 – Vazão de ar com vento leste por pavimento e em cada cenário urbano analisado

As vazões de ar obtidas com o vento sudeste também se comportam como esperado, atingindo valores mais elevados no pavimento mais alto e, nesse caso, decrescendo à medida que diminui a altura do apartamento.

Em relação às diferenças entre os cenários, no entanto, destaca-se a influência de um dos principais aspectos já discutidos anteriormente: a formação de um corredor para o vento sudeste que, garantindo sua permeabilidade, permite ventilar a fachada do edifício modelo mesmo em condições mais adensadas como nos cenários 2 e 3. Os valores atingidos para

a segunda predominância de vento são, inclusive, mais elevados nos pavimentos décimo primeiro e vigésimo terceiro em relação ao vento leste.

De maneira geral, com o vento sudeste, o cenário 4 apresenta melhores condições de ventilação natural em quase todos os níveis. Comparado ao último cenário simulado, o primeiro pavimento do cenário 1 tem a mais baixa quantidade de renovações de ar, valor 78% menor. A mais baixa vazão de ar deste arranjo urbano deve-se justamente a ocupação feita por torres residenciais na parte mais a sudeste deste cenário, como é possível perceber no conjunto de máscaras de obstrução do entorno reunidas na figura 153, no item anterior.

Analisando os resultados para o nível intermediário, constata-se que o apartamento do décimo primeiro pavimento do cenário 4 apresenta a maior taxa de renovação do ar, com $6,59 \text{ m}^3/\text{s}$. Neste caso, a vazão de ar é 32% superior ao verificado no mesmo nível na condição urbana representada pelo cenário 1, porém apenas 10% maior do que o verificado no cenário 3. A maior quantidade de trocas no apartamento verificada no cenário 4 nesses dois níveis também pode ser explicada pelo conjunto de máscaras de obstrução do entorno. Nestas é possível notar um percurso livre ao vento sudeste para este cenário em relação aos demais.

No caso do vigésimo terceiro pavimento, a influência dos obstáculos é reduzida e, conseqüentemente, os mais altos níveis de vazão de ar são atingidos. Praticamente inexistem diferenças entre os cenários 1, 3 e 4, cujos valores apresentam pequenas diferenças, entre 2% e 3%, mas cerca de 60% menor no caso do cenário 2.

Figura 168 – Vazão de ar com vento sudeste por pavimento e em cada cenário urbano analisado

À exceção do cenário 2, quando o vento incide de leste, em todos os cenários a vazão de ar no apartamento modelo não mostra diferenças significativas que apontem uma forma urbana como negativa do ponto de vista da ventilação natural. Ainda, se para o vento leste as diferenças evidenciam uma condição comprometida no cenário 2, com o vento sudeste as taxas de renovação atingidas neste são significativamente maiores do que aquelas verificadas com o vento leste. A segunda predominância de vento em Fortaleza reserva diferenças entre 43% e 63% menores para este cenário em relação aos outros três. Conclui-se, portanto, que em conjunto com as características morfológicas específicas, a variação no comportamento do vento, que ocorre durante todo o ciclo diário entre as predominâncias leste e

sudeste, permitem a ventilação natural mesmo diante das condições mais obstruídas verificadas nessa configuração urbana.

Ainda em relação ao comportamento dos fluxos no interior do ambiente, faz-se importante destacar que uma vazão de ar mais elevada não implica, necessariamente, em maiores velocidades do ar. Tal fato se deve a série de características inerentes ao comportamento do fluido em ambientes internos, o contato com obstáculos, a dimensão das aberturas, a seção transversal do ambiente, entre outros. No conjunto de simulações realizadas, esta relação é caracterizada por um R^2 moderado.

Figura 169 – Correlação entre vazão de ar e velocidade do ar

Justamente devido à complexidade inerente ao movimento do ar em ambientes internos, optou-se por medir a velocidade dos fluxos de forma mais abrangente. Assim, em cada um dos três ambientes avaliados foram adotados três pontos de medição, alinhados e dispostos no centro de cada ambiente, a 1,5 m do piso e destacados em preto na figura 170, que utiliza uma simulação com vento leste como exemplo. A média aritmética entre a velocidade registrada em cada um dos pontos alinhados na largura de cada ambiente resulta no valor da velocidade do fluxo que o atravessa, utilizando-a nas avaliações de conforto térmico.

Figura 170 – Forma de medição da velocidade do ar no interior dos ambientes selecionados

O método de cálculo foi adotado devido à forma como o fluxo adentra o ambiente. Em função da incidência do vento, se leste ou sudeste, podem ocorrer correntes localizadas em determinados trechos, com fluxos de maior intensidade em partes do ambiente enquanto que em outras a influência das correntes não são tão perceptíveis ou mesmo formam áreas de estagnação do ar. De acordo com a abordagem adaptativa do conforto térmico, também aplicada a esta pesquisa, compreende-se que os ocupantes podem optar por afastar-se ou aproximar-se das correntes em virtude das condições ambientais internas.

A análise da velocidade no interior dos ambientes de permanência prolongada é feita separadamente para as incidências leste e sudeste, comparando os valores obtidos por ambiente nos três pavimentos simulados.

No conjunto das vinte quatro simulações, pressões mais altas a barlavento corresponderam a valores de velocidade do ar mais altos no interior dos espaços avaliados, como esperado. É importante destacar, contudo, que tal fato decorre da posição em que se encontram os três ambientes escolhidos, cujas janelas estão voltadas para as principais incidências de vento, aspecto reiterado pela forte correlação estabelecida (figura 171). A relação entre a velocidade do ar e a pressão a barlavento poderia não ocorrer em outras situações, como por exemplo, se os ambientes analisados estivessem situados em regiões mais centrais do apartamento modelo, como é o caso do segundo dormitório, ou se suas aberturas fossem caracterizadas como saídas de ar, caso da cozinha, área de serviço ou banheiros, ou ainda se fossem verificadas altas pressões a barlavento associadas, porém, a um campo de pressões desproporcionalmente negativo a sotavento, gerando menores velocidades no interior dos espaços.

Por outro lado, essa constatação reforça a decisão projetual mais comumente utilizada, que privilegia os cômodos de permanência prolongada na disposição interna de edificações residenciais, voltando-os para os quadrantes leste e sudeste como forma de aproveitar a ventilação natural predominante no nordeste brasileiro, mesmo que isso implique em maiores planos voltados justamente para maiores cargas de radiação solar.

Figura 171 – Correlação entre a pressão sobre as aberturas na fachada principal e a velocidade do ar no interior dos ambientes

Como esperado, a velocidade do ar no pavimento mais alto foi quase sempre mais elevada em relação ao primeiro e ao décimo primeiro pavimentos. Mais especificamente, no entanto, com o vento leste, muitos dos valores no primeiro pavimento foram mais elevados em comparação ao décimo primeiro. Esta característica era esperada, uma vez que nas análises

da pressão incidente comentou-se sobre valores mais altos no pavimento mais próximo do solo e a possibilidade de relação com uma zona de estagnação ou menor pressão próxima da metade do edifício modelo, discutida brevemente no item 3.2. Para o vento sudeste, a velocidade dos fluxos se comportou mais próximo da normalidade, com valores maiores quanto mais alta fosse a posição do ambiente no edifício modelo.

Ressalta-se, no entanto, que a maior altura das edificações do entorno não representou uma dificuldade para ventilar o apartamento modelo, apesar da elevação na dimensão vertical do conjunto edificado como um todo determinar, em geral, uma redução na quantidade de renovações de ar. A fraca correlação entre altura média calculada para os diversos cenários e a vazão de ar obtida nestes serve para reforçar o papel da variabilidade da forma urbana que, aliada à variação natural que ocorre entre as duas principais direções de vento, permite níveis semelhantes entre a maioria dos casos analisados.

Figura 172 – Correlação entre a vazão de ar e AM

A suíte do casal, devido à posição próxima do canto do edifício, apresentou, em alguns casos, valores de pressão negativos com vento leste. Contudo, a despeito da janela deste ambiente constituir uma entrada ou saída de ar, a velocidade foi mais elevada no cenário 1, sobretudo nos pavimentos mais altos. No cenário 2, a suíte apresentou valores entre 200% e 400% menores do que o cenário inicial. Comparando aos níveis de velocidade do ar alcançado nos cenários 3 e 4, a velocidade do ar na suíte no cenário inicial é superior nos pavimentos mais elevados 19% e 90%, respectivamente.

Figura 173 – Velocidade do ar na suíte nos quatro cenários com vento leste

No caso do dormitório, novamente observam-se valores maiores no cenário 1, menos obstruído. As diferenças em relação ao cenário 2 são bem mais evidentes, sobretudo no pavimento 1, onde o ar praticamente comportou-se próximo da estagnação e ocorreram baixas renovações do ar. Comparando com os cenários 3 e 4, as velocidades são bastante próximas, com diferenças variando entre 9% e 38% mesmo diante de uma maior verticalização (cenário 3) ou maiores taxas de ocupação (cenário 4), como reforça o gráfico (figura 174).

Figura 174 – Velocidade do ar no dormitório nos quatro cenários com vento leste

Na sala foram alcançadas as maiores velocidades do ar com o vento leste. Fatores como as maiores dimensões da janela, a maior seção transversal deste e o campo de pressões mais elevado que incide sobre sua abertura atuam para que a intensidade dos fluxos seja maior neste ambiente,

Como esperado, os valores foram mais elevados no vigésimo terceiro pavimento. O cenário 1 atingiu as maiores velocidades, com diferenças significativas somente em relação ao cenário 2, uma vez que comparadas às velocidades alcançadas nos arranjos urbanos 3 e 4, os valores foram menores entre 3% e 17%, sendo que o último cenário simulado obteve níveis de movimento do ar no interior bastante próximos do cenário inicial.

Figura 175 – Velocidade do ar na sala nos quatro cenários com vento leste

Com o vento incidindo a partir do sudeste, o efeito dos obstáculos do entorno influencia ainda mais o campo de velocidades no interior dos três ambientes avaliados. Como já apontado durante a discussão dos resultados da ventilação urbana, a posição de algumas edificações no entorno edifício modelo alteraram o campo de pressões, seja para potencializar a ventilação natural ou para comprometê-la.

Como um reflexo de tais efeitos, a suíte do casal, mais especificamente, apresentou as mais baixas velocidades do ar no cenário 1. O que chama a atenção é o fato do cenário 2, escolhido como um contraponto ao cenário inicial em termos da forma de ocupação do solo, atingir velocidades acima daquelas verificadas neste último. Ademais, as diferenças do cenário 2 em relação aos cenários 3 e 4 são bem mais discretas do que o que foi registrado com vento leste, situando-se entre 5% e 36%.

Figura 176 – Velocidade do ar na suíte nos quatro cenários com vento sudeste

Tanto no caso do dormitório (figura 177) como na sala (figura 178) os cenários 1 e 4 apresentam níveis de velocidade do ar mais elevados, intercalando as situações nas quais estes cenários apresentam valores superiores aos cenários 2 e 3, cujas edificações são mais altas.

Analisando especificamente o dormitório, o cenário 4 apresenta velocidades entre 19% e 69% superiores aos cenários de AM maior. No pavimento mais alto, a velocidade do ar foi entre 7% e 13% maior no cenário 1 do que os cenários 3 e 4, respectivamente. Em relação ao cenário 2, registra-se uma diferença de 49%. Reforça-se, assim, a influência da altura para o campo de velocidade no interior dos ambientes.

Figura 177 – Velocidade do ar no dormitório nos quatro cenários com vento sudeste

Quanto à sala, os resultados das simulações permitem inferir que, no vigésimo terceiro pavimento, assim como foi verificado nas análises dos outros ambientes, a influência da forma urbana sobre a velocidade do ar é reduzida. Tal aspecto é indicado pela proximidade dos valores neste nível em quase todos os cenários. A velocidade do ar na sala em meio ao cenário 1 é apenas 4% mais alta em comparação ao cenário 3 e 14% mais elevada em relação ao cenário 4, com diferenças mais significativas em comparação ao cenário 2, da ordem de 120%.

Nos pavimentos mais baixos a variação em função das características morfológicas do contexto urbano é maior. No cenário 4, a sala apresenta as maiores velocidades do ar, entre 14% e 38% a mais do que o registrado nos cenários 1 e 3, e entre 68% e 83% maior comparado ao cenário 2.

Figura 178 – Velocidade do ar no dormitório nos quatro cenários com vento sudeste

É possível concluir que a velocidade do ar sofreu maior influência do nível de obstrução do que outras variáveis analisadas, como a vazão de ar ou o ΔC_p . A partir dos resultados é possível notar que, com o vento leste, o cenário 1 apresentou fluxos mais rápidos nos três ambientes avaliados em cerca de 80% dos casos observados. Já quando o vento incide de sudeste, os ambientes submetidos às condições do cenário 4 alcançam as maiores velocidades em 55% dos casos. No geral, porém, os dois cenários de altura média mais baixa e taxa de ocupação mais elevada, atingem as maiores velocidades em 90% dos casos, o que permite inferir acerca da influência da altura dos obstáculos do entorno na redução do potencial da velocidade do ar, aspecto largamente discutido em literatura específica.

Do ponto de vista qualitativo, reuniu-se a visualização dos fluxos em cada apartamento e de acordo com o vento incidente nas figuras 180 e 181. Observando o conjunto de vinte e quatro imagens, percebe-se que a direção do vento foi determinante para o comportamento do fluxo no interior do apartamento. Enquanto o vento leste direcionava os fluxos para a esquerda no interior dos ambientes, o vento sudeste direcionava-os para a direita em correntes bem demarcadas.

A visualização através das linhas de corrente reforça a ideia de que a variação entre as duas direções gera maiores possibilidades de resfriamento dos ocupantes dos ambientes analisados. Uma vez que o vento sofre mudanças ao longo do tempo, porém, no caso de Fortaleza, permanece nesse

quadrante leste-sudeste, o indivíduo pode optar por situar-se próximo da trajetória do ar dominante ou afastar-se desta dependendo da sensação térmica, reestabelecendo, assim, a situação de conforto.

De maneira geral, a incidência sudeste determinou fluxos mais intensos no interior dos apartamentos em relação ao vento de leste. A janela da sala, de maior dimensão, permitiu correntes mais aceleradas, que, entretanto, atravessavam o ambiente de maneira mais uniforme e concentrada, marcada em tons de vermelho e laranja em grande parte dos casos.

Em contrapartida, a maior turbulência nos fluxos internos é facilmente percebida quando o conjunto urbano gera um nível de obstrução maior, como a maioria das situações envolvendo o cenário 2 e para o apartamento no primeiro pavimento em meio ao cenário 1. Nessas situações, as correntes percorrem boa parte do ambiente, ainda que com velocidades reduzidas.

Em alguns dos casos simulados, mais especificamente no cenário 1 com vento leste, a janela da suíte se comportou como uma saída de ar (C_p negativo). Contudo, mesmo nesses casos foram alcançados valores de velocidade do ar considerados satisfatórios para o conforto térmico. Em relação ao nível de intensidade do movimento do ar, destaca-se que todos os valores estiveram dentro dos limites apontados como aceitáveis pela literatura internacional, como discutido no item 2.2.5. O mais alto valor atingido foi de 1,7 m/s, enquanto que, em outros casos, o movimento do ar pode ser considerado imperceptível, quando alcançou velocidades abaixo de 0,1 m/s.

Na condição tropical quente e úmida, preferencialmente os valores devem ser mais elevados, como alertam Cândido; De Dear; Lamberts (2011). Obedecendo a distribuição estabelecida pelos autores em sua pesquisa, a maior parte dos valores obtidos nas simulações situam-se em níveis mais elevados de velocidade do ar (acima de 0,8 m/s), o que contribui para amenizar períodos com temperatura acima dos 29 °C e que são recorrentes na realidade climática de Fortaleza.

Figura 179 – Distribuição das velocidades do ar no interior dos ambientes analisados

Figura 180 – Visualização dos fluxos nos apartamentos entre os quatro cenários com vento leste

Figura 181 – Visualização dos fluxos nos apartamentos entre os quatro cenários com vento sudeste

5.3. A simulação do desempenho térmico

As simulações de desempenho térmico foram realizadas para três apartamentos selecionados. Estas detalham o comportamento anual das variáveis ambientais em três ambientes de permanência prolongada submetidos a duas direções de vento, cujo comportamento é ditado pelas características específicas da morfologia urbana de cada um dos quatro cenários avaliados. Totaliza-se, assim, um universo de setenta e dois casos.

O desempenho térmico de cada ambiente é avaliado em termos do total de horas dentro da zona de conforto segundo o índice de De Dear & Brager (1998), com limites definidos como 2,5 graus a mais e a menos da temperatura operativa. A possibilidade de expansão da zona de conforto em função da velocidade do ar é determinada de acordo com os valores expressos no adendo à norma ASHRAE 55 (2010) e resumidos na figura 25 (item 2.2.5). Outra variável analisada é o total de radiação solar absorvida durante o ano. Tais dados são calculados pelo *DesignBuilder*, exportados para uma planilha eletrônica e confeccionados gráficos para análise.

As edificações que compõem o entorno de cada cenário urbano foram modeladas como elementos adiabáticos, tendo sua função restrita à obstrução de parte da radiação solar que incide sobre as fachadas do edifício modelo, como demonstra a figura 182.

Figura 182 – Modelagem dos quatro cenários urbanos no *DesignBuilder*

A visualização das projeções de sombra entre as 6:00 e as 18:00 do solstício de verão reforçam a maior obstrução do cenário 2 em comparação ao cenário 4. Em vista de topo, percebe-se o comprimento maior das sombras em virtude da maior altura dos edifícios que compõem o entorno do edifício modelo no cenário 2, como demonstra a figura 183. Compreende-se, assim,

que a quantidade total de radiação que atinge as fachadas nas diferentes configurações urbanas varia em função do nível de adensamento de cada arranjo urbano modelado.

Figura 183 – Comparação das projeções de sombras nos cenários 2 em perspectiva (a) e em planta (b) e no cenário 4 em perspectiva (c) e em planta (d)

Analisando o ganho de calor solar através das superfícies em KW/ano (quilowatts por ano), observa-se que no cenário 1 há pouca diferença entre os valores acumulados em cada pavimento. A proximidade dos totais anuais devido à insolação resulta de uma condição menos obstruída e uniformemente mais livre de obstáculos em todas as orientações.

Na figura 184, percebe-se que a suíte no pavimento mais alto recebe 6% a mais de carga devido à insolação em relação ao pavimento intermediário (1.154 KW/ano / 1093 KW/ano). No pavimento 1, o valor é 16% superior.

Nos ambientes do dormitório e da sala, as diferenças entre os níveis mais altos e mais baixos segue proporcional ao visto no caso da suíte. É de 7% para o décimo primeiro pavimento e de 18% para o primeiro pavimento.

Figura 184 – Comparação entre os ganhos de calor devido à insolação entre os pavimentos no cenário 1

Comparando os valores em cada pavimento, a condição mais obstruída do cenário 2 determina variações mais significativas nas quantidades anuais de radiação solar absorvidas pelas superfícies. Neste contexto urbano, durante todo o ano, a suíte do casal situada no primeiro pavimento recebe 58% menos carga devido ao sol em relação ao pavimento mais alto (1.148 KW/ano / 725 KW/ano) e 23% a menos do que no décimo primeiro pavimento. Diante dos valores mais expressivos, reforça-se o efeito do entorno na obstrução de parcelas de radiação solar.

Nos ambientes do dormitório e da sala, as diferenças são um pouco maiores. Em parte, as desigualdades entre os casos se devem ao fato da obstrução do entorno reduzir a carga somente em uma superfície no caso do dormitório e da sala, que corresponde à fachada voltada para leste, enquanto que no caso da suíte os obstáculos externos reduzem a incidência solar sobre duas de suas superfícies, compreendidas pelas paredes voltadas para leste e sul. Contudo, ainda são percebidas diferenças significativas ao comparar as parcelas absorvidas entre níveis mais baixos e o pavimento mais alto. No dormitório, a diferença entre o vigésimo terceiro pavimento para o décimo primeiro pavimento é de 24%, sendo 63% superior em relação ao primeiro pavimento. No caso da sala, o pavimento mais alto acumula cerca de 27% a mais de carga térmica devido ao sol do que o pavimento intermediário e 68% a mais do que o pavimento mais baixo, como resume a figura 185.

Figura 185 – Comparação entre os ganhos de calor devido à insolação entre os pavimentos no cenário 2

A verticalização moderada do cenário 3, cuja maioria dos edifícios tem altura inferior a 30 m, garante que os ambientes do pavimento intermediário recebam praticamente a mesma quantidade de insolação daqueles situados no pavimento mais alto, com diferenças entre 4% e 6%.

Em relação ao pavimento mais baixo, o conjunto de edifícios do entorno reserva diferenças um pouco mais expressivas. Comparando o caso da suíte do primeiro pavimento àquela situada no vigésimo terceiro pavimento, observa-se na figura 186 que esta última recebe 21% a mais de incidência solar. Analisando os ambientes de dormitório e sala, no pavimento mais baixo estes absorvem aproximadamente 27% a menos do valor acumulado nos respectivos cômodos no pavimento alto.

Figura 186 – Comparação entre os ganhos de calor devido à insolação entre os pavimentos no cenário 3

A altura média do conjunto urbano reunido no cenário 4 é próxima daquela verificada no cenário 1, porém sem grandes variações morfológicas, resultado de uma série de edificações baixas em expressiva taxa de ocupação do solo. Assim, justificam-se os mais elevados ganhos de calor devido à insolação entre os arranjos urbanos analisados.

Devido a menor verticalização, inexistem diferenças entre a quantidade de radiação solar acumulada nos ambientes situados no pavimento intermediário e o registrado no nível mais elevado. No caso do primeiro pavimento, os três ambientes recebem 7% a menos de carga térmica devido à exposição ao sol do que os cômodos no vigésimo terceiro pavimento, como é possível perceber na figura 187.

Figura 187 – Comparação entre os ganhos de calor devido à insolação entre os pavimentos no cenário 4

De forma geral, as diferenças foram proporcionais entre os ambientes, porém com valores um pouco mais elevados na suíte devido à maior área de exposição.

Como esperado, no cenário 2 foram registradas as maiores reduções nas parcelas de carga térmica devido à radiação solar. Examinando-se o conjunto de projeções estereográficas do entorno sobre a fachada do edifício modelo, reunidas na figura 153, é possível perceber uma maior mancha do entorno sobre a parte sudeste/sul deste conjunto urbano. Ao reduzir a incidência sobre os planos voltados para este quadrante explica-se a diferença entre os cenários.

Analisando o mesmo ambiente em diferentes cenários é possível notar a diferença imposta pela obstrução ao sol. No cenário 4, a suíte no primeiro pavimento recebe 49% a mais de carga térmica devido ao sol do que o mesmo ambiente no cenário 2 (1.080 KW/ano / 725 KW/ano). As diferenças em relação aos cenários 3 e 1 são de 14% e 9% respectivamente.

As variações no total de insolação acumulado vão diminuindo na medida em que se analisa um pavimento mais elevado. Comparada ao cenário 4, a suíte no décimo primeiro pavimento do cenário 2 recebe cerca de 24% a mais de carga solar do que no cenário 2. Nos cenários 1 e 3 a diferença é bem menor, em torno de 6%. Já no nível mais alto, a diferença entre os quatro contextos urbanos pode ser desconsiderada, como demonstra a figura 188.

Figura 188 – Comparação da carga térmica devido à incidência solar na suíte entre os quatro cenários

O dormitório apresenta diferenças menores entre os cenários, porém ainda com variações mais perceptíveis nos cenários 2 e 3, mais verticalizados, comparados aos cenários 4 e 1, mais livres da presença de edifícios altos. Também devido à menor área das paredes e da janela deste ambiente, as variações são um pouco menos expressivas, porém longe de uma homogeneidade.

Em relação ao pavimento mais baixo, o dormitório, no cenário 2, recebe 54% a menos de carga solar do que o cenário 4 (661 KW/ano / 430 KW/ano). No cenário 3 o valor é menor, sendo de 19%, aproximadamente. Já no cenário 1, a diferença situa-se em torno de 11%.

No décimo primeiro pavimento, o cenário 2 determina 25% a menos de exposição ao sol no dormitório do que no cenário 4, enquanto que

comparado aos cenários 1 e 3, a diferença é de cerca de 7% e 6%, respectivamente, como se pode observar na figura 189.

Figura 189 – Comparação da carga térmica devido à incidência solar no dormitório entre os quatro cenários

Com uma área de parede e de janela maiores voltadas para leste/sudeste, as diferenças no total da carga térmica acumulada durante o ano na sala são um pouco maiores do que no caso do dormitório. Ainda seguindo a mesma proporção registrada no caso analisado anteriormente, este ambiente, no primeiro pavimento em meio ao cenário 2, absorve 58% menos da energia solar em comparação ao quarto cenário. No cenário 3, a diferença cai para 18% e aproxima-se mais ainda no cenário inicial, cujos valores anuais são cerca de 11% menores.

No pavimento intermediário, persiste a menor quantidade de carga devido à insolação no cenário 2, com 28% a menos. A sala, no cenário 3, totaliza 3,5% a menos do que no cenário 4, como indicado na figura 190. O valor é menor se comparado aos 7% acumulado no caso do cenário 1. Recorre-se, mais uma vez, às máscaras do entorno para explicar a diferença de obstrução a 34,5 m do solo, que indicam uma maior área bloqueada pelo conjunto urbano reunido no cenário 1 e que resulta em quantidades menores de carga térmica devido ao sol no dormitório e na sala.

Figura 190 – Comparação da carga térmica devido à incidência solar na sala entre os quatro cenários

Após a confirmação da influência da obstrução do entorno na redução dos ganhos de calor devido à radiação solar, avaliam-se as horas de conforto em cada caso de acordo com as vazões de ar determinadas às simulações do desempenho térmico.

Os resultados do conjunto de simulações foram exportados para uma planilha eletrônica, reunindo-os segundo a incidência de vento, e apresentando-os sob a forma de gráfico, como nas figuras 191 e 192. Nestes destaca-se o objetivo de 80% das horas do ano em conforto.

De maneira geral, os ambientes nos quatro cenários urbanos obtiveram a maioria das horas do ano dentro da zona de conforto. Como esperado, em virtude das características climáticas da cidade de Fortaleza, não há períodos de desconforto por frio. Os casos fora dos limites estabelecidos como confortáveis somente ocorrem em função do calor e, predominantemente, durante o período da tarde, entre 12:00 e 18:00, que correspondem entre 70% e 90% dos períodos em desconforto.

Analisando o conjunto de setenta e dois casos simulados, o mais agravado registrou 65% de horas em situação de conforto térmico, enquanto quatorze superaram 79% das horas do ano em que as condições foram satisfatórias, despontando com as melhores situações. Contudo, nenhum destes atingiu o objetivo de 80% do ano (7.008 horas) em situação considerada como confortável.

Credita-se a maioria expressiva de horas dentro dos limites da zona de conforto térmico às vazões de ar elevadas em grande parte dos casos simulados. Além das altas taxas de renovação do ar, a menor transmitância térmica das paredes externas, dotadas de revestimento cerâmico, contribui para a qualidade térmica nos ambientes internos. O valor de U na envoltória do edifício modelo é 10% mais baixo do que o admitido pela NBR 15.575.

Analisando os resultados para o vento leste, entre todos os casos, os que obtiveram maiores quantidades de horas dentro da zona de conforto foram aqueles situados no pavimento mais alto, independentemente do cenário urbano em questão. A quantidade de horas dentro dos limites estabelecidos como confortáveis foi menor quanto mais baixo fosse o pavimento analisado em virtude da redução nas taxas de renovação de ar, que na maior parte dos casos acompanhou a diminuição da altura do apartamento em relação ao solo. Mesmo diante da menor obstrução à radiação solar verificada nos pavimentos mais altos, tais ambientes obtiveram temperaturas operativas mais baixas do que aquelas verificadas em ambientes nos pavimentos mais baixos, reforçando a premissa da ventilação natural como fator preponderante para o resfriamento da construção em localidades quentes e de baixa amplitude térmica diária.

Face às mais baixas quantidades de renovações do ar entre os casos simulados com vento leste, no cenário 2, os ambientes situados no primeiro pavimento alcançaram os piores resultados. O dormitório obteve 65% do ano em conforto, a sala 69% e a suíte 70%. Em contrapartida, os ambientes do apartamento modelo no vigésimo terceiro pavimento em meio ao cenário 1 obtiveram os melhores percentuais de horas dentro da zona de conforto, todos em torno de 79%. Os valores alcançados pelos cômodos nos cenários 3 e 4, nesse mesmo nível em relação ao solo, foram bastantes próximos, como pode-se perceber na figura 191.

Assim, é possível concluir que a obstrução à radiação solar não influencia significativamente a quantidade horas em conforto quando as

taxas de vazão de ar são mais expressivas, uma vez que os resultados são inversamente proporcionais aos níveis de obstrução apontados pelas projeções estereográficas e os valores de carga térmica devido à insolação. Mais especificamente, esperava-se que os ambientes no cenário 2 tivessem diminuídas suas diferenças de horas em conforto para os mesmos ambientes em função da menor incidência do sol, compensando as vazões mais baixas.

Entretanto, quando se analisam os três ambientes no primeiro pavimento em meio aos cenários 1, 3 e 4, observa-se uma discreta diferença na quantidade de horas em conforto. Entre todos os casos analisados neste nível, o cenário 3 apresentou as melhores condições de conforto. As diferenças na vazão de ar neste cenário são de 9% a mais em relação ao cenário 1 e de apenas 1% acima do verificado no cenário 4, valores semelhantes em termos da quantidade de renovações de ar e que não determinam diferenças à temperatura operativa, como já discutido. Portanto, é possível afirmar que o melhor desempenho dos ambientes em meio ao cenário 3 ocorre devido a maior obstrução à radiação solar determinada por esse cenário, cuja verticalização é bem mais expressiva se comparada aos arranjos 1 e 4.

Figura 191 – Total de horas em conforto por ambiente nos quatro cenários com vento leste

Com o vento incidindo de sudeste, as situações em conforto térmico obedecem relações semelhantes às aquelas verificadas com o vento leste. Os maiores períodos de conforto foram anotados nos ambientes situados em pavimentos mais altos, sofrendo reduções nos pavimentos baixos, o que também é acompanhado pela redução nas taxas de vazão de ar.

O que se destaca, no entanto, é a maior quantidade de horas em conforto em todos os ambientes nos pavimentos primeiro e décimo primeiro do cenário 2 em comparação aos demais cenários. Como evidenciado nas discussões de ventilação na escala urbana, com o vento incidindo a partir do sudeste, as taxas de vazão de ar no cenário 2 foram completamente diferentes em comparação ao vento leste, sendo significativamente superiores e aproximando-se dos valores verificados nos demais cenários.

No cenário 2, o primeiro pavimento apresenta taxa de renovação do ar 33% menor em relação ao verificado no mesmo nível no cenário 3 e 43%

inferior em comparação ao atingido no cenário 4. No pavimento intermediário persistem tais diferenças, agora 31% menores em relação ao cenário 3 e 41% abaixo do obtido no cenário 4. Mesmo diante das menores vazões de ar registradas, o cenário 2 apresenta entre 150 e 370 horas a mais em conforto entre os casos envolvendo ambientes nos pavimentos primeiro e décimo primeiro, como percebe-se na figura 192. Tais valores correspondem a diferenças de 2% a 6% e atestam as melhores condições ambientais neste contexto devido à redução da carga térmica em função da forma urbana mais obstruída, que promove maior sombreamento.

No pavimento mais alto, onde as taxas de renovação do ar são semelhantes nas diferentes configurações morfológicas avaliadas, as horas em conforto não sofrem diferenças, como é possível perceber na figura 192.

Figura 192 – Total de horas em conforto por ambiente nos quatro cenários com vento sudeste

Cruzando os dados de ganhos de calor devido à insolação com as horas na zona de conforto térmico não há, contudo, uma correlação, como evidencia a figura 193. Tal fato decorre da ocorrência de conforto também, mas principalmente, naquelas condições urbanas em que há maior exposição das fachadas ao percurso do sol, sendo o conforto proporcionado pela ventilação natural.

Tomando como base os seis casos do cenário 2 com vento sudeste e

Figura 193 – Correlação entre os ganhos de calor devido ao sol e as horas em conforto

mais os quatro casos do cenário 3 com vento leste, pode-se concluir que, em climas quentes e úmidos, sob condições de ventilação natural semelhantes ou até mesmo um pouco mais baixas, a obstrução ao sol provocada pelo entorno passa a ser fator importante para a melhoria das condições ambientais internas. Os resultados indicam que mesmo que a ventilação natural em contextos urbanos mais verticalizados atinja valores abaixo daqueles verificados em um meio menos obstruído, como as diferenças na vazão de ar entre 30% e 40% menores no cenário 2 em relação aos arranjos urbanos 1 e 4, dentro de certos níveis, o sombreamento pode compensar a ausência de fluxos mais intensos e garantir condições ambientais semelhantes àsquelas possíveis em situações urbanas de baixa densidade.

Como visto, o maior nível de obstrução à radiação solar devido aos edifícios altos no entorno não implicou na redução direta da temperatura operativa, uma vez que, em todos os cenários, os pavimentos mais baixos do edifício modelo apresentaram menores períodos de conforto térmico comparados aos apartamentos em níveis mais elevados. Por outro lado, considerando os casos em que não houve diferenças significativas na vazão de ar entre os pavimentos intermediário e o mais alto, como em grande parte das situações envolvendo os cenários 1, 3 e 4, as diferenças na qualidade ambiental interna fundavam-se somente na quantidade de carga térmica devido ao sol acumulada e perdida durante o ciclo diário. Assim, é possível inferir acerca da influência do nível de obstrução imposto pela forma urbana na dificuldade de liberar do calor retido pelas superfícies da edificação.

Mais especificamente, ao analisar alguns casos com vento incidindo de leste e cujas taxas de renovação do ar foram bastante próximas, observam-se diferenças entre 230 e 350 horas em desconforto entre os mesmos ambientes, sendo sempre menores as quantidades totais em pavimentos mais altos. Tais diferenças, que ocorrem na mesma proporção com vento sudeste, são inversamente proporcionais à quantidade de radiação solar absorvida pela envoltória do apartamento modelo. Sabendo-se que a partir de 40 trocas de ar por hora a temperatura interna não sofre alterações significativas, como discutido no item 4.2.2.6, estima-se um efeito da massa construída atuando contrariamente à redução da temperatura operativa.

Em sua análise sobre a exposição do edifício à radiação solar e sua relação com o conforto térmico, Gupta (1987) já havia demonstrado que a exposição solar, por si só, não é um bom indicador da eficiência de um edifício situado em localidade de clima quente. O autor ressaltou que outras características de construção poderiam anular o efeito da exposição solar.

Gupta (1987) explica que as superfícies externas de edifícios são responsáveis por transmitir o calor para seu interior. Contudo, estas mesmas superfícies também perdem calor para o meio externo. A eficiência das fachadas depende da forma como estas permitem que o calor entre e saia do edifício, sendo o fluxo de energia térmica proporcional à área dessas superfícies. Outra possível indicação desse efeito, que perpassa pelo fator visão de céu, está em Andersen & Sattrup (2011), que evidenciaram o papel de reflexão da radiação solar promovida pelo entorno. Ao contribuir na iluminação de ambientes, os edifícios vizinhos aquecem-nos em consequência.

De maneira geral, os resultados corroboram a afirmação de Givoni (1994) quanto à necessidade de priorizar a ventilação natural em relação à orientação solar em regiões quentes e úmidas, uma vez que a vazão de ar mais elevada nos casos em que os ambientes estavam mais expostos

sobrepôs-se à influência da quantidade de radiação solar absorvida durante o ano. Ao explicar sobre a melhor ordenação urbana para tais localidades, o autor indica edifícios altos e estreitos, configurando a tipologia de torres, posicionados distantes um do outro de acordo com a densidade do local.

Em concordância com os achados da presente pesquisa, acredita-se que tal afastamento deve ser investigado em função de um termo ou limite entre a exposição das superfícies ao sol, aspecto claramente indesejável em climas quentes, e a permeabilidade do meio urbano ao vento, uma vez que na questão se insere a dificuldade imposta pelo entorno para liberar o calor acumulado durante o dia. Tal discussão, no entanto, transcende os limites do edifício e da própria investigação que aqui se coloca, uma vez que sua influência deve ser analisada, também, a partir do campo térmico urbano.

Assim, conclui-se, é possível aliar maiores densidades e garantir condições de ventilação satisfatórias, como verificado no cenário 3 com vento leste e no cenário 2 com vento sudeste. Ainda que a menor intensidade dos fluxos determine vazões mais baixas do que o proporcionado por configurações urbanas mais livres, tem-se a obstrução provocada pelos obstáculos do entorno como um valioso aliado na redução da carga térmica devido ao sol, principal fator de ganho de calor interno em edifícios localizados na região tropical quente e úmida.

Após rodar a série de simulações de desempenho térmico, exportando acrescentou-se a análise da velocidade do ar sobre os resultados. O estabelecimento da condição de conforto em pelo menos 80% do ano somente é alcançado ao considerar-se o efeito de resfriamento provocado pelo movimento do ar próximo aos ocupantes nos ambientes analisados, incrementando a sensação de conforto térmico.

O desconforto por calor verificado em todos os casos analisados é reduzido ao considerar. O fator é responsável por reduzir a quantidade de horas em desconforto em todos os casos analisados.

Tomando as velocidades medidas através das simulações CFD para cada ambiente, em 85% dos casos é possível reestabelecer a condição de conforto térmico durante 80% das horas do ano, como demonstra a figura 194.

Figura 194 – Percentual de casos com mais de 80% das horas do ano em conforto térmico com a associação da velocidade do ar aos valores de temperatura operativa

A alteração na sensação de desconforto por calor através do movimento do ar no interior do apartamento é evidente. As reduções na temperatura operativa foram da ordem 0,05 a 0,25 grau nos casos em que o movimento de ar foi bastante baixo, como verificado em algumas casos do

cenário 2, pouco incrementando as condições ambientais internas. Em situações de menor obstrução do meio urbano e, portanto, valores acima de 1 m/s, o que corresponde a grande parte dos casos, foi possível reduzir entre 1 e 2,5 graus no valor da temperatura operativa percebida pelo organismo.

Contudo, ao considerar a velocidade do ar para o incremento na sensação de conforto térmico foram registrados períodos de desconforto por frio. Estes totalizam 51% das horas em desconforto, quantidade maior do que as horas acima das temperaturas que limitam a zona de conforto térmico.

A elevada quantidade de horas em desconforto por frio causa espécie, não só em função das condições climáticas de Fortaleza, mas em virtude das recentes pesquisas em que foi abordada a condição quente e úmida (CÂNDIDO, 2010), na qual os ocupantes de edifícios naturalmente ventilados declararam preferência por velocidades do ar acima de 0,9 m/s quando a temperatura operativa situa-se acima dos 30 °C. Ademais, como descreve a abordagem adaptativa, o ocupante pode afastar-se das correntes, fechar a janela, diminuir a sua área de abertura ou ainda adotar quaisquer outras medidas menos prováveis para diminuir a sensação negativa que o maior movimento do ar poderia representar em relação ao ambiente térmico, o que reduziria o desconforto por frio.

Em relação aos resultados, observa-se que o desconforto por frio ocorre principalmente nos cenários com menores valores de altura média, como o 1 e o 4. Em função da maior velocidade do ar, nos pavimentos mais elevados são registradas as maiores quantidades de horas abaixo dos limites da zona de conforto. Alguns casos no vigésimo terceiro pavimento, como a sala no cenário 1 com vento leste, o dormitório no mesmo cenário com vento sudeste e o dormitório no cenário 3 com vento sudeste fogem aos limites da zona de conforto devido a este fator.

Considerando todos os casos, cada um com 8.760 horas de dados, os períodos de desconforto por frio no pavimento intermediário totalizam 10.117 horas. O valor é 69% superior em comparação ao pavimento mais baixo, que soma 6.003 horas em desconforto devido ao frio. No vigésimo terceiro pavimento são registradas 20.231 horas em desconforto por frio, valor 237% superior ao total verificado no pavimento mais baixo. A figura 195 reúne os o total de períodos em desconforto devido ao frio por pavimento em cada cenário urbano. Reitera-se, assim, o papel das altas velocidades do ar atingidas em níveis mais elevados do edifício modelo, que mais intensas determinam sensação de desconforto.

Figura 195 – Distribuição das quantidades totais de desconforto devido ao frio por pavimento entre os cenários urbanos

As situações de desconforto por calor, por sua vez, ocorrem mais nos pavimentos mais baixos, onde também são registradas as menores vazões de ar e os fluxos atingem velocidades mais baixas.

Em todos os cenários, o primeiro pavimento totaliza 16.888 horas fora da zona de conforto devido às altas temperaturas verificadas. O valor 36% maior em comparação ao décimo primeiro pavimento, que soma 12.396 horas. Comparado ao pavimento mais alto, que registra 6.929 horas fora da zona de conforto devido ao calor, a diferença para o primeiro pavimento chega a 144%.

A figura 196 compara as quantidades totais por pavimento e em cada um dos quatro cenários urbanos analisados. O cenário 2 apresenta mais de 19.000 horas em desconforto devido ao calor, fato que se deveu às baixas taxas de renovação do ar nos casos em que o vento incidiu de leste. Os demais cenários obtêm menos de 7.000 horas de desconforto, cada, reforçando o papel das maiores intensidades nos fluxos permitidas pelos contextos urbanos.

Figura 196 – Distribuição das quantidades totais de desconforto devido ao calor por pavimento entre os cenários urbanos

Considerando a velocidade do ar, todos os casos ganham horas em situação de conforto térmico ao reduzir a sensação de calor. Em alguns casos, entretanto, o movimento do ar é tão elevado que, de acordo com a equação utilizada, há desconforto por frio. Novamente, procede-se a análise dos resultados em todos os cenários separados por incidência de vento.

Com vento leste, a maioria dos casos atinge o conforto acima de 80% do ano. À exceção de sete casos no cenário 2, onde mesmo com o aumento da quantidade total de períodos em conforto não foi possível passar à condição de 80% das horas do ano em conforto, o movimento do ar atuou aumentando expressivamente a quantidade de horas em situação confortável. Em média, a melhoria nas condições térmicas em cada ambiente é de 12%.

Maiores quantidades de horas em conforto são obtidas nos pavimentos mais elevados, sobretudo no cenário 1, em função das maiores velocidades do ar. Entretanto, ao separar os resultados por ambiente é possível realizar nove comparações. Como é possível perceber na figura 197, reiterados pela tabela 11, o cenário 3 obtém as melhores condições térmicas

na suíte e no dormitório localizados no primeiro pavimento, no dormitório e na sala no décimo primeiro pavimento e no dormitório no vigésimo terceiro pavimento. São cinco casos em nove nos quais o cenário 3 proporciona melhores condições.

Figura 197 – Total de horas em conforto ao considerar a velocidade do ar em cada ambiente nos quatro cenários com vento leste

Ainda, uma vez que a velocidade do ar atua dentro de certos limites, onde a sua maior intensidade pode levar ao desconforto por frio, é justamente em meio ao obstruído cenário 2 que se atinge a maior quantidade de horas dentro da zona de conforto com o vento leste. A sala no vigésimo terceiro pavimento, por contar com uma velocidade de 0,8 m/s, aproximadamente, a mais baixa para este nível, determina que inexistam períodos de desconforto por frio, o que reduziria os períodos dentro da zona de conforto. Nesse caso, especificamente, a ação do vento é capaz de promover em torno de 20 renovações de ar por hora. Ainda que mais baixa do que o verificado nos demais cenários, a vazão de ar ali calculada associada à velocidade do ar nesse intervalo permite que mais de 97% do ano apresente-se em situação de conforto térmico.

Com o vento sudeste, a consideração da velocidade do ar incrementa 14%, em média, a qualidade térmica dos ambientes analisados. Com o vento nessa direção, apenas 3 casos não atingem a condição de 80% do ano em conforto térmico, sendo, contudo, melhor do que os casos com vento leste. No entanto, é mais recorrente a possibilidade de desconforto por frio em função das maiores velocidades do ar atingidas.

Novamente comparando os resultados por ambientes nos diferentes pavimentos, aqueles situados no cenário 2 obtém melhores resultados em seis situações, são estas o dormitório do pavimento 1, os três ambientes no décimo primeiro pavimento e o dormitório e a sala no pavimento mais alto, como resume a figura 198. Neste conjunto de resultados, temos seis casos em nove que se fazem possível ao comparar por ambiente. Acrescente-se a esta predominância de melhores resultados para o cenário 2 com vento sudeste o caso da suíte no pavimento 1 em meio ao cenário 3 como a melhor situação para este mesmo ambiente em comparação aos demais cenários.

Figura 198 – Total de horas em conforto ao considerar a velocidade do ar em cada ambiente nos quatro cenários com vento sudeste

A tabela 11, a seguir, resume os resultados da série de simulações realizadas. Esta especifica as alterações ocorridas nas horas dentro da zona de conforto ao considerar o movimento do ar na sensação de conforto dos ocupantes.

Sete ambientes do cenário 2 com vento sudeste apresentaram maiores horas em conforto em relação aos respectivos ambientes em outros cenários. Estes se somam aos três ambientes do cenário 3 com vento leste que, também, apresentaram melhores condições em relação aos seus pares. Somados, tais ambientes reforçam o potencial de trechos urbanos construtivamente mais adensados em proporcionar condições térmicas satisfatórias, reforçando a hipótese de que a atuação conjunta da obstrução à radiação solar e a manutenção da ventilação natural pode garantir melhores condições ambientais no interior de edifícios.

Considerando o movimento do ar no interior dos ambientes, o cenário 2 obtém oito ambientes como os melhores entre as incidências de vento leste e sudeste, enquanto que cinco casos no cenário 3 com vento leste despontam como melhores. Juntos são doze situações em que os ambientes nestes cenários urbanos obtiveram melhores condições de conforto térmico do que os mesmos em meio a formas construídas mais desobstruídas como o 1 ou o 4. Atribui-se à atuação conjunta da obstrução à radiação solar e a condição para ventilar as fachadas nestes arranjos urbanos a possibilidade de adensamento construtivo e manutenção do conforto térmico em cidade tropical de clima quente e úmido durante a maior parte do ano.

Obviamente que cada situação urbana, suas formas e tipologias construtivas devem ser analisadas especificamente, a própria investigação desenvolvida atesta essa necessidade. Contudo, com base nos resultados apresentados, conclui-se que, desde que garantidas taxas médias de vazão de ar e velocidades do ar moderadas (até 0,8 m/s) atreladas à um certo nível de obstrução ao sol, é possível garantir qualidade ambiental de espaços internos mesmo em áreas urbanas mais adensadas através da verticalização.

Caso	Cenário	Vento	Pavimento	Ambiente	Horas em conforto (%)	Velocidade do ar (m/s)	Horas em conforto (%)	Caso	Cenário	Vento	Pavimento	Ambiente	Horas em conforto (%)	Velocidade do ar (m/s)	Horas em conforto (%)
1	1	E	1	Suíte	73,06%	0,27	83,3%	37	3	E	1	Suíte	73,60%	0,32	85,8%
2	1	E	1	Dormitório	72,68%	1,15	94,4%	38	3	E	1	Dormitório	73,11%	1,02	95,0%
3	1	E	1	Sala	73,55%	1,26	91,6%	39	3	E	1	Sala	74,13%	1,15	93,1%
4	1	E	11	Suíte	76,28%	0,40	90,8%	40	3	E	11	Suíte	76,23%	0,19	84,1%
5	1	E	11	Dormitório	75,48%	0,99	94,7%	41	3	E	11	Dormitório	75,29%	0,91	95,1%
6	1	E	11	Sala	76,48%	1,24	89,0%	42	3	E	11	Sala	76,29%	1,06	93,1%
7	1	E	23	Suíte	79,70%	0,38	92,3%	43	3	E	23	Suíte	79,62%	0,32	90,8%
8	1	E	23	Dormitório	78,61%	1,48	81,3%	44	3	E	23	Dormitório	78,53%	1,07	91,0%
9	1	E	23	Sala	79,39%	1,50	79,8%	45	3	E	23	Sala	79,38%	1,29	85,0%
10	1	SE	1	Suíte	72,45%	0,10	76,6%	46	3	SE	1	Suíte	73,60%	0,61	93,3%
11	1	SE	1	Dormitório	71,91%	0,69	95,7%	47	3	SE	1	Dormitório	73,11%	1,10	94,6%
12	1	SE	1	Sala	73,01%	0,93	96,8%	48	3	SE	1	Sala	74,13%	0,93	95,6%
13	1	SE	11	Suíte	76,28%	0,28	87,5%	49	3	SE	11	Suíte	76,23%	0,78	94,7%
14	1	SE	11	Dormitório	75,48%	1,24	90,3%	50	3	SE	11	Dormitório	75,29%	1,22	90,9%
15	1	SE	11	Sala	76,48%	1,12	91,7%	51	3	SE	11	Sala	76,29%	1,01	93,8%
16	1	SE	23	Suíte	79,70%	0,72	94,5%	52	3	SE	23	Suíte	79,62%	0,82	93,7%
17	1	SE	23	Dormitório	78,61%	1,70	75,7%	53	3	SE	23	Dormitório	78,53%	1,59	79,3%
18	1	SE	23	Sala	79,39%	1,47	80,7%	54	3	SE	23	Sala	79,38%	1,42	81,9%
19	2	E	1	Suíte	69,98%	0,09	75,7%	55	4	E	1	Suíte	72,37%	0,32	85,3%
20	2	E	1	Dormitório	65,09%	0,02	66,8%	56	4	E	1	Dormitório	71,38%	1,02	95,1%
21	2	E	1	Sala	69,10%	0,06	72,4%	57	4	E	1	Sala	72,52%	1,16	93,4%
22	2	E	11	Suíte	74,26%	0,08	78,5%	58	4	E	11	Suíte	75,66%	0,24	85,5%
23	2	E	11	Dormitório	70,76%	0,10	76,3%	59	4	E	11	Dormitório	74,66%	1,05	94,1%
24	2	E	11	Sala	72,61%	0,11	77,9%	60	4	E	11	Sala	75,76%	1,20	90,4%
25	2	E	23	Suíte	76,18%	0,10	81,1%	61	4	E	23	Suíte	79,62%	0,20	87,5%
26	2	E	23	Dormitório	73,18%	0,13	79,9%	62	4	E	23	Dormitório	78,53%	1,17	89,4%
27	2	E	23	Sala	74,35%	0,76	97,9%	63	4	E	23	Sala	79,38%	1,32	84,5%
28	2	SE	1	Suíte	76,06%	0,45	92,3%	64	4	SE	1	Suíte	72,37%	0,35	86,1%
29	2	SE	1	Dormitório	75,63%	0,78	96,5%	65	4	SE	1	Dormitório	71,38%	1,31	91,9%
30	2	SE	1	Sala	76,69%	0,70	96,6%	66	4	SE	1	Sala	72,52%	1,29	90,9%
31	2	SE	11	Suíte	77,90%	0,62	95,0%	67	4	SE	11	Suíte	75,66%	0,65	94,4%
32	2	SE	11	Dormitório	77,10%	0,92	95,0%	68	4	SE	11	Dormitório	74,66%	1,47	85,9%
33	2	SE	11	Sala	78,21%	0,76	95,9%	69	4	SE	11	Sala	75,76%	1,28	88,8%
34	2	SE	23	Suíte	79,68%	0,77	92,1%	70	4	SE	23	Suíte	79,62%	0,85	93,2%
35	2	SE	23	Dormitório	78,56%	0,86	94,7%	71	4	SE	23	Dormitório	78,53%	1,51	81,2%
36	2	SE	23	Sala	79,42%	0,66	95,8%	72	4	SE	23	Sala	79,38%	1,29	85,0%

Tabela 11 – Resultados das simulações segundo o total de horas dentro da zona de conforto

Mais de 80% do ano em conforto térmico
Menos de 80% do no em conforto térmico

6. Conclusões

Através do conjunto de simulações CFD da ventilação natural na escala urbana constatou-se a premissa de que cada configuração espacial gera condições específicas de circulação do ar.

Os efeitos aerodinâmicos e a turbulência inerentes ao comportamento do vento em contato com os obstáculos que compõem o meio urbano impedem a determinação imediata, e num nível de precisão adequado, quais formas serão prejudicadas ou mesmo beneficiadas em relação à ventilação natural.

O nível de rugosidade do meio, os desvios sofridos pelos fluxos, a criação de zonas de redução da velocidade do ar ou corredores de aceleração das correntes influenciam diretamente o campo de pressões sobre as fachadas. A esse processo associa-se a variabilidade formal que os objetos arquitetônicos podem assumir na prática de projeto. Combinados, tais aspectos tornam inadequada grande parte das referências e bibliotecas contendo dados de C_p e desqualificam modelos simplificados para previsão do campo de pressões incidente sobre as fachadas.

O cálculo da vazão de ar e, portanto, da parcela de calor removida pela ação do vento que não considere as condições morfológicas do entorno torna-se impreciso e, conseqüentemente, a predição da performance

termoenergética de edifícios pode assumir erros significativos, levando a avaliações equivocadas ou mesmo irreais.

Santamouris (1998) destaca que, apesar do desenvolvimento das análises envolvendo a ventilação natural em edifícios ocorridas nos últimos cinquenta anos, mais especificamente em relação à medição da vazão e o campo de velocidades do ar, inexistem métodos e normas capazes de abranger as possibilidades que se colocam diante da diversidade de condições.

A variabilidade da forma urbana e sua influência sobre a ventilação natural foi um desafio trazido a este trabalho. A própria dinâmica da urbe, através dos seus agentes de reprodução do espaço, altera constantemente a forma da cidade, remodelando ou substituindo as configurações espaciais preexistentes num processo acelerado e que tem se intensificado nos últimos anos.

O desafio consiste, portanto, em elaborar meios para avaliar, de forma mais rápida, porém não menos precisa, o que é positivo tanto do ponto de vista do desenho de cidade como para a melhoria da ambiência térmica nos edifícios. Contudo, como destaca Golany (1996), não existe uma proposta de planejamento universal e cada caso deve ser examinado individualmente. Assim, tanto as especificidades do clima local como as características do meio urbano e seus diversos condicionantes, entre estes a legislação que define a forma de ocupação do espaço, devem ser considerados na agenda para o desenvolvimento equilibrado dos atuais assentamentos humanos. Nesse contexto, as ferramentas de avaliação que se propõem devem ser capazes de prever se o contexto que resulta de uma determinada forma de cidade que está a ser erigida é capaz de garantir aos edifícios níveis adequados de conforto térmico com menor consumo de energia.

Face à necessidade de fornecer diretrizes de planejamento capazes de acompanhar o atual ritmo de produção do espaço urbano estão, certamente, as simulações computacionais.

Todavia, associada à imprevisibilidade que o vento assume em um meio heterogêneo como o tecido das metrópoles está a incapacidade dos programas computacionais para previsão do balanço térmico de edificações em incorporar adequadamente a ventilação natural. O cálculo das taxas de vazão de ar realizado por estes modelos é demasiadamente simplificado e comumente baseia-se em bibliotecas predefinidas de C_p , inadequadas frente às especificidades que obstáculos da morfologia urbana determinam aos fluxos, como visto entre os principais resultados desta investigação. Ainda, e principalmente, apesar de importante para determinar a condição de conforto térmico em edifícios, tais programas não fornecem detalhes sobre o comportamento dos fluxos nos ambientes avaliados. Em regiões onde a estratégia da ventilação natural é fundamental, como é o caso de Fortaleza, o seu desconhecimento representa uma restrição significativa ao potencial do movimento do ar para o resfriamento dos ocupantes.

Mais especificamente, tal limitação já havia sido evidenciada em outras investigações, como assinalado por Oliveira (2006) e Cóstola (2006). Os autores esperavam que outras pesquisas avançassem na exploração da relação entre a quantidade de trocas de ar e a temperatura interna, propondo a incorporação da técnica CFD nesta escala de abordagem.

Uma vez que a condição de conforto térmico é afetada pelo aumento na velocidade do ar, e, tomando como base os resultados obtidos em sua

pesquisa, Marcondes (2010) também reforçou a necessidade de acrescentar simulações CFD nas quais os resultados gerassem insumos para as análises de desempenho térmico em um processo que definiu como retroalimentação. A autora ressaltou a maior precisão que caracteriza a evolução observada nos códigos CFD e a possibilidade de medir variáveis específicas como coeficientes de pressão sobre as fachadas, além da velocidade do ar e a quantidade de trocas de ar em ambientes através do referido método.

Nesse sentido, acredita-se que um dos principais objetivos deste trabalho foi atingido. A presente pesquisa obteve avanços ao desenvolver-se com base numa metodologia que envolveu diferentes ferramentas computacionais em etapas sequenciais, que se complementavam a partir dos dados obtidos na fase anterior. O comportamento das variáveis que influenciam no conforto térmico em edifícios naturalmente ventilados foi analisado em escalas mais adequadas, aproximando-se dos fenômenos para melhor descrevê-los. Assim, partindo de onde pararam estudos recentes sobre os temas em comum e valendo-se de métodos comprovadamente capazes de medir tais parâmetros, acredita-se ter avançado no sentido de preencher algumas lacunas sobre aspectos fundamentais envolvidos no processo de ventilação natural, mais especificamente, a vazão de ar e a velocidade do ar.

Evidencia-se a metodologia adotada como um dos principais produtos da tese. Considerando o processo de adensamento e verticalização pelo qual atravessam as principais metrópoles mundiais e, paralelamente, a crescente demanda por edifícios energeticamente eficientes, inclusive com a questão da etiquetagem de edificações que se coloca hodiernamente, avanços na previsão do comportamento dos fluxos no ambiente construído são fundamentais para uma análise mais precisa da influência da ventilação natural no desempenho termoenergético de edifícios. Sobretudo em cidades altamente dependentes desta estratégia passiva de condicionamento térmico, como é o caso de Fortaleza, a aplicação do método se faz necessária, afastando-se de simplificações, reduções ou procedimentos genéricos comumente adotados em investigações semelhantes.

A metodologia é aplicável às localidades em que a ventilação natural pode constituir uma estratégia eficiente de promoção do resfriamento. O diagnóstico climático pode apontar tal possibilidade de acordo com dados de frequência de direção do vento e velocidade do ar dentro de níveis considerados satisfatórios em relação à temperatura do ar, a intensidade dos fluxos e sua constância.

Escolhidos os contextos urbanos que envolvem o edifício de interesse ou que constituem trechos da malha da cidade que atravessam alterações em sua morfologia, dá-se início às simulações da ventilação na escala urbana com a preparação do modelo, sua malha e definição das condições de contorno. Alcançada a convergência, cada cenário urbano e suas condições iniciais determinarão um campo específico de pressões sobre as fachadas e aberturas do edifício escolhido. A edificação, por sua vez, deverá apresentar uma porosidade inferior a 25% de sua fachada, condição básica para realização da simulação segundo o método desassociado, em que primeiro simula-se o campo de pressões sobre as fachadas e aberturas para, depois, calcular os fluxos internos.

As simulações dos fluxos internos têm início com a modelagem e ajuste de malha para o edifício escolhido, com a inserção das condições de contorno (pressão devido ao vento) obtidas nas simulações na escala urbana.

Obtido o nível de resíduos considerado aceitável, os produtos são a vazão de ar e o campo de velocidades em cada ambiente. Tais informações são inseridas no programa de cálculo do desempenho térmico anual, permitindo a análise dos resultados para cada zona térmica (ambiente).

Figura 199 – Fluxograma da metodologia desenvolvida

Foram justamente as limitações apontadas em outros estudos que motivaram a elaboração de um método mais detalhado para avaliar a ventilação natural em sua relação com o meio urbano até seus reflexos no desempenho térmico de ambientes internos. O método empreendido provou ser viável para prever desde a pressão incidente sobre as fachadas, que por sua vez induz o comportamento dos fluxos de ar no interior do edifício, sendo determinante para as taxas de vazão de ar e o campo de velocidades no interior de ambientes.

Ainda sobre esse aspecto, a possibilidade de prever a velocidade do ar em qualquer ponto no interior do apartamento através das simulações CFD permitiu analisar o potencial de resfriamento fisiológico devido ao movimento do ar em diversas situações, de acordo com duas direções de vento, alteradas por diferentes arranjos urbanos e em três níveis em relação ao solo, o que aumentou a complexidade da investigação.

Os valores medidos foram comparados à discussão presente em literatura para a condição quente e úmida, que já confirmou a necessidade de revisão dos limites impostos (HKPD, 2005; CÂNDIDO, 2010; CÂNDIDO; DE DEAR; LAMBERTS, 2011). Tal aspecto foi um dos principais elementos contemplados na recente revisão da ASHRAE 55 (DE DEAR, 2011), culminando na publicação de um adendo à norma (ASHRAE, 2012) e reforça a importância de investigações que discutam este aspecto específico do conforto térmico, por sua natureza, envolvido em complexidade.

Efetivamente, códigos CFD constituem opções avançadas para avaliar precisamente o comportamento do vento e outros fenômenos relativos à dinâmica dos fluidos. A sua incorporação às análises em arquitetura e urbanismo parece ser definitiva, uma vez que os custos são relativamente menores e o tempo destinado aos procedimentos que envolvem as simulações é significativamente mais curto em comparação a ensaios em túnel de vento. As possibilidades são diversas para um campo em que diferentes opções se colocam para o projetista no momento da concepção e organização dos espaços, seja na escala do edifício ou da cidade. Torna-se imperioso, no entanto, que a utilização de modelos CFD, apesar de ainda inacessíveis devido ao custo elevado e ao tempo para treinamento necessário, extrapole os limites do academicismo, em que permanece atrelado às análises de laboratórios em universidades e passe a incorporar a prática de escritórios e do próprio ateliê de projeto.

Ainda que seja necessário um conhecimento aprofundado dos programas envolvidos, demonstrou-se que é possível organizar grande parte das etapas anteriores e posteriores às simulações e adotar soluções para diminuir o tempo e esforço computacional para as análises, o que permite avaliar um maior número de casos e situações. Portanto, os procedimentos utilizados em cada uma das etapas que envolvem a metodologia foram explicitados de forma a permitir a sua transposição para outras análises, seja de situações reais em outras cidades, propostas em projeto ou estudos paramétricos.

No caso da presente pesquisa, o uso da técnica CFD permitiu a realização de um volume considerável simulações e que eram necessários para realizar análises comparativas entre as diversas situações que se colocavam. Entre testes gerais, ajustes de malha e condições de contorno, alguns estudos específicos sobre determinados aspectos e as análises de ventilação natural propriamente ditas foram realizadas inúmeras simulações que dependeram fundamentalmente da versatilidade que caracteriza a

ferramenta e que permitiram que esta pesquisa chegasse a termo. Apesar da avaliação do escoamento do ar em quatro arranjos urbanos e da verificação do comportamento dos fluxos internamente em vinte e quatro situações diferentes, salienta-se que outras possibilidades poderiam ser testadas, tendo a limitação das análises não em função do tempo para finalizá-las, mas em relação à quantidade de dados a serem obtidos e seu enquadramento em um programa de doutorado.

Sobre as simulações fluidodinâmicas, adianta-se que todas atenderam às recomendações de convergência e de independência da malha, compreendidas como condição básica à qualidade dos resultados. Quanto à distância da primeira célula (valor de *yplus*), no entanto, a série de testes contribui para diminuir o peso que este parâmetro tem sobre o cálculo de C_p nas fachadas de edifícios.

A possibilidade de gerar uma só malha e a sua utilização em diversas rodadas de cálculo permite dispender mais tempo sobre a indispensável qualificação desta, testando a influência da camada de prismas, o refinamento junto aos obstáculos e outros aspectos, uma vez que o tempo de cálculo será mais rápido ou até mesmo automatizado pela parametrização ainda na própria plataforma *Workbench*.

Adicionalmente, destaca-se a evolução na compreensão e operacionalização da ferramenta CFD. Em virtude da complexidade dos fenômenos envolvidos e de uma interface não facilitada, vários aspectos concorrem para a imprecisão dos resultados. Nesta tese, alertou-se sobre alguns desses pontos e foram descritas algumas das medidas necessárias para evitar possíveis problemas estruturais.

Por outro lado, simulações do comportamento térmico no ambiente construído utilizando este tipo de programa implicam na adoção de níveis de complexidade maiores, capacidade computacional elevada e requerem maior quantidade de informações, nem sempre disponíveis. Em contrapartida, programas de cálculo do desempenho térmico, como o *DesignBuilder*, podem fornecer análises mais rápidas em uma interface mais amigável. Logo, a escolha dos programas foi feita com base no potencial específico de cada um.

Da mesma sorte, as diferentes partes que compõem a última das três ferramentas computacionais utilizadas na metodologia e as especificações adotadas foram apresentadas em detalhe, permitindo a sua aplicação em outras investigações. A modelagem e a preparação das simulações de desempenho térmico com o *DesignBuilder* também podem ser otimizadas.

6.1. Sobre os resultados

Ao simular as incidências de vento leste e sudeste, que em Fortaleza correspondem a cerca de 80% das ocorrências na direção predominante dos fluxos durante o ano, garantiu-se significativa abrangência na análise da ventilação natural devido à ação do vento.

Da mesma forma, visando uma maior abrangência dos resultados, a verificação do comportamento dos fluxos e seus reflexos no desempenho térmico foi feita em três apartamentos do edifício modelo em diferentes níveis em relação ao solo como forma de caracterizar efeitos específicos que ocorrem com o ganho em altura em relação à condição mais baixa, comumente mais obstruída.

A análise isolada dos ganhos de calor solar atestou reduções significativas devido à obstrução causada pelos edifícios que compunham cada cenário urbano, como era esperado. Apesar de impedir que parcelas significativas de radiação solar atingissem as superfícies verticais dos ambientes situados nos pavimentos mais baixos, sobretudo nos cenários 2 e 3, a ventilação natural mostrou-se fator de maior peso sobre o desempenho térmico e, conseqüentemente, o conforto nos ambientes avaliados.

Especificamente sobre os ganhos de calor devido à insolação, pondera-se que a obstrução à radiação solar provocada pelo entorno, apesar de verificada a significativa redução na carga térmica de apartamentos situados nos pavimentos mais baixos, apresentou efeito inverso, com temperaturas operativas mais elevadas nestes. Nos ambientes situados no pavimento mais baixo do cenário 2, por exemplo, tais resultados podem ser explicados, ao menos em parte, pela dificuldade em perder o calor acumulado pela envoltória quando cessa a incidência solar. Mesmo diante da menor quantidade absorvida durante o dia, o maior confinamento do meio urbano, perceptível pelas máscaras do entorno elaboradas, resultou na maior ocorrência de desconforto, cabendo investigações mais profundas sobre este aspecto. Ademais, tais situações se associaram às mais baixas renovações de ar, o que contribui para determinar piores condições a esses ambientes.

Por outro lado, também com base nos resultados, enfatiza-se que a maior verticalização e adensamento construtivo não implicam, necessariamente, na redução da possibilidade de ventilar fachadas, como reforçam diversos ambientes no cenário 3 que obtiveram vazões de ar semelhantes aos cenários 1 e 4 e outros casos em que as taxas de renovação do ar foram as mais elevadas com o vento leste. Analisando esta incidência de vento, a maior obstrução à radiação solar e o efeito específico imposto pelo conjunto edificado contribuíram para registrar as maiores quantidades de horas em conforto em diversos os ambientes situados neste arranjo urbano.

Ainda, devido ao caráter dinâmico do vento, mesmo diante de um nível significativamente mais elevado de obstrução aos fluxos como verificado no cenário 2, ao incidir de sudeste, a quantidade de trocas de ar neste cenário elevou-se significativamente. Assim, e aqui se destaca como mais importante, mesmo obtendo vazões de ar entre 30% e 40% menores do que formas urbanas menos adensadas, a menor carga térmica devido à obstrução de parcelas da radiação solar determinou melhores condições de conforto térmico em diversos ambientes nesta configuração espacial.

Conclui-se, assim, que, desde que mantidas condições para promover a ventilação natural em meio urbano, em parte garantidas pelos índices que compõem a regulação urbanística, a ação combinada entre o sombreamento proporcionado pela maior verticalização de trechos urbanos adensados, responsável pela redução da radiação solar sobre as fachadas, foi fundamental para garantir condições de conforto térmico satisfatórias durante a maior parte do ano.

Considerando que para o clima tropical quente e úmido, o intervalo em que o movimento do ar configura efeito indesejado está bem acima do indicado em índices, a existência de períodos de desconforto parece estranho, porém acredita-se perfeitamente capaz de diminuir em função das inúmeras possibilidades de adaptação individual (posição do indivíduo em relação às correntes que atravessam o ambiente, diminuição da área de abertura, etc.).

Ainda sobre a limitação da velocidade do ar, compreende-se esta como aplicável ao ambiente de escritório ou de estudo para prevenir o incômodo causado pelo voo de papéis. O mesmo não se aplica a ambientes domésticos ou mesmo de lazer, o que aumenta as possibilidades de utilização da ventilação natural. As características do setor residencial, com cargas internas significativamente mais baixas, postura mais permissiva, vestimentas comumente mais leves e opção de controle individualizado de aberturas e outros meios criam maiores condições de adaptação e, portanto, são mais favoráveis para atingir níveis satisfatórios de conforto térmico.

Atendo-se aos resultados da presente pesquisa, ao considerar o efeito da velocidade do ar calculada em CFD nos ambientes analisados, todos os casos reduziram a quantidade de horas de desconforto. Considerando a mais restritiva faixa de conforto térmico determinada pela ASHRAE 55 (2004), com limites fixados em 2,5 graus acima e abaixo da temperatura neutra para o mês em função da experiência em relação ao clima local, os três ambientes de permanência prolongada mantiveram valores de temperatura operativa dentro dos limites aceitáveis durante a maior parte do ano em 85% dos casos, considerando as 72 situações analisadas, reforçando o papel da estratégia para condição tropical quente e úmida.

Contudo, ao comparar os resultados por ambiente, mais da metade daqueles que obtiveram melhor desempenho estava situado nos cenários 2 e 3, reforçando a atuação conjunta das variáveis obstrução à radiação solar e manutenção da ventilação natural, lançadas como hipótese nesta tese.

Finalmente, destaca-se em relação aos resultados que, apesar do consenso em afirmar a necessidade de reduzir as fachadas voltadas para leste e oeste em clima quente e úmido, tal medida pode trazer reduções na intensidade dos fluxos no interior dos ambientes, comprometendo tanto a vazão de ar, com reflexos na redução da possibilidade de retirada da carga térmica, como o campo de velocidades e, conseqüentemente, o potencial de resfriamento de seus ocupantes. O ângulo de incidência do vento, ainda que não tenha sido analisado mais detalhadamente nesta pesquisa, influencia diretamente tais parâmetros e fomenta a necessidade de investigações mais detalhadas sobre a tais relações em edificações naturalmente ventiladas situadas na condição tropical quente e úmida de baixas latitudes.

6.2. Validação da hipótese

A hipótese se mostrou válida, uma vez que nos arranjos mais adensados através da verticalização, a ação combinada da maior obstrução à radiação solar sobre as fachadas e a possibilidade de ventilação natural foi efetiva para garantir condições de conforto térmico durante a maior parte do ano.

Comparando os resultados por ambiente, sobretudo os compartimentos em pavimentos mais baixos em meio aos cenários 2 e 3 obtiveram as maiores quantidades de horas em conforto, despontando como os melhores entre os demais em mais da metade (55%) das análises comparativas.

Ao considerar o efeito de resfriamento em função do movimento do ar, 85% do total de casos analisados atingiram o objetivo de conforto térmico acima de 80% das horas do ano. Mais especificamente, sete ambientes no cenário 2 e outros cinco ambientes no cenário 3 permitiram os maiores

percentuais de períodos dentro da zona de conforto, o que corresponde a 67% das possibilidades de comparação. Destaca-se tais casos por retratarem justamente condições de maior adensamento em comparação aos cenários 1 e 4.

Além da quantidade expressiva de horas dentro da zona de conforto térmico obtida nos cenários mais verticalizados, a tese de que maiores níveis de densidade urbana são compatíveis com a manutenção da ventilação natural para o conforto térmico em edifícios residenciais é reforçada pelos valores de C_p próximos entre os cenários simulados, além das baixas correlações entre a vazão de ar e a altura média.

6.3. Limitações da tese

Em meio aos resultados obtidos que corroboram a validação da hipótese inicialmente lançada para este estudo, é necessário frisar algumas limitações que envolvem esta tese, sua metodologia e meios utilizados.

Inicialmente, e um dos aspectos estruturais em relação aos resultados alcançados, é a sua representatividade em relação a outras situações não tratadas no âmbito desta pesquisa. O contexto das simulações computacionais aborda especificamente unidades residenciais em altura e em situações nas quais o vento incide diretamente, seja oriundo de leste ou de sudeste. Do ponto de vista urbanístico, ao se comentar que os níveis de adensamento construtivo mais elevados que foram abordados, como nos cenários 2 e 3, permitem a manutenção de condições ambientais favoráveis, outros aspectos são questionáveis, como os reflexos destas formas urbanas nas outras edificações mais baixas situadas na região imediatamente posterior aos edifícios mais altos ou mesmo nos apartamentos nos edifícios modelo dispostos atrás daquele que foi escolhido como base para o conjunto de análises.

Tampouco outros aspectos foram discutidos por fugirem ao escopo desta tese, como o aumento no volume de tráfego, a possibilidade de dispersão de poluentes atmosféricos, a formação de ilhas de calor ou outros fenômenos térmicos. Contudo, reforça-se que a avaliação dessas outras tantas situações a serem consideradas na qualidade ambiental em meio urbano elevaria significativamente o número de possibilidades, o que, por outro lado, também comprometeria a abrangência dos resultados.

Atrelada à hipótese lançada, a manutenção da condição de conforto térmico durante 80% das horas do ano como critério base para analisar os resultados pode ocultar alguns aspectos importantes. Entre estes, destacam-se a permissividade deste critério e o horário em que ocorre desconforto.

O RTQ-R (2012), por exemplo, estabelece que, para a zona bioclimática 8, o valor máximo da temperatura do ar em ambientes de permanência prolongada não deve ultrapassar a maior temperatura do ar no exterior do edifício durante o dia típico de verão, caracterizando este como o critério mínimo de desempenho térmico necessário à edificação. Nesse sentido, considerar que 20% das horas durante o ano ou mesmo em torno de 5 horas durante o dia a temperatura “poderia” ultrapassar os limites considerados confortáveis pode significar um nível de qualidade baixo para as edificações residenciais naturalmente ventiladas, comprometendo a noção do conforto térmico como uma das premissas básicas do ambiente construído.

Outrossim, se os períodos em que a temperatura operativa ultrapassa os limites definidos pelo índice adaptativo escolhido acontecem durante parte da noite e madrugada, a própria abordagem adaptativa poderia estar comprometida, uma vez que os ocupantes estariam mais sujeitos ao ambiente térmico, sem que ações ou medidas pudessem ser tomadas para facilmente reestabelecer a condição de conforto térmico. Sob este aspecto, contudo, enfatiza-se que os horários em que ocorrem situações de desconforto são, em sua maioria, durante a tarde, portanto, em função da alta temperatura operativa. Tomando-se, por exemplo, o cenário 1, os períodos entre 12:00 e 17:00 correspondem entre 70% e 90% do total de horas em desconforto por calor, dependendo do pavimento e do efeito proporcionado pelo movimento do ar na redução da temperatura interna.

Há que se destacar, também, que o arquivo climático utilizado em simulações computacionais é motivo de discussões quanto à representatividade dos seus dados em relação às características locais. Seja este TRY ou TMY e suas respectivas evoluções, como o TMY3 adotado pelo *DesignBuilder*, sua escolha é sempre envolvida em questionamentos por parte dos que abordam as simulações computacionais. Alguns estudos recentes, como tentativa de abordar a questão de maneira diferente, adotam um dia típico como base para suas análises e discutem os resultados para períodos mais curtos. Inclusive, a medida foi sugerida durante o exame de qualificação.

A adoção de um período mais curto, além de não contemplar a sazonalidade das variáveis vivenciadas pelo clima da localidade, ainda restringe a abrangência dos resultados, não permitindo avaliar períodos mais longos.

Ressalta-se que a própria diferença entre os valores em cada tipo de arquivo pode ser significativa, como demonstra o comparativo entre as temperaturas médias (figura 199). Portanto, análises de casos valendo-se da metodologia aqui desenvolvida podem chegar a resultados diferentes, a depender do tipo de arquivo climático utilizado.

Figura 200 – Comparativo temperatura média mensal entre arquivos climáticos TRY e TMY

Sobre a vazão de ar em edifícios, explorou-se o tema visitando técnicas de cálculo simplificadas e até mais complexas, comparando-as. Os métodos de medição da vazão de ar, como vistos durante a revisão bibliográfica, envolvem procedimentos complexos e de custos elevados, o

que compromete possibilidades de verificar a precisão do método numérico aqui utilizado.

Ainda, em relação à bibliografia sobre o tema, permite-se afirmar que inexistem referências em relação às taxas de renovações de ar para edifícios naturalmente ventilados, o que poderia servir de parâmetro de comparação dos dados obtidos com as simulações computacionais. A norma brasileira NBR 16401 (2008) trata de valores mínimos de trocas de ar em ambientes artificialmente condicionados, que todavia não se aplicam às edificações naturalmente ventiladas.

A inserção das taxas de renovação do ar em simulações computacionais de cálculo do desempenho térmico, sua complexidade e influência nos resultados já foi comentada por diversos autores (OLIVEIRA, 2006; CÓSTOLA, 2006; MATOS, 2007; NEGREIROS, 2010; MARCONDES, 2010; GUIMARÃES; CARLO, 2012). Comumente, os programas solicitam que o usuário indique a quantidade de trocas de ar por hora, fixando um valor padrão. Alternativamente, é possível inserir valores de coeficientes de pressão para as aberturas e, de acordo com os algoritmos embutidos neste, é calculada a vazão de ar para cada hora. Entretanto, diante da complexidade que envolve a pressão incidente nas fachadas de edifícios situados em entorno edificado, as duas formas de cálculo da vazão de ar geram incertezas. Na presente pesquisa, tencionou-se avançar em relação a esta deficiência com a aplicação da técnica CFD para determinar o comportamento dos fluxos no interior da edificação analisada e calcular a vazão de ar.

No entanto, os valores obtidos, apesar calculados com uma técnica mais precisa, são adotados como condição limite e são repetidos ao longo de todas as horas do ano quando solicitados para os cálculos de desempenho térmico realizados pelo programa. Apesar da velocidade do vento resultar de uma média dos registros de mais de cerca de dez anos, organizados e filtrados, cabe o questionamento de sua influência sobre os resultados, uma vez altas taxas de renovação de ar tendem a diminuir ou mascarar o desempenho do ambiente.

Nesse sentido, há que se considerar as limitações impostas pelas ferramentas computacionais aqui utilizadas. Mesmo que comprovadamente avançadas, estas podem levar a aspectos questionáveis, como, por exemplo, a borda de pressão negativa percebida durante as simulações e que surge justamente em função de refinamento na malha, ou ainda o efeito contrário à redução na temperatura operativa provocada por formas mais obstruídas quando a vazão era excessivamente baixa, todos estes, aspectos que podem ser levados à frente como objeto de investigações futuras.

6.4. Desenvolvimentos futuros

No momento atual, a inserção dos dados obtidos em cada etapa foi realizada manualmente. Este procedimento enfatiza, por um lado, o caráter experimental do método aplicado e, por outro, permitiu a avaliação constante da qualidade das simulações e mesmo a pertinência de cada resultado alcançado nos diferentes estágios desta investigação.

Acredita-se, contudo, ser possível desenvolver uma sistematização dos dados para alimentar o estágio de simulação seguinte, de forma automatizada, através de interfaces integradas aos programas utilizados como uma das formas de aprimorar a metodologia aqui desenvolvida.

Algumas interfaces são acessíveis e já permitem tal integração (Zhang et al, 2013), otimizando o tempo e, paralelamente, aumentando a precisão dos resultados e o número de situações testadas.

A verificação dos dados de pressões devido ao vento sobre os planos das fachadas obtidos nesta tese pode ser objeto de pesquisas específicas. Medições deste tipo são efetivadas através de ensaios em túnel de vento em instituições dotadas de tais recursos e tem como objetivo a validação dos dados obtidos por meio da técnica CFD. Trata-se de etapa experimental necessária à avaliação da precisão dos resultados e comumente realizada em paralelo às simulações computacionais. Comumente, tomam-se algumas das situações simuladas, comparando os dados entre as duas técnicas, comprovando a qualidade das informações obtidas.

Entretanto, faz-se necessário frisar que a confecção dos elementos a serem submetidos ao túnel de vento, o conhecimento necessário sobre a técnica e demais aspectos necessariamente envolvem um período que extrapolaria os limites e o cronograma propostos para esta tese, tornando necessária a sua realização em momento posterior.

Nesse sentido, faz-se necessário evoluir, também, em relação à forma de previsão da vazão de ar em um intervalo de tempo. Comumente, os programas solicitam ao usuário a determinação de rotinas ou programações das taxas de renovação de ar, isentando-os da necessidade de calculá-las. Uma das possíveis formas seria a comparação dos dados obtidos com o apartamento modelo em medições com modelos em escala ou mesmo reais, devendo ser estudada a metodologia para atingir tal objetivo.

Os valores mais elevados na temperatura operativa em pavimentos mais baixos, mesmo que comprovada a redução da carga térmica incidente devido à obstrução provocada pelo entorno, merece aprofundamento. A forma como o *DesignBuilder* calcula o efeito dos obstáculos que se situam próximo ao edifício, ainda que considerados adiabáticos, suscita uma análise mais detalhada e os sinais para sua explicação estão, possivelmente, nas considerações feitas em Gupta (1987), Araújo & Cabús (2007) e Andersen & Sattrup (2011) e brevemente discutidas em momentos anteriores nesta tese. Os algoritmos de distribuição solar e de convecção das superfícies externas, ambos expressos no item 4.2.2.5, foram adotados a partir de referências da literatura. Os efeitos destes no desempenho térmico podem ser melhor avaliados isolando-se sua interação com as variáveis ambientais e, principalmente, através de análises paramétricas, sendo o estudo até aqui desenvolvido, um ponto de partida para seu aprofundamento.

Outra possibilidade de aplicação da metodologia aqui empreendida está, possivelmente, na extrapolação de sua escala de abordagem, passando à análise dos efeitos combinados da obstrução provocada pelo meio urbano sobre o sombreamento e a circulação do ar em espaços abertos, no nível da rua, e seus efeitos sobre o conforto do pedestre. Temas, em parte, já tratados por Prata (2005) ou sob outro enfoque em Carvalho (2006) e Carvalho et al (2009) e ainda mais completos no tratamento realizado por Brandão (2009) sugerem a existência de um fértil conjunto de análises possíveis, com produtos diversos também em sua relação com as prescrições urbanísticas.

7. Referências bibliográficas

- ACHÃO, C. C. L. **Análise da estrutura de consumo de energia pelo setor residencial brasileiro.** (Tese). Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- ACIOLY, C., DAVIDSON, F. **Densidade Urbana: um instrumento de planejamento e gestão urbana.** Rio de Janeiro: Mauad, 1998.
- ACSELRAD, H. **Discursos da sustentabilidade urbana.** Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, São Paulo: ANPUR 1: 79 – 90, 1999.
- ADOLPHE, L. **A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities.** Environment and Planning B: Planning and Design, 28, 183 – 200, 2001.
- ALCOFORADO, M. J. **O clima da região de Lisboa, contrastes e ritmos térmicos.** Memórias do Centro de Estudos Geográficos, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa, 1992.
- ALCOFORADO, M. J.; LOPES, A.; ANDRADE, H.; VASCONCELOS, J. **Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa.** Centro de Estudos Geográficos. Área de investigação de geo-ecologia. Universidade de Lisboa: Lisboa, 2005.
- ALLARD, F. **Natural ventilation in buildings: a design handbook.** James & James, 1998.

- ALLARD, F.; GHIAUS, C. **Natural ventilation in the urban environment**. In: Building Ventilation: the state of the art. SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. (org.) Earthscan: Londres, 2006.
- ALLARD, F.; GHIAUS, C.; SZUCS, A. **Natural ventilation in high-density cities**. In: Designing high-density cities for social and environmental sustainability. Edward Ng (org.). Earthscan: Londres, 2010.
- ALMEIDA, M. A.; SCHAEFFER, R.; ROVERE, E. L. **The potential for electricity conservation and peak load reduction in the residential sector of Brazil**. Energy 26: 413 – 429, 2001.
- ALUCCI, M. P. **CLIMATICUS_4.2.xls**. criado em 2005, com acesso em agosto de 2009, disponível no site: <http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html>.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING (ASHRAE). **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 1985.
- _____. **ASHRAE Standard 55-1992: thermal environmental conditions for human occupancy**. ASHRAE: Atlanta, 1992.
- _____. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 2001.
- _____. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 2003.
- _____. **ASHRAE Standard 55-2004: thermal environmental conditions for human occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 2004.
- _____. **ASHRAE standards 62-2007: ventilation for acceptable indoor air quality**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 2007.
- _____. **ASHRAE standard 55-2004: thermal environmental conditions for human occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 2010.
- _____. **Addendum to ANSI/ASHRAE standard 55 – 2010: thermal environmental conditions for human occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 2012.
- ANDERSEN, J. S.; SATTRUP, P. A. **The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains**. Energy and Buildings 43: 011-2020, 2011.
- ANDRADE, H. **O clima urbano - natureza, escalas de análise e aplicabilidade**. In: Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia. n. 80, 2005.
- ARAÚJO, V. M. D. **Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro**. (Tese). Doutorado em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

ARAÚJO, I. A. L.; CABÚS, R. C. **Influência da luz natural refletida pelo entorno na iluminação de edifícios em cânions urbanos no trópico úmido.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: ANTAC, 2007.

ASFOUR, O. S. **Prediction of wind environment in different grouping patterns of housing blocks.** Energy and Buildings 42: 2061 – 2069, 2010.

ASFOUR, O. S.; GADI, M. B. **A comparison between CFD and network models for predicting wind-driven ventilation in buildings.** Building and Environment 42: 4079 – 4085, 2007.

ASSIS, E. S. **Mecanismos de desenho urbano apropriados à atenuação da ilha de calor urbana: análise de desempenho de áreas verdes em clima tropical.** (Dissertação). Mestrado em Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

_____. **Bases teóricas para a aplicação da climatologia ao planejamento urbano.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1997, Salvador. Anais... Salvador: ANTAC, 1997.

_____. **Impactos da forma urbana na mudança climática: método para a previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano.** (Tese). Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

_____. **A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória.** ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2005.

ASSIS, E. S.; FROTA, A. B. **Urban bioclimatic design strategies for a tropical city.** Atmospheric Environment 33: 4135 – 4142, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220 – 3: desempenho térmico de edificações residenciais.** Parte 3 – Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

_____. **NBR 16401: instalações centrais de ar condicionado para conforto: parâmetros básicos de projeto.** Rio de Janeiro, ABNT, 2008.

AULICIEMS, A.; SZOKOLAY, S. **Thermal comfort. PLEA Note 3.** PLEA International/ University of Queensland. 2 ed. 2007.

AUTODESK, Inc. **Autodesk Ecotect Analysis.** Version 2011. [S.I.]: Autodesk Brasil, 2010.

AWBI, H. B. **Ventilation of buildings.** London: E & FN Spon, 1991.

AYNSLEY, R. **Estimating summer wind driven natural ventilation potential for indoor thermal comfort.** Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 83, 1999a.

- _____. **Unresolved Issues in Natural Ventilation for Thermal Comfort.** First International One day Forum on Natural and Hybrid Ventilation, HybVent Forum'99, 09/1999, Sydney, 1999b.
- AYNSLEY, R.; MELBOURNE, W.; VICKERY, B. **Architectural aerodynamics.** Applied Science Publishers Ltd., Londres, 1977.
- BADY, M. KATO, S. HUANG, H. **Towards the application of indoor ventilation efficiency indices to evaluate the air quality of urban areas.** Building and Environment 43: 1991–2004, 2008.
- BARBIRATO, G. M.; SOUZA, L. C. L.; TORRES, S. C. **Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos.** Maceió: EDUFAL, 2007.
- BASTIDE, A.; LAURET, P. GARDE, F.; BOYER, H. **Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates: Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of well-ventilated living spaces in buildings using natural ventilation.** Energy and Buildings 38: 1093 –1103, 2006.
- BAUMAN, F. S.; ERNEST, D. R.; ARENS, E. A. **The effects of external wind pressure distributions on wind-induced air motion inside buildings.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41: 2539 – 2550, 1992.
- BEN (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL). **Resultados preliminares BEN 2010 – ano base 2009.** Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível *on line* em: <http://www.mme.gov.br/>. Acesso em 05/03/2011.
- BITAN, A. **The high climatic quality of city of the future.** Atmospheric Environment 26B, 313 – 329, 1992.
- BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J. **CFD Simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems.** Atmospheric Environment: 41, n. 2, 238-252, 2007.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural.** Maceió: EDUFAL, 2005.
- BRANDÃO, A. H. P. M. **O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro.** (Tese). Departamento de Geografia, FFLCH/USP, 1996.
- BRANDÃO, R. S. **Acesso ao sol e à luz natural: avaliação do impacto de novas edificações no desempenho térmico, luminoso e energético do seu entorno.** (Dissertação). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- _____. **As Interações espaciais urbanas e o clima.** (Tese). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- _____. **Urban microclimate.** In: GONÇALVES, J. C. S. UMAKOSHI, E. M. **The environmental performance of tall buildings.** London: Earthscan, 2010.
- BRASIL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o nível de eficiência energética de Edificações Residenciais – RTQ-R.** INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Rio de Janeiro, 2012.
- BREHENY, M. **Urban compaction: feasible and acceptable?** Cities 14: 209–217, 1997.

- BRITISH STANDARD INSTITUTE. **BSI – BS 5925: Code of Practice for Ventilation** Principles and Designing for Natural Ventilation. Londres, 1991.
- BURNETT, J. BOJIC, M.; YIK, F. **Wind-induced pressure at external surfaces of a high-rise residential building in Hong Kong**. Building and Environment 40: 765–777, 2005.
- CARLOS, A. F. A. **A cidade**. 2 ed. São Paulo: Contexto, 2007.
- CAMPOS FILHO, C. M. **Cidades brasileiras : seu controle ou o caos : o que os cidadãos devem fazer para a humanização das cidades no Brasil**. São Paulo: Nobel, 1989.
- CÂNDIDO, C. M. **Aceitabilidade do movimento do ar e conforto térmico em climas quentes e úmidos**. (Tese). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R. **Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot-humid climate**. Building and Environment 46, 379 – 385, 2011.
- CARRILHO DA GRAÇA, G.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L. R.; NORFORD, L.K. **Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai**. Energy and Buildings 34: 1-11, 2002.
- CARRILHO DA GRAÇA, G.; MARTINS, N. R.; HORTA, C. S. **Thermal and airflow simulation of a naturally ventilated shopping mall**. Energy and Buildings 50: 177–188, 2012.
- CARVALHO, H. J. M. **Metodologia para a análise das interações entre a forma urbana e o clima: aplicação a uma cidade brasileira de clima litorâneo com baixa latitude**. (Tese). Doutorado em Urbanismo. PROURB/FAU/URFJ, Rio de Janeiro, 2006.
- CARVALHO, H. J. M.; CAVALCANTI, A. K. G.; RIBEIRO, C. A.; ROCHA, J. P.; SILVA, M. P. SILVEIRA, J. G.; SANTOS, M. A. **Relação entre o sombreamento provocado pelas edificações e o campo térmico**. ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2009, Natal. Anais... Natal: ANTAC, 2009.
- CELINSKI, F.; SANTOS, G. H.; MENDES, N. **Análise térmica de um ambiente através da dinâmica dos fluidos computacional**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2003, Curitiba. Anais... Curitiba: ANTAC, 2003.
- CFX, **CFX 5 Solver Models**. Diddcot Oxfordshire: CFX, 2003.
- CHAFI, F. Z.; HALLÉ, S. **Three dimensional study for evaluating of air flow movements and thermal comfort in a model room: experimental validation**. Energy and Buildings 43, 2156 – 2166, 2011.
- CHALIFOUX, A. **Edificações e infraestrutura urbana de alto desempenho**. In: Urbanismo sustentável: desenho urbano com a natureza. Douglas Farr. Porto Alegre: Bookman, 2013.

- CHANDLER, T. J. **Urban Climatology and its Relevance to Urban Design**. Geneva, WMO. Technical Note 149, 1976.
- CHANG, W. R. **Effect of porous hedge on cross ventilation of a residential building**. Building and Environment, 41: 549 – 556, 2006.
- CHENG, C. K.; LAM, K. M.; DEMIRBILEK, F. N. **Effects of building wall arrangements on wind-induced ventilation through the refuge floor of a tall building**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96: 656 – 664, 2008.
- CHENG, C. K. C.; LAM, K. M.; LEUNG, Y. T. A.; YANG, K.; DANNY, H. W. L.; SHERMAN, C. P. C. **Wind-induced natural ventilation of re-entrant bays in a high-rise building**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 99: 79 – 90, 2011.
- CHENG, V. **Human perception of urban density**. (PhD Thesis). Department of Architecture, University of Cambridge, 2010.
- CHENG, V.; STEEMERS, K.; MONTAVON, M.; COMPAGNON, R. **Urban Form, Density and Solar Potential**. 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Geneva, Switzerland, 2006.
- CHEUNG, C. K.; FULLER, R. J.; LUTHER, M. B. **Energy-efficient envelope design for high-rise apartments**. Energy and Buildings 37: 37–48, 2005.
- CHEUNG, J. O. P.; LIU, C. **CFD simulations of natural ventilation behaviour in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings**. Energy and Buildings. V. 43: 1149 – 1158, 2011.
- CIBSE Applications Manual. The chartered institution of building services engineers. Londres, 1997.
- COST. **Cost Action 14: recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment**. Brussels: COST, 2004.
- COSTA, A. D. L. **Análise bioclimática e investigação do conforto térmico em ambientes externos: uma experiência no bairro de Petrópolis em Natal/RN**. (Dissertação). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.
- COSTA, F. J. M. **Ventilação e prescrições urbanísticas – Uma aplicação simulada no bairro de Petrópolis em Natal/RN**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2001.
- CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação**. (Dissertação). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Tecnologia da Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- CÓSTOLA, C.; ALUCCI, M. P.; ETHERIDGE, D. **Caracterização de janelas no cálculo de vazão por meio do coeficiente de descarga**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2009, Natal. Anais... Natal: ANTAC, 2009.

- CÓSTOLA, D., BLOCKEN, B., HENSEN, J. **Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs**. Building and Environment 10: 2027-2036, 2009.
- COUCH, C.; KARECHA, J. **Controlling urban sprawl: Some experiences from Liverpool**. Cities 23: 353–363, 2006.
- DAVENPORT, A. G.; GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R.; WEIRINGA, J. **Estimating the roughness of cities and sheltered country**. Prepr. 12 th AMS Conf. on Applied Climatology (Asheville), pp. 96 – 99, 2000.
- DE DEAR, R. **Recent enhancements to the adaptive comfort standard in ASHRAE 55-2010**. 45th Annual Conference of the Architectural Science Association, ANZAScA. University of Sydney, 2011.
- DE DEAR, R. J., BRAGER, G. S.; COOPER, D. **ASHRAE RP-884 Final Report: developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 1997.
- DE DEAR, R. J., BRAGER, G. S. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. ASHRAE Transactions 104, 1998.
- _____. **Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55**. Energy and Buildings 34: 549–561, 2002.
- DOE, UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY a. **EnergyPlus Graphical User Interfaces**. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/ep_interfaces.cfm Acesso em 22/01/2013. 2012.
- _____. b. **EnergyPlus Energy Simulation Software**: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm. Acesso em 19/01/2013. 2012.
- DUARTE, D. H. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental: método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano**. (Tese). Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- DUARTE, D. H. S., SERRA, G. G. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e proposta de um indicador**. Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, 3: 7 – 20, 2003.
- ECKARDT, W. V. **A crise das cidades: um lugar para viver**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1975.
- EDSL. **TAS building simulator 9.09e**. United Kingdom, 2008.
- ELETROBRÁS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - SINPHA-ano base 2005 – Classe Residencial Relatório Brasil**. PROCEL, 2007.
- EIA (Energy Information Administration). **Annual Energy Outlook**. (EIA), Washington, 2006.
- _____. **International Energy Outlook 2013**. U.S. Department of Energy, 2014. Acesso em 18/04/2014.

- EMMANUEL, R.; ROSENLUND, H.; JOHANSSON, E. **Urban shading – a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka**. International Journal Of Climatology n. 27: 1995 – 2004, 2007.
- EN 1991-1-4: EUROCODE 1. **Actions on structures, general actions**. Part 1-4, Wind actions, CEN, Bruxelas, 2005.
- EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Estatística e Análise do Mercado de Energia Elétrica Boletim Mensal (mês-base: dezembro 2006)**. Rio de Janeiro, 2007.
- ETHERIDGE D. W.; SANDBERG, M. **Building Ventilation: theory & measurement**. Chichester: Jonh Wiles & Sons, 1996.
- EVANS, M.; SCHILLER, S. **Diseño Bioambiental y arquitectura Solar**. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. 3 ed., 1994.
- FANGER, P. O. **Thermal comfort**. Mcgraw book Company, Nova York, 1970.
- _____. **Airflow characteristics of occupied zone of ventilated space**. ASHRAE Transactions. New York: ASHRAE, 1987.
- FANGER, P. O.; MELIKOV A. K.; HANZAWA, H.; RING, J. **Air turbulence and sensation of draught**. Energy and Buildings 12: 21 – 29, 1988.
- FANGER, P. O.; TOFTUM, J. **Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates**. Energy and Buildings 34: 533 – 536, 2002.
- FATHY, H. **Natural energy and vernacular architecture: principles and examples with reference to hot arid climates**. The University of Chicago Press, Chicago, 1986.
- FIGUEIREDO, C. **Ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo: limites e possibilidades**. (Dissertação). Mestrado em Tecnologia da Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.
- FORTALEZA. **Plano diretor participativo de Fortaleza – PDPFor**. Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2009.
- FREITAS, R. **Entre mitos e limites: as possibilidades do adensamento construtivo face à qualidade de vida no ambiente urbano**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2008.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. Editora Nobel, 7 ed., São Paulo, 2003.
- GANDEMER, J.; BARNAUD, G. **Ventilation naturelle des habitations sous climat tropical humide: aproach aerodynamique**. Report for the CSTB, Nantes, 1989.
- GAUZIN-MÜLLER, D. **Arquitetura ecológica**. Editora Senac: São Paulo, 2011.
- GELLER, H. S. **Revolução Energética: Políticas para um Futuro Sustentável**. Rio de Janeiro: 2003.
- GEORGAKIS, C.; SANTAMOURIS, M. **Wind and temperature in the urban environment**. In: Natural Ventilation in the urban environment: Assesment and Design. Ghiaus e Allard, org. Buildings, Energy, Solar Techonolgy, Londres, 2005.

- GHIAUS, C.; ALLARD, F.; SANTAMOURIS, M.; GEORGAKIS, C.; NICOL, F. **Urban environment influence on natural ventilation potential**. Building and Environment 41: 395 – 406, 2006.
- GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. **Electricity end uses in the residential sector of Brazil**. Energy Policy 35: 4107 – 4120, 2007.
- GIRARDET, H. **Creating sustainable cities**. Green Books LTD/The Schumacher Society, Bristol, 2007.
- GIVONI, B. **Man, climate and architecture**: Architectural science series. Amsterdam: Elsevier Publishing Company Limited, 1969.
- _____. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: John Wiley and Sons, 1994.
- _____. **Climate considerations in buildings and urban design**. New York: John Wiley e Sons, 1998.
- _____. **Thermal comfort issues and implications in high-density cities**. In: Designing high-density cities for social and environmental sustainability. Edward Ng (org.). Earthscan: London, 2010.
- GOLANY, G. S. **Urban design morphology and thermal performance**. Atmospheric Environment, 30: 455 – 465, 1996.
- GOMES, P. S. **Ocupação do Solo e Microclimas Urbanos: o caso de Montes Claros, MG**. (Dissertação). Mestrado em Arquitetura. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- GOMES, P. S.; LAMBERTS, R. **O estudo do clima urbano e a legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros, MG**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 73-91, jan./mar. 2009.
- GONÇALVES, J. C. S. **A sustentabilidade do edifício alto**. (Tese). Doutorado em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- _____. **Uma nova geração de edifícios altos de escritório no cenário internacional: o caso da nova sede da empresa Swiss re, Londres**. IV Seminário Internacional Latin American Real Estate Society (LARES). São Paulo, 2004.
- GRIMMOND, C. S. B. **Progress in measuring and observing the urban atmosphere**. Theoretical and Applied Climatology. n. 84, 3 - 22, 2005.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. **Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form**. Journal of Applied Meteorology 38: 1262 – 1292, 1999.
- GUIMARÃES, I.; CARLO, J. **Modelling issues for the energy simulation of a naturally ventilated building according to the Brazilian labelling program**. 28th Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Peru, 2012.

- GUPTA, V. **Thermal efficiency of building clusters: an index for non airconditioned buildings in hot climates.** In: D. Hawkes (Ed.), *Energy and Urban Built Form*, Butterworths, UK, 1987.
- HALL, P. **Cidades do amanhã: uma história intelectual do planejamento e do projeto urbanos no século XX.** São Paulo: Perspectiva, 2007.
- HANG, J.; LI, Y. **Macroscopic simulations of turbulent flows through high-rise building arrays using a porous turbulence model.** *Building and Environment* 49: 41 – 54, 2012.
- HIGUERAS, E. **Urbanismo Bioclimático.** Barcelona: Gustavo Gili, 2006.
- HIRANO, T.; KATO, S.; MURAKAMI, S.; IKAGA, T.; SHIRAIISHI, Y. **A study on a porous residential building model in hot and humid regions: Part 1—the natural ventilation performance and the cooling load reduction effect of the building model.** *Building and Environment* 41: 21–32, 2006.
- HKPD (Hong Kong Planning Department). **Feasibility study for establishment of air ventilation assessment system.** Final Report. The government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2005.
- HUI, S. C. M. **Low energy building design in high density urban cities.** *Renewable Energy* 24. 627–640, 2001.
- INDRAGANTI, M. **Adaptive use of natural ventilation for thermal comfort in Indian apartments.** *Building and Environment* 45: 1490–1507, 2010.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contagem da população 2007.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. (Acesso em 11/07/2008).
- _____. **Sinopse do censo demográfico 2010.** IBGE: Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2014 publicadas no Diário Oficial da União em 28/08/2014.** Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, 2014. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=230440&idtema=130&search=ceara|fortaleza|estimativa-da-populacao-2014->. acessado em 05/01/2015.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Cool appliances policy strategies for energy-efficient homes.** Paris, 2003.
- _____. **World Energy Outlook 2008.** Paris, 2008. Disponível online em: http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO_2008_es_english.pdf acesso em 10/11/2011.
- _____. **CO₂ emissions from fuel combustion highlights.** IEA Publications: Paris, 2013.
- INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION (IRR). **Statement during the United Nations Climate Change Conference.** Warsaw, Poland, November 11 – 22, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7730. Moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.** Genève: ISO, 1994.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change.** Full Report, Working Group III of the IPCC, 2007. Disponível *on line* em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>. Acesso em 15/08/2012.

_____. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report: Summary for Policy Makers. Disponível *on line* em: www.ipcc.ch/. Acesso em 23/11/2013.

_____. **Working group III – mitigation of climate change.** Chapter 9: Buildings. 2013.

IZARD, J. L., GUYOT, A. **A arquitetura bioclimática.** Barcelona, Gustavo Gilli, 1980.

JACOBS, J. **Morte e vida de grandes cidades.** São Paulo: Martins Fontes, 2000.

JANNUZZI, G. M.; SCHIPPER, L. **The structure of electricity demand in the brazilian household sector.** Energy Policy 19: 879, 891, 1991.

JENKS, M.; BURGESS, R. **Compact cities: sustainable urban forms for developing countries.** Londres: Spon Press, 2000.

KATZSCHNER, L. **Urban climate studies as tools for urban planning and architecture.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1997, Salvador. Anais... Salvador: ANTAC, 1997.

_____. **New developments in applied urban climatology.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2007, Ouro Preto. Anais... Belo Horizonte: ANTAC, 2007.

KOENIGSBERGER, O.; INGERSOL, T. G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S. V. **Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design.** London: Longman, 1974.

KOLOKOTRONI, M.; KUKADIA, V.; PEREIRA, M. **NATVENT – European Project on overcoming technical barriers to low energy natural ventilation.** In: Proceedings of the CISBE/ASHRAE Joint National Conference – Part 2, CISBE, Londres, 1996.

KOTANI, H.; SATOH, R.; YAMANAKA, T. **Natural ventilation of light well in high-rise apartment building.** Energy and Buildings 35: 427 – 434, 2003.

KNOLL, B.; PHAFF, J. C.; GIDS, W.F. **Pressure simulation program.** Proceedings of 16th AIVC Conference, p. 233-241, 1995.

LAM, K. M, LEUNG, M.Y. H., ZHAO, J. G. **Interference effects on wind loading of a row of closely spaced tall buildings.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96: 562 – 583, 2008.

LAM, J. C. **Shading effects due to nearby buildings and energy implications.** Energy Conversion & Management 41: 647 – 659, 2000.

- LAMAS, J. M. R. G. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. Orgal: Porto, 2007.
- LAMBERTS, R.; GOULART, S.; CARLO, J.; WESTPHAL, F.; PONTES, R. O. **Regulamentação de etiquetagem voluntária de nível de eficiência energética de edifícios comerciais e públicos**. ENCAC, Ouro Preto, 2007.
- LAMBERTS, R.; TRIANA, M. **Documento 2.2: levantamento do estado da arte: energia**. Projeto FINEP 2386/04. São Paulo, 2007.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014.
- LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. Academic Press, New York, 1981.
- LEITE, C. **Cidades sustentáveis, cidades inteligentes: desenvolvimento sustentável num planeta urbano**. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- LEITE, C. G. **Alterações da ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da avenida litorânea de São Luís/MA**. (Dissertação). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- LEITE, R. C. V. **Fortaleza: terra do vento a influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido**. (Dissertação). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.
- LEITE, R. C. V.; FROTA, A. B. **Procedimentos para determinação de coeficientes de pressão em diferentes condições de adensamento urbano**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013, Brasília. Anais... Brasília: ANTAC, 2013.
- LI, D. H.W.; WONG, S. L. **Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings**. Applied Energy 84: 1199 – 1209, 2007.
- LIDDAMENT, M. W. **Air infiltration calculation techniques - an applications guide**. Grã-Bretanha: The Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), 1986.
- LIPING, W.; HIEN, W. N. **The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore**. Building and Environment 42: 4006 – 4015, 2007.
- LIU, S.; LIU, J.; YANG, Q. PEI, J.; LAI, D.; CAO, X.; CHAO, J.; ZHOU, C. **Coupled simulation of natural ventilation and daylighting for a residential community design**. Energy and Buildings 68: 686 – 695, 2014.
- LOPES, A. M. S. **Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano: vento, ilha de calor de superfície e balanço energético**. (Tese). Doutorado em Geografia Física. Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003.
- LOURA, R. M.; ASSIS, E. S.; BASTOS, L. E. G. **Avaliação de desempenho térmico de soluções de envoltória para edifícios multifamiliares Localizadas no Rio de Janeiro, RJ**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14, 2012, Juiz de Fora. Anais... Juiz de Fora, ANTAC, 2012.

MACEDO, S. S. **São Paulo, Paisagem e Habitação Verticalizada: os espaços livres como elementos de desenho urbano.** (Tese). Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

MALVEIRA, E. C. H. **Variações de parâmetros climáticos urbanos em Fortaleza – CE no contexto da ‘ilha de calor’: sua importância para o desenvolvimento sustentável.** (Monografia). Graduação em Geografia. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1998.

MARCONDES, M. P. **Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo.** (Tese). Doutorado em Tecnologia da Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2010.

MARQUES, R. S. **Ventilação e prescrições urbanísticas: uma aplicação simulada para a orla da Praia do Meio em Natal – RN.** (Dissertação). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

MARTINS, D. J.; RAU, S. L.; RECKZIEGEL, S.; FERRUGEM, A. P.; DA SILVA, A. C. S. B. **Ensaio sobre a utilização da automação de aberturas na simulação do desempenho térmico de edificações.** ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2009, Natal. Anais... Natal: ANTAC, 2009.

MARTINS, T. A. L.; BONHOMME, M.; ADOLPHE, L. **Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 213-233, out./dez. 2013.

MARTINS, T. A. L.; ADOLPHE, L.; BASTOS, L. E. G. **From solar constraints to urban design opportunities: optimization of built form typologies in a Brazilian tropical city.** Energy and Buildings 76: 43 – 56, 2014.

MASCARÓ, L. R.; MASCARÓ, J. L. **Ambiência Urbana.** Porto Alegre: D.C. Luzzatto, 1996.

MATOS, M. **Simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural.** (Dissertação). Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

MELARAGNO, M. **Wind in architectural design.** New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

_____. **Wind in Architectural and Environmental Design.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. B. **Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil.** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5: 47-68, 2005.

- MENDONÇA, F. **Clima e planejamento urbano: proposição metodológica e sua aplicação à cidade de Londrina/PR.** (Tese). Doutorado em Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- MIANA, A. C. **Adensamento e forma urbana: inserção de parâmetros ambientais no processo de projeto.** (Tese). Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2010.
- MOCHIDA, A.; YOSHINO, H.; TAKEDA, T.; KAKEGAWA, T.; MIYAUCHI, S. **Methods for controlling airflow in and around a building under cross-ventilation to improve indoor thermal comfort.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93: 437–449, 2005.
- MOESEKE, G. V.; GRATIA, E.; REITER, S.; DE HERDE, A. **Wind pressure distribution influence on natural ventilation for different incidences and environment densities.** Energy and Buildings 37: 878 – 889, 2005.
- MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano.** Série Teses e Monografias nº 25. São Paulo: Instituto de Geografia/USP, 1976.
- MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima urbano.** São Paulo: Contexto, 2003.
- MOURA, M. O. **O clima urbano de Fortaleza sob o nível do campo térmico.** Dissertação (Programa de Pós-graduação em Geografia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- MUMFORD, L. **A cultura das cidades.** Belo Horizonte: Ed. Itatiaia, 1961.
- MUNSON, B.; YOUNG, D.; OKIISHI, T. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos.** Volumes 1 e 2 - Versão SI. São Paulo: Edgard Blucher, 1997.
- MURAKAMI, S.; OOKA, R.; MOCHIDA, A. YOSHIDA, S.; KIM, S. **CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 81: 57 – 81, 1999.
- NEGREIROS, B. A. **Análise de métodos de predição de conforto térmico de habitação em clima quente-úmido com condicionamento passivo.** (Dissertação). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- NEUMAN, M. **The compact city fallacy.** Department of Landscape Architecture and Urban Planning, Texas A & M University, Texas, 2003.
- NG, E. **An investigation into parameters affecting an optimum ventilation design of high density cities.** International Journal of Ventilation, n. 4. V.6, 2008.
- _____. **Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong.** Building and Environment 44: 1478–1488, 2009.
- NG, E.; YUAN, C.; CHEN, L.; REN, C.; FUNG, J. C. H. **Improving the wind environment in high density cities by understanding urban morphology and**

surface roughness: a study in Hong Kong. Landscape and Urban Planning 101: 59 – 74, 2011.

NICOL, J. F. **Thermal comfort: state of the art and future directions.** In SANTAMOURIS, M. (ed.) Solar thermal technologies – the state of the art, James & James: Londres, 2003.

NICOL, J. F. **Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics.** Energy and Buildings 36: 7, 628-637, 2004.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. **Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings.** Energy and Buildings 34: 563 – 572, 2002.

NICOL, F.; WILSON, M. **Noise in street canyons.** Research report, URBVENT Project, European Commission London, 2003.

NISHIZAWA, S.; SAVACHI, T.; NARITA, K.; SETO, H.; ISHIKAWA, Y. **A wind tunnel full scale building model comparison between experimental and CFD results based on the standard k- ϵ turbulence representation.** International Journal of Ventilation 2: 419–429, 2003.

NOBRE, E. A. C. **Desenvolvimento urbano e sustentabilidade: uma reflexão sobre a grande São Paulo no começo do século XXI.** In: NUTAU, 2004.

NUCCI, J. C. **Qualidade ambiental e adensamento urbano.** Curitiba, 2 ed. Edição do Autor, 2008. Disponível em: www.geografia.ufpr.br/laboratorios/labs (acesso em 20/11/2012.)

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates.** 2 ed. London: Methuen, 1987.

_____. (a) **Street design and urban canopy layer climate.** Energy and Buildings 11, 103 – 113, 1988.

_____. (b) **The urban energy balance.** Progress in Physical Geography, n. 12, 1988.

_____. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites.** Report 81, WMO/TD-No. 1250. Geneva : World Meteorological Organization, 2006. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>. Acesso em: jul 2014.

OLESEN, B. W. **The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings.** Energy and Buildings 39: 740 – 749, 2007.

OLGYAY, V. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism:** Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1963.

OLGYAY, V.; OLGAY, A. **Solar control and shading devices.** Princeton: Princeton University, 1957.

OLIVEIRA, A. G. **Proposta de método para avaliação do desempenho térmico de residências unifamiliares em clima quente e úmido.** (Dissertação). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

- OLIVEIRA, P. A. **Cidade Apropriada ao Clima: a forma urbana como instrumento do clima urbano.** (Dissertação). Departamento de Urbanismo da Universidade de Brasília: Universidade de Brasília- UNB, Brasília - DF, 1985.
- OROPEZA-PEREZ, I.; ØSTERGAARD, P. A.; REMMEN, A. **Model of natural ventilation by using a coupled thermal-airflow simulation program.** Energy and Buildings 49: 388 – 393, 2012.
- PEDRINI, A., WESTPHAL, F.S., LAMBERTS, R. **A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates.** Building and Environment. v.37, p. 903-912, 2002.
- PEISER, R. **Decomposing urban sprawl.** Town Planning Review 72: 275–298, 2001.
- PEREGRINO, P. **Inter-relações existentes entre os escoamentos de ventos e os padrões de ocupação do solo nos bairros do Cabo Branco e Tambaú/João Pessoa – PB.** (Dissertação). Mestrado em Engenharia Urbana. João Pessoa: UFPB, 2005.
- PEREGRINO, P. S. A., SILVA, F. A. G. **Escoamentos de ventos e padrões de ocupação do solo em João Pessoa/PB.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2007, Ouro Preto. Anais... Belo Horizonte: ANTAC, 2007.
- PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. **Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 31-51, jan./mar. 2010.
- PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. **A review on buildings energy consumption information.** Energy and Buildings. V.40, 394 – 398, 2008.
- PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; GONZÁLEZ, R.; MAESTRE, I. R. **A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes.** Energy and Buildings 41: 272 – 278, 2009.
- PETALAS, K. V. **Impactos sobre os parâmetros climáticos em duas áreas de Fortaleza – CE.** (Dissertação). Universidade Federal do Ceará. Pós-Graduação da Engenharia Civil, Fortaleza, 2000.
- PITTS, A. **Energy in high-density cities.** In: Designing high-density cities for social and environmental sustainability. Edward Ng (org.). Earthscan: London, 2010.
- PRAJONGSAN, P.; SHARPLES, S. **Enhancing natural ventilation, thermal comfort and energy savings in high-rise residential buildings in Bangkok through the use of ventilation shafts.** Building and Environment 50: 104 – 113, 2012.
- PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano.** 2005. (Tese). Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

- PRATA-SHIMOMURA, A. R. **Relatório 3**. FAPESP. Programa de Pós-Doutoramento. São Paulo, 2010.
- PRIYADARSINI, R.; CHEONG, K. W.; WONG, N. H. **Enhancement of natural ventilation in high-rise residential buildings using stack system**. Energy and Buildings 36: 61 – 71, 2004.
- RAMPONI, R.; BLOKEN, B. **CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters**. Building and Environment 53: 34-48, 2012.
- RIVERO, R. **Arquitetura e Clima. Condicionamento Térmico Natural**. Porto Alegre: Luzzato, 1985.
- RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. São Carlos, 2012. Disponível em: http://www.labeeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/sobre_epw.pdf. Acesso em 07/12/2012.
- RORIZ, M.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Uma proposta de norma técnica brasileira sobre desempenho térmico de habitações populares**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1999, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ANTAC, 1999.
- ROSSI, A. **A arquitetura da cidade**. São Paulo: Martins Fontes, 1995.
- ROAF, S. C. **The sustainability of high density**. In: Designing high-density cities for social and environmental sustainability. Edward Ng (org.). Earthscan: London, 2010.
- ROMERO, M. A.; REIS, L. B. **Eficiência energética em edifícios**. Barueri, SP: Manole, 2012.
- ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo: Projeto, 1988.
- _____. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2001.
- ROGERS, R. **Cities for a small planet**. London: Faber and Faber, 1997.
- SAKAMOTO, L. L. S. **Relações entre a temperatura do ar e a configuração do céu na área central da metrópole paulistana: análise de dois episódios diários**. (Dissertação). Mestrado em Geografia. FFLCH/USP, São Paulo, 1994.
- SAMPAIO, A. H. L. **Correlações entre uso do solo ilhas de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador**. São Paulo: FFLCH/USP, 1981. (Dissertação, Mestrado em Geografia).
- SANTAMOURIS, M. **Natural ventilation in buildings: a design handbook**. Londres: James & James, 1998.
- _____. **Energy and climate in the built environment**. James and James, London, 2001.

- _____. **Energy in the urban built environment: the role of natural ventilation.** In: GHIAUS, C; ALLARD, F. Natural Ventilation in the urban environment: Assessment and Design. Londres: Earthscan, 2005.
- _____. **Ventilation for comfort and cooling: the state of the art.** In: SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. (ed). Building ventilation: the state of the art. Londres: Earthscan, 2006.
- _____. **Advances in passive cooling.** Londres: Earthscan, 2007.
- SANTAMOURIS, M.; PAPANIKOLAOU, N.; LIVADA, I.; KORONAKIS, I.; GEORGAKIS, C.; ARGIRIOU, A.; ASSIMAKOPOLOUS, D. N. **On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings.** Solar Energy, 70: 201 – 216, 2001.
- SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Building ventilation: the state of the art.** Londres: Earthscan, 2006.
- SANTANA, A. M. S. **O desenho urbano e a climatologia em Fortaleza.** (Dissertação de Mestrado). São Paulo: FFLCH/USP-Programa de Pós Graduação em Geografia, 1997.
- _____. **A forma urbana e a radiação solar incidente na criação das ambiências térmicas e seus reflexos na apropriação e uso dos espaços públicos externos.** (Tese de Doutorado). São Paulo: FFLCH/USP-Programa de Pós Graduação em Geografia, 2002.
- SARAIVA, J. A. G. **Aerodinâmica dos edifícios altos: característica do escoamento e resposta a turbulência de formas prismáticas.** (Tese). Concurso de especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Estruturas, Núcleo de Dinâmica Aplicada, Proc. 36/11/7367, Lisboa, Portugal, 1983.
- SARAIVA, J. A. G.; SILVA, F. V. M.; SANTOS, P. R. P. **Taxas de renovação de ar em condições de ventilação cruzada em apartamentos de tipologia simples.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, ENCONTRO LATINO – AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1999, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ANTAC, 1999.
- SAWACHI, T.; MARUTA, E.; TAKAHASHI, Y.; SATO, K. **Wind pressure coefficients for different building configurations with and without an adjacent building.** International Journal of Ventilation. V. 5 n 1, 2006.
- SEIFERT, J.; LI, Y.; AXLEY, J.; ROSLER, M. **Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 94, 2006.
- SERRA, R. **Arquitectura y climas.** Barcelona: Ed. Gustavo Gili. 1999.
- SHARAG-ELDIN, A. **A parametric model for predicting wind induced pressures on low-rise vertical surfaces in shielded environments.** Solar Energy 81: 52 – 61, 2007.
- SHAVIV, E.; YEZIORO, A.; CAPELUTO, I. G. **Sun and winds in a new business district in Tel Aviv.** Building Simulation, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001

- SHEN, X.; ZHANG, G.; BJERG, B. **Comparison of different methods for estimating ventilation rates through wind driven ventilated buildings.** *Energy and Buildings* 54: 297 – 306, 2012.
- SILVA, F. A. G. **O vento como ferramenta de desenho do ambiente construído: uma aplicação ao nordeste do Brasil.** (Tese). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- SILVA, F. M.; SARAIVA, J. A. G. **A simplified model to estimate natural ventilation flows for simple dwelling layouts.** *International Journal of Ventilation* 3, 353 – 362, 2005.
- SOMEKH, N. **A cidade vertical e o urbanismo modernizador: São Paulo 1920 – 1939.** São Paulo: NOBEL, 1997.
- SOUZA, V. M. B. **A influência da ocupação do solo no comportamento da ventilação natural e na eficiência energética em edificações. Estudo de caso em Goiânia – Clima tropical de altitude.** (Dissertação). Mestrado em Arquitetura. Departamento de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente.** (Dissertação). Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- _____. **Relatório técnico da base de simulações para o RTQ-R.** Relatório Técnico RT_LABEEE-2011/02. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- SPIRN, A. W. **O jardim de granito.** São Paulo: EDUSP, 1995.
- STAMOU, A.; KATSIRIS, I. **Verification of a CFD model for indoor airflow and heat transfer.** *Building and Environment* 41: 1171–1181, 2006.
- STEEMERS, K.; BAKER, N.; CROWTHER, D.; DUBIEL, J.; NIKOLOPOULOU, M.; RATTI, C. **City texture and microclimate.** *Urban Design Studies* 3: 25–50, 1997.
- STEEMERS, K. **Energy and the city: density, buildings and transport.** *Energy and Buildings* V. 35: 3–14, 2003.
- STULL, R. **An Introduction to boundary layer meteorology.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. **Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in buildings.** ASHRAE Research Project 448 – RP. Florida, 1987.
- _____. **Correlations for Pressure Distribution on Buildings and Calculation of Natural-Ventilation Airflow.** *ASHRAE Transactions*, v. 94, n. 1, p. 243-266, 1988.
- SWAN, L. G.; UGURSAL, V. I. **Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 13, 1819–1835, 2009.
- SZOKOLAY, S. V. **Approaches to tropical house design.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, ENCONTRO LATINO –

AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1999, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ANTAC, 1999.

_____. **Introduction to architectural Science: the basis of sustainable design.** Bullington: Architectural Press, 2004.

TOLEDO, E. **Ventilação natural das habitações.** Maceió: EDUFAL, 1999.

TOLEDO, A.; PEREIRA, F. O. R. **Métodos e técnicas de visualização para a avaliação da ventilação natural pela ação do vento em edifícios.** In: NUTAU – NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO, 2004, São Paulo. Anais... São Paulo, 2004.

TRONCHIN, L.; FABBRI, K. **Energy performance building evaluation in mediterranean countries: comparison between software simulations and operating rating simulation.** Energy and Buildings 40: 1176 – 1187, 2008.

TURKBEYLER, E.; YAO, R.; NOBILE, R.; BENTHAM, T.; LIM, D. **The Impact of Urban Wind Environments on Natural Ventilation.** International Journal of Ventilation, n. 1, 17 – 28, 2012.

UNITED NATIONS. **World urbanization prospects: the 2009 revision.** United Nations, New York, 2010.

UNFPA (United Nations Population Fund). **State of world population 2009 – facing a changing world: women, population and climate.** United Nations. New York, 2009.

_____. **People and possibilities in a world of 7 billion.** United Nations. New York, 2011.

URBVENT. **Natural ventilation in urban areas – potential assessment and optimal façade design.** Summary of the project and description of the main results. Brochure prepared by the Belgian Building Research Institute, 2004.

VALE, B.; VALE, R. **Is the high-density city the only option?** In: Designing high-density cities for social and environmental sustainability. Edward Ng (org.). Earthscan: London, 2010.

VERSAGE, R. S. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS.** (Dissertação). Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

VITRUVIUS. **De architectura.** English edition (1960) translated by Morris Hicky Morgan as the ten books of architecture. Book 9. Dover, 1960.

VOSS, K.; KUHN, T.; NITZ, P.; HERKEL, S.; WALL, M.; HELLSTRÖM, B. **Solar control.** In: advances in passive cooling. Santamouris, M. (org). Londres: Earthscan, 2007.

WALKER, I. S. **Pressure coefficients on sheltered building.** Air Infiltration and Ventilation Center. Technical Report, v13, n.4. 1992.

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

- WEIRINGA, J.; DAVENPORT, A. G.; GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. **New revision of Davenport roughness classification**. 3EACWE (3rd European & African Conference on Wind Engineering), Eindhoven, Netherlands, July, 2001.
- WINES, J. **Green Architecture**. Milan: Taschen, 2000. 240 p.
- WONG, N. H.; FERIADI, H.; LIM, P. Y.; THAM, K. W.; SEKHAR, C.; CHEONG, K. W. **Thermal comfort evaluation of naturally ventilated public housing in Singapore**. Building and Environment 37: 1267 – 1277, 2002.
- XAVIER, T. M. B. S. **Alterações climáticas urbanas em Fortaleza – CE**. In: IX Congresso Brasileiro de Meteorologia. Campos do Jordão: SBMET, 1996.
- _____. **Alterações climáticas urbanas em Fortaleza-Ceará: 1974 – 1995**. In: Tempo de chuva – Estudos climáticos e previsão para o Ceará e nordeste setentrional. Fortaleza: ABC Editora, 2001.
- YANG, L.; LI, Y. **Thermal conditions and ventilation in an ideal city model of Hong Kong**. Energy and Buildings n. 43, 1139 – 1148, 2011.
- YARKE, E. **Ventilación natural de edificios**. 1 ed. Buenos Aires: Nobuko, 2005.
- YEANG, K. **The green skyscraper: the basis for designing sustainable intensive building**. Prestel, New York, 1999.
- YUAN, C.; NG, E. **Building porosity for better urban ventilation in high-density cities - a computational parametric study**. Building and Environment n. 50: 176-189, 2012.
- ZHANG, Z.; ZHANG, W.; ZHAI, Z. J.; CHEN, Q. Y. **Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by cfd: part-2 – comparison with experimental data from literature**. HVAC&R Research, 13: 871 – 886, 2007.
- ZHANG, R.; ZHANG, Y.; LAM, K. P.; ARCHER, D. H. **A prototype mesh generation tool for CFD simulations in architecture domain**. Building and Environment 45: 2253 – 2262, 2010.
- ZHANG, J.; HENG, C. K.; MALONE-LEE, L. C. HII, D. J. C.; JANSSEN, P.; LEUNG, K. S.; TAN, B. K. **Evaluating environmental implications of density: A comparative case study on the relationship between density, urban block typology and sky exposure**. Automation in Construction 22: 90–101, 2012.
- ZHANG, R.; LAM, K. P.; YAO, S.; ZHANG, Y. **Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation**. Building and Environment 68: 100 – 113, 2013.
- ZHOU, N. **Energy use in China: Sectorial trends and future outlook**. LBNL, Energy Analysis Division, 2007.
- ZMITROWICZ, W.; DE ANGELIS NETO, G. **Infra-estrutura Urbana**. (Texto Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, TT/PCC/17. São Paulo: EPUSP, 1997.
- ZUKOWSKI, M. **A new formula for determining a minimum recommended value of inlet air velocity from UFAD system to prevent occupants from draught risk**. Building and Environment 42: 171 – 179, 2007.